

自然科学研究機構 核融合科学研究所

National Institutes of Natural Sciences (NINS)

National Institute for Fusion Science (NIFS)

平成 1 9 年度 外部評価報告書

Peer Review Reports in FY2007

2 0 0 8 年 3 月

March, 2008

核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

NIFS Administrative Council External Peer Review Committee

目 次

第1章	経緯と目的	1
第2章	大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価	5
2. 1	LHD研究の経緯とこれまでの活動状況	
2. 2	項目別の評価	
2. 3	評価のまとめと提言	
第3章	シミュレーション研究に関する評価	31
3. 1	シミュレーション研究の経緯とこれまでの活動状況	
3. 2	項目別の評価	
3. 3	評価のまとめと提言	
第4章	おわりに	57
添付資料1	核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則	
添付資料2	平成19年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員名簿	
添付資料3	平成19年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程	
添付資料4	外国人評価委員評価書	

資料編

1. 核融合科学研究所活動概要
2. 「大型ヘリカル装置（LHD）研究」成果報告書（平成16～19年度）
付録：外部評価委員会LHD専門部会からの質問に対する回答
3. 「シミュレーション研究」成果報告書（平成16～19年度）

第1章 経緯と目的

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所（NIFS）では、わが国における核融合研究の中核機関として、「制御熱核融合の実現を目指した核融合科学とその基礎となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、学術的体系化をはかり、世界に先駆けた成果を挙げる」ことを中期計画に掲げ、研究活動が展開されている（資料編参照）。中期計画においては、さらに教育研究等の質の向上を目指し「各専門分野において国内の外部委員を含む委員会で自己点検を行い、国際的に第一線で活躍する著名な研究者による評価に基づいて研究水準・成果の検証を行う。」と謳われている。これに対応して、NIFSでは平成16年度の研究機構発足にともない運営会議のもとに外部評価委員会を設置した（外部評価委員会規則（添付資料1）、委員の構成（添付資料2））。外部評価委員会は、NIFSが世界の研究拠点としての役割を果たしている現状に鑑み、日本の核融合研究において指導的立場にある所外の日本人研究者19名に4名の著名な外国人研究者を加え、総計23名の研究者で構成されている。

評価の対象は研究活動から共同研究体制や組織など多岐にわたるが、外部評価委員会は平成16年度よりそれぞれ下記を対象とした外部評価を行ってきた。

平成16年度：「大型ヘリカル装置（LHD）研究」及び「シミュレーション研究」

平成17年度：「共同利用・共同研究」、「炉工学研究センター」及び「安全管理センター」

平成18年度：「国際共同研究」、「連携研究推進センター」及び「技術部」

本年度は平成22年度からの第2期中期計画の策定に向けて今期における活動状況を中間評価する重要な年度であると捉え、NIFSの研究の二本柱である「大型ヘリカル装置（LHD）研究」及び「シミュレーション研究」を再び評価することとした。評価に当たっては、それぞれに対応して大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会及びシミュレーション研究専門部会を設け、評価作業を行うこととした。外部評価委員会の委員長、副委員長、各専門部会の部会長は、運営会議において決定された。また、学際性を配慮し、各専門部会には自然科学研究機構の他研究所からそれぞれ2名の専門委員を加えて評価作業を行った。

本外部評価の目的は、法人化後の研究活動（平成16～19年度）と今後の方向性について関連する研究分野の所外研究者によって評価することにより、共同利用機関であるNIFSにおける研究・業務の一層の充実と発展を促すことである。今回の評価では、平成16年度に行われた外部評価委員会の評価結果に対し、NIFSがどのように対応してきたかも含め評価することとした。

評価結果については、運営会議にその報告書を提出し、運営会議において承認後、核融合科学研究所長から自然科学研究機構長に提出されることになる。その後、機構の教育研究評議会及び経営協議会に提出され、承認を受けた後、文部科学省に提出する自然科学研究機構年度計画（平成19年度）実績報告書の参考資料となる。また、本

報告書は印刷物やWEBホームページとして公開を予定している。

平成19年7月26日に開催した第1回の外部評価委員会及び各専門部会において、まず、本年度の外部評価の進め方について協議し、それぞれの評価対象に対してⅠ.及びⅡ.に記した評価の観点及び具体的な評価項目を決定した。第2回の外部評価委員会（平成19年12月1日）では、研究所の担当者からこの評価の観点及び評価項目を踏まえたビューグラフや活動報告書などの資料（資料編参照）を用いての詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。その後は、各専門部会においてそれぞれ個別に1～2回の部会を開催し、研究所との更なる質疑応答も含め外部評価委員会で定めた評価の観点と項目に沿った評価作業とその取りまとめを行った。専門部会での評価案が出揃った段階で第3回の外部評価委員会（平成20年2月22日）を開催し、最終報告書を取りまとめた。外部評価委員会及び各専門部会の日程を添付資料3に示した。

本報告書は、第1章 経緯と目的、第2章 大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価、第3章 シミュレーション研究に関する評価、第4章 おわりに の4章で構成されている。なお、外国人評価委員からの評価レポートは、ご本人の許諾を得て添付資料4としてそのまま掲載させていただいた。

Ⅰ. 大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する外部評価の観点

下記外部評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が責任を有するLHD研究の評価に必要な不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

〔1〕～〔4〕は、中期計画に記載されている事項で、〔5〕〔6〕は、関連したものとなっている。

〔1〕 核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、下記事項を達成することなどにより、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることができたか。

（1） 核融合炉心プラズマを見通すことを目指して、プラズマの高性能化を図ることができたか。

（2） 環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を進めることができたか。

〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

（1） 加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進めることができたか。

（2） プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明などを、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進めることができたか。

〔3〕 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画を得て共同利用・共同研究を適切に進められたか。そのために環境を整備することができたか、また、大学の研究発展にも寄与できたか。

- [4] COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。
- [5] 他分野へも発信できる学術発信拠点となりえたか。
- [6] 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。
- [7] 今後の研究計画は適切か。特に、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えたものとなっているか。
- [8] 上記観点に挙げられているものを除き、平成 16 年度の外部評価で指摘された事項について適切に対応したか。
 - (1) テーマの設定やその進め方は適切であったか。特に、実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、より良いシステムに成長させることができたか。また、ITER への寄与が明確なテーマを選択したか。（注 ITER：日、欧、米、露、中、韓、印の国際協力により建設が始まった国際熱核融合実験炉）
 - (2) 理論・データ解析に関しては、理論・シミュレーションとの連携を強めることにより、総合力をアップできたか。更に、トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たか。
 - (3) 計測機器の開発は、ITER にも適用可能な先進計測機器も視野に入れ、所内外の研究者と連携してチャレンジできたか。

II. シミュレーション研究に関する外部評価の観点

下記外部評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が推進するシミュレーション研究の評価に必要不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

[1] ～ [4] は、中期計画に記載されている事項で、[5] [6] は、関連したものとなっている。

- [1] シミュレーション研究を進めることによって、核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化、更に核融合研究を支える基礎研究としての複雑性の科学の探求等において、世界に先駆けた学術的進展があったか。
- [2] [1] を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。
 - (1) 組織改編により、集約的研究成果を生み出し柔軟かつ有機的な運営が可能な研究基盤が整備されたか。
- [3] 大学共同利用機関法人として、大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用した大学等との共同研究及び連携を積極的に推進し、シミュレーション研究の展開に貢献できたか。
- [4] COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。
- [5] 自然科学研究機構内分野間連携等を通し、他分野へ発信できる学術発信拠点となり得たか。

- [6] 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。
- [7] 今後の研究計画は適切か。特に、中長期的な展望を見据えたものとなっているか。
- [8] 上記観点に上げられているものを除き、平成16年度外部評価及び平成17年度組織検討委員会において指摘された事項について適切に対応したか。
 - (1) LHD・磁場閉じ込めプラズマ、レーザー核融合プラズマ、複雑性プラズマの各プロジェクトによるテーマ設定、研究の進め方は適切か。
 - (2) ITER及びBAへの寄与が明確な研究テーマを設定し、体制を準備しているか。（注 BA：日・欧州原子力共同体による「核融合の将来への幅広いアプローチ協定」）
 - (3) 研究及び計算機環境の進展を配慮し、共同利用の観点を踏まえつつ、大型シミュレーション研究用解析装置の構成を検討し、運用計画を立案しているか。
 - (4) 可視化やバーチャルリアリティシステムの成果を公表・発信し、成果の幅広い波及、連携研究に努めているか。

第2章 大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価

2. 1節では LHD 研究の経緯とこれまでの活動状況について述べる。2. 2節では LHD 研究における研究成果と関連した共同研究活動について、第1章で掲げられた項目に従って、各委員から示された評価を集約して記述する。2. 3節では評価のまとめと提言を記す。

2. 1 LHD 研究の経緯とこれまでの活動状況

LHD 計画は、わが国独自の開発の歴史を持つヘリオトロン磁場を用いた世界最大の超伝導ヘリカル装置を建設し、定常運転核融合プラズマの閉じ込め方式の研究を行い、ヘリカル方式による炉心プラズマのための重要な物理的、工学的研究課題を解明することを目的としてスタートした。この計画は核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて学術的体系化を図り世界に先駆けた成果を上げることを目指しているが、その重点研究課題は、LHD の設計時に課された「高温・高密度・長時間プラズマを発生し、炉心プラズマに外挿し得る輸送の研究を広範に行う」、「炉心プラズマに必要な平均ベータ値 5%以上の高いベータプラズマを実現し、関連する物理を調べる」、「ダイバータを設置して、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る」等である。これらは平成9年度に実験が開始され、研究の進展が図られた現在も、成果の評価を行うに当たって基本とすべきものとなっている。

平成16年4月より大学共同利用機関が法人化されたことに伴い、核融合科学研究所（NIFS）も大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一員として中期計画を策定することとなったが、その内容は、平成14年度に核融合科学研究所運営協議員会の下に設置された将来計画検討小委員会の報告書（平成15年2月5日の第60回核融合科学研究所運営協議員会で承認）、この将来計画を実行するため核融合科学研究所運営協議員会の下に設けられた中期方策検討ワーキンググループが答申した具体案（平成15年3月10日の61回核融合科学研究所運営協議員会で承認）及び科学技術・学術審議会、学術分科会、基本問題特別委員会のもとに設けられた核融合研究ワーキンググループの報告書（平成15年1月8日）を基に作成されている。中期計画は、前述した LHD 計画スタート時の重点研究課題を推進するための施策であり、研究目的に変化はないが、共同研究を柱にした研究推進の姿勢がより強く打ち出された。この具体的な現れの一つが双方向型共同研究の創設である。プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明などを、大学付置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用することにより効率的に進め、NIFS を含む大学に於ける核融合研究を発展させることを目的としている。筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターの4つのセンターとの双方向型共同研究が進行中である。京都大学では閉じ込め改善モードとヘリカル磁場配位の構造との関係を実験的・理論的に解明する共同研究が進展している。九州大学では、高温プラズマの定常化とプラズマ壁相互作用研究並びに球状トーラス型定常実験装置を用いる共同研究計画が進展している。筑波大学ではプラズマ閉じ込め改善の機構解明並びにジャイロトロンについての双方向の共同研究・研究協力が着実に進んでいる。これらの成果は LHD 研究の目標の 1 つである環状プラズマの総合的理解を深めるものとなっている。また大阪大学ではレーザーによる高速点火研究及び関連する超高密度プラズマの物理解明が進展している。更に、これらの 4 つのセンターをサブコアとした共同研究の輪が広がっている。

LHD は、平成 9 年度の実験開始後、付帯する設備が順次、整備され、共同研究に供されている。実験計画の策定に当たっては、研究者の自由な発想に基づく研究に対する機会を最大化し、かつその実施を円滑にするための仕組みを工夫してきており、多様な成果が生まれる環境を整える努力を共同研究の枠組みの中で重ねている。このような、ボトムアップ的な研究アプローチを生かしつつ、上述の目標を志向するプログラム的なアプローチと整合した実験計画の策定がなされている。また、所内外の共同研究者の意見が LHD 実験に反映され、透明性が増すとともに、例えば、LHD 実験に容易に参画できるよう、LHD 実験の策定・運用等を行っている LHD 実験会議の仕組みにも、所外の研究者を加える等の工夫がなされている。また、これらが透明性を確保して行われるよう最新の情報提供に努めている。

平成 16 年 4 月の法人化後、研究所の研究組織が満たすべき要件は、中期計画を確実に遂行できることとされた。また、上述の核融合ワーキンググループの報告に対応できる研究組織であることが必要不可欠となった。このため、第 63 回運営協議員会に設置された、「平成 16 年 4 月に設置される自然科学研究機構核融合科学研究所の組織」について検討するための組織検討小委員会では、これらの要件を満たす研究組織について議論が行われ、組織検討小委員会から答申された新組織案が第 66 回運営協議員会で承認された。これを受け、平成 16 年 4 月の法人化にともなって大型ヘリカル研究部の改組が行われ、上述の要件を満たす研究組織が誕生した。この研究組織は、改組の趣旨に沿って、LHD 建設期の担当ハードウェアに応じた構成から、研究テーマに則したものに改組されている。また、この研究組織では、予算の執行においても、重点化、効率化、透明性がさらに図られ、核融合研究ワーキンググループの報告の精神に則って、LHD 計画の効率的推進が行われている。

このような LHD 研究のハード・ソフト両面での研究推進体制の整備のもとに、LHD のプラズマ実験は、順調に進展し、重点研究課題について多くの発展と新しい知見が得られるなど、核融合炉を目指したプラズマの閉じ込め研究として多くの注目すべき成果が得られた。

- (1) LHD において生成保持されるプラズマの特性は当初の予想に沿ったもの、もしくはそれ以上であることが明らかになり、現在、それぞれの特徴的なプ

ラズマ生成運転において、超高密度プラズマの生成 ($1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$)、高ベータプラズマの生成 (β 値 5%)、長時間プラズマの維持 (54 min)、高イオン温度プラズマの生成 (6.8 keV) 及び高電子温度プラズマの生成 (10 keV) 等が達成されるに至った。

(2) これらの達成されたプラズマパラメータの量的な拡大が、超高密度プラズマを実現する粒子拡散障壁の発見や、高イオン温度プラズマ生成に伴う不純物ホール発見などによって、結果として LHD プラズマの新たな魅力を喚起し、LHD プラズマの質的向上へ転換していく優れた契機となっていくものと期待される。

(3) また、超伝導コイルのサブクール化、NBI/ICRF/ECH 等の加熱技術の進展及びプラズマ計測の高精度化が図られた。

これらの LHD 研究の成果は、共同研究活動として、所内外の共同研究者による学術論文や国際会議での発表という形で現れており、国内外の COE として NIFS の貢献度を示す上で大きな指標となっている。

また、NIFS は、各国の研究機関との協定締結による研究連携や国際協定の執行機関としての役割も果たしている。LHD を用いた最先端の研究現場に於ける学生の教育と研究指導も、総合研究大学院大学の基盤研究機関として、また名古屋大学大学院、北海道大学大学院、富山大学大学院との連携大学院として実施している。さらに、特別共同利用研究員の受け入れ機関としても学生の教育と研究指導を積極的に行っている。

NIFS では、現在の水素プラズマによる LHD 実験の成果の大きな進展に伴い、今後、重水素プラズマによる実験に進むことを計画している。重水素を用いれば、より高性能なプラズマを生成することができるため、炉心プラズマへの外挿性の精度を高めた実験が可能になる。重水素の同位体効果による閉じ込めの改善、閉ダイバータによる排気効率の向上、加熱装置の増強と改良による加熱パワーの増強等がプラズマの高性能化に寄与すると期待されている。これにより LHD プラズマの最終目標値（プラズマ密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ での高電子温度 10 keV、高イオン温度 10 keV、磁場強度 1-2 T での β 値 5%、加熱入力 3 MW での長時間プラズマ維持 1 hr.）の達成が可能となる。LHD 計画の所期の目標として設定されていた重水素実験に関する具体的な実施計画については、自然科学研究機構核融合科学研究所運営会議の下に設置された LHD における重水素実験計画検討小委員会において審議され、第 14 回運営会議（平成 19 年 5 月 18 日開催）で承認されている。LHD の次期中期計画は、この重水素実験計画を基に作成される予定になっている。また、この計画により共同研究の幅がさらに広がると期待される。

大型ヘリカル研究部は、理論・シミュレーション研究センターとともに、平成16年度の研究成果を対象に運営会議の第1回の外部評価を受けている。この時の大型ヘリカル研究部の評価対象は、LHD、コンパクトヘリカルシステム (CHS)、理論・データ解析、炉システム・応用技術の研究成果であった。大型ヘリカル研究部は、この評

価結果、指摘事項を真摯に受け止め、研究、教育等の活動を進めてきている。来年度、中期計画全体の評価を受けるにあたり、この平成16年度を含む、中期計画開始後の4年間の研究活動等の進展を評価することとなったが、評価項目には、平成16年度の指摘事項も含んでいる。

2. 2 項目別の評価

- [1] 核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、下記事項を達成することなどにより、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることができたか。

By achieving things written below, did we succeed in a academic systematization and also produce outstanding results that led the world in the field of nuclear fusion science as well as in the fields like plasma physics and fusion engineering that are the basis of nuclear fusion science to actualize the fusion energy?

- (1) 核融合炉心プラズマを見通すことを目指して、プラズマの高性能化を図ることができたか。

Did we succeed in enhancing the plasma performance to see through the nuclear fusion core plasmas?

- LHD では、設計時において 5 つの重点研究課題に応えるために必要とされているプラズマ性能の目標が設定されている。これらの目標に対して世界に先駆けた成果を着実に上げていることは高く評価できる。(6 名)
- NBI の増強、ペレット入射により超高密度プラズマを実現し、プラズマ性能を大きく向上させた。この結果はヘリカル型核融合炉の実現に向けた大きな飛躍である。今後、超高密度とともにヘリカルリップル・ロスが少ない磁場配位を適用するなら実証炉への展望が高まる。プラズマパフォーマンス及び学術の両面から、高く評価できる。(2 名)
- 超高密度プラズマの生成 ($1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$)、 β 値 (5%)、長時間プラズマの維持 (54 min)、中心イオン温度 (6.8 keV) 及び中心電子温度 (10 keV) を達成したことは評価に値する。(2 名)
- 核融合三重積、電子温度、イオン温度、ベータ値ともに着実に増大している。これらは加熱機器の整備と閉じ込め物理の理解の両面の努力の結果であり、高く評価できる。また、ローカルアイランドダイバータによる周辺排気とペレット入射装置の整備の結果である高密度の達成は、LHD の今後の方向性の観点からも重要な成果である。(2 名)
- 能動的な粒子制御により、内部拡散輸送障壁 (IDB) を発見し、高密度 ($1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$) / 高圧力 (150 kPa) のプラズマ生成に成功していることは、優れた成果として高く評価できる。(2 名)
- 粒子拡散障壁 (IDB)、電子熱拡散障壁の形成等、大きな成果があった。これらを炉心プラズマ実現へむけて具体的に戦略として位置づけ、今後の展望を明らかにしていくことを希望する。(2 名)
- 特に超高密度の達成は、ヘリカル炉に対する新しいアプローチを提示するもので興味深い。今後、重水素実験の開始により、更なる高性能化が期待される。(1 名)
- 長時間実証実験では、定常プラズマの維持に成功しており目的は達成されつつあ

るが、加熱パワーは 500kW でとどまっている。さらなる高性能化に向けて、今後の改善策と目標の 3MW での定常運転のシナリオが必要であろう。(1 名)

- 所定の加熱電力による長時間放電の目標達成は物理以外の技術的要素による制約も強い。加熱機器の合理的な整備計画のもと、目標を達成していただきたい。(1 名)
- During 2004-2007 review period of Mid-Term Plan, the LHD Research Program succeeded to achieve outstanding experimental results of enhancing plasma performance. Especially, demonstrated experimental results such as Super Dense Core Plasma with Internal Diffusion Barrier, Extension of High-beta Regime, Steady-state Operation and Extension of High-Ion Temperature Regime, showed the LHD Plasma Performance exceed initial target of Mid-Term Goals. (3 名)
- Up to now, however, peak performance is achieved only in distinctively different discharge scenarios. Recommendation: The further development of the device and the scientific program should try to integrate the different scenarios associated with the above peak performance values. Only an integrated high-performance discharge scenario will be able to pave the way to fusion power. (1 名)

(2) 環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を進めることができたか。

Did we properly carry out the academic scientific research for the comprehensive understanding of torus plasmas and the actualization of nuclear fusion core plasmas?

- 高ベータプラズマを実現する過程での MHD 研究や Zonal Flow の研究は、環状プラズマの総合的理解と炉心プラズマの実現に向けた学術研究として世界でも注目されており、優れた成果として高く評価できる。(4 名)
- 圧力駆動型 MHD 研究、熱・粒子輸送の物理、閉じ込め改善についての実験と理論・データ解析の進展は、トカマクとの対比を考慮しながら進められ、環状プラズマの総合的理解に向けての貢献も大きく、高く評価できる。(2 名)
- ここ 2~3 年の研究の進展には眼を見張るものがある。例えば、ITB を生成するための条件を見出し、高密度／高圧力のプラズマを安定に閉じ込めることに成功したこと、トカマクには無い現象として不純物ホールを見出したことなど高く評価できる。特に後者はヘリカル炉への道を開く可能性秘めた現象であり、更なる研究の進展を期待している。(1 名)
- 大いに進展させることができた。ただし、環状プラズマの総合的理解は容易なことではなく、まだまだ道のりは長いことと考えられる。(1 名)
- ヘリカルリップルによる拡散が電場形成や新古典輸送において果たす役割がより明確となり、トカマクとの比較においておおきな進展があった。今後、トカマクにより具体的な貢献ができることを希望する。(1 名)
- 超高密度放電の成功により、核融合炉の炉心プラズマの実現の期待が高まった。

また、閉じ込めにおける径電場の効果、粒子ロスของメカニズム等、トロイダルプラズマの総合的理解に貢献する学術成果を蓄積している。今後、計画している重水素放電では、閉ダイバータを用いてリサイクリング制御して閉じ込め研究を行うので、トカマクのHモードとの比較もできるようになる。閉じ込めの学術研究が促進されよう。これらの点から高く評価できる。(1名)

- 達成された数値のみならず、炉内物理パラメータの精確な計測がなされており、学術的基礎力を感じる。(1名)
- 熱輸送やITBの構造等でトカマクとの比較・検討が着実に進んでいる。(1名)
- Impurity holeの発見は興味深い。トカマクとの違い等を明確にして、環状プラズマでの不純物輸送の機構解明に結びつけることを期待する。(1名)
- ヘリカルはトカマクとの類似性も見られるが、他方、不純物がコアプラズマの外に排出されるヘリカルと内側に閉じこめられるトカマクの差異も見出され始めている。これらの類似性や差異を追求することは、メカニズム究明に重要な役割を演ずるものと思料される。(1名)
- 定常プラズマ保持の研究も精力的に行われているが、不純物によりプラズマが崩壊することへの一層の対応が望まれる。(1名)
- 周辺プラズマの物理について理論・データ解析が若干弱いように見受けられるので、今後の強化を期待したい。(1名)
- 「大型ヘリカル装置(LHD)研究」成果報告書(平成16年度～19年度)(案)」によると、「炉心プラズマの実現に向けた学術研究」が物理テーマ実験として位置づけられている。物理テーマ実験で多くの成果が上がっていることは間違いないが、各実験テーマを進める研究者は「炉心プラズマの実現に向けた学術研究」をどの程度意識しているか。また、高密度側からの自己点火領域へのアプローチを進めるのであれば、「環状プラズマの総合的理解」のための研究を組織的に進めつつ、トカマクとの違いの明確化が今後重要になると思われる。(1名)
- ヘリカル磁場最適化の観点から、立体磁気軸ヘリカル系のヘリオトロンJ等との双方向型共同研究を推進し、LHD以降の次期計画(ヘリカル型ニューメリカル・テストリアクターを含む)への展望を切り開く必要がある。SDCを念頭に置いたヘリカル型核融合炉設計の新たなシナリオ構築の研究展開に期待したい。(1名)
- One of the outstanding recent experimental highlights on LHD was the discovery of the internal diffusion barrier. This has led to a breakthrough in super-high density performance. The results have been sufficiently encouraging to warrant studies of a helical fusion reactor based on this concept. Other recent LHD experimental highlights have been the discovery of an impurity hole in the center of the plasma and the observation of strong toroidal rotation (coincident with high ion temperature). Important theoretical and experimental work (with international collaboration) on understanding turbulent transport with zonal flows was carried out in LHD. (3名)

〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

To carry out the perspective [1], did we perform the following?

（1） 加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進めることができたか。

Did we properly carry out the maintenance and intensification of heating devices as well as diagnostic devices and the improvement of devices?

- 低エネルギー垂直 NBI の開発に集中的な投資が行われ、高い中心イオン温度の達成や不純物ホールが発見に繋がった。適切な研究計画とそれを期待通りに実現した研究・開発の成果であり、高く評価できる。定常射出可能な連続ペレット入射装置が開発され、高密度／高閉じ込め放電の長時間維持実験を可能にした。環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を支える工学として高く評価できる。（5名）
- LHD の高い研究成果の背景には、トムソン散乱装置や炭酸ガスレーザ干渉計等の基幹的計測器の高性能化・ルーチンの計測の努力とともに、荷電交換分光計測装置など先進的な計測器の整備があることも評価すべきである。加えて、炭酸ガスレーザを用いたイメージング干渉計は今後重要な物理的知見をもたらすと期待できる。（1名）
- NBI の改良、特にマルチ・スロット・グラウンド・グリッド等の改造により、着実な進展が見られ、 T_i の増大に加え β 値も増大し、5%に至った事は特筆に値する。（1名）
- 加熱機器に関しては、特に NBI の入射電力の著しい向上、ICRF 及び ECRH の長時間放電達成への寄与が評価される。また、ペレット入射による高密度放電の達成は LHD の運転パラメータ拡大に対する大きな寄与である。（1名）
- プラズマ計測技術を高めてプラズマ挙動の解明に寄与している。加熱においても、ビームの入射方向依存性を明らかにしており、優れた成果を挙げている。今後、予定されている重水素実験における加熱系の増強や整備は適切であり、学術研究の推進に寄与するとみなせる。これらの点から評価できる。（1名）
- 加熱機器として垂直入射低エネルギーNBI が導入され、高精度荷電交換分光計測を可能とした。また、計測機器としては炭酸ガスレーザを用いたイメージング干渉計を開発、及び粒子輸送を計測するためのトレーサ内蔵ペレット法を開発したことは評価できる。（3名）
- 垂直入射低エネルギーNBI の導入は予想通りの成果を挙げ、負イオン方式 NBI の改良は入射パワー増大に、ICRF アンテナの改良は定常化運転に繋がっており評価できる。（1名）
- 今後もプラズマ性能を向上させるために必要な加熱機器の増強と学術研究を推進するための計測機器の開発が必要であろう。（1名）
- 専門外のため、客観的評価はできないが、核融合の扱う高温を考えると各種計測器の性能には驚くべきものがある。（1名）
- During Mid-Term period, the P-NBI system construction and operation contributed very

much to achieve core plasma performance enhancement, also the ECH Gyrotron development and ICRH Antenna improvement contributed to enhance understanding of toroidal plasmas. It is also worth to mention the successful installation and operation of Charge Exchange Recombination Spectroscopy systems to measure ion temperature accurately and demonstrate understanding of high ion-temperature modes resulting to discovery of improved modes. (3名)

- The necessary detailed design work for a closed helical divertor should be in the focus of device enhancement, since a (non-local) divertor solution with acceptable heat load is absolutely inevitable for a future fusion power plant based on the stellarator principle. (1名)

(2) プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明などを、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進めることができたか。

Did we properly carry out the research to elucidate the physical organization necessary to improve the plasma performance as a bilateral collaborative research by organically utilizing devices and equipments of various research institutes, universities, university research institutes, and research centers?

- 双方向型共同研究の枠組み創設により、大学共同利用研究所としての NIFS 以外の拠点施設や大学で蓄積されてきた学術的知見・研究設備がより広く活用できるようになった。各拠点の研究成果がプラズマの高性能化のために必要な物理機構の理解に寄与している点や、逆に大学・附置研究所・センターの研究に貢献している点など、双方向型共同研究は有効に機能しており、その意義は高く評価される。(3名)
- 双方向型共同研究のシステムを活用し、外部に出向いての幅広い研究が行われており、成果を挙げている。今後は、研究内容のさらなる向上と有機的な活用を確実な成果に結びつけるための工夫が必要であろう。更なる取り組みを期待したい。(2名)
- NIFS は、国内プラズマ物理、核融合工学のメッカとして十分中心的な役割を果たしている。(1名)
- 双方向型共同研究として、極めて活発に進めることができた。ただし、物理機構の解明等は容易なことではなく、まだまだ研究すべき課題は多いと考えられる。(1名)
- ECH 関連では筑波大とのジャイロトロンについての双方向の共同研究・研究協力が着実に進んでいる。(1名)
- 双方向型研究において、トロイダルプラズマの総合的理解に貢献すると見做せる球状トカマクも計画されている。研究内容と成果の質が向上した。センターの装置の活用に加え、特に人的交流が促進され、このような成果が生まれたとみなせ

る。これらの点から評価できる。今後、重要となる核融合学術研究へ適宜シフトしていくなら、双方向型共同研究の重要性が高まる。(1名)

- 計測の分野で有機的な活動ができた。(1名)
- 10年後のITER実験への人的貢献を視野に入れるとき、大学におけるプラズマ教育・人材養成の強化のために、双方向型共同研究の発展は不可欠な要素となっている。全国のセンターにおける中型プラズマ実験装置の充実・活性化を図り、最先端の研究現場において、優秀なプラズマ研究者の養成を急がなければならない。(1名)
- 国内の4箇所の研究機関との双方向型共同研究を着実に推進している点は評価できる。但し、これらの研究機関は何れもプラズマ研究が主であり、核融合炉の実現を目指す研究開発には炉工学を主体とする研究機関との双方向型共同研究も必須であり、本共同研究の更なる総合的な展開が不可欠である。(1名)
- 双方向は目に見えるものになっているケースが少ないと思われる。(1名)
- For efficiently executing program by utilizing domestic institutions' capacity, the LHD Research Program executed extensive collaboration programs with a few different schemes such as LHD Program Collaboration, Bilateral Coordinated Collaboration, and General Collaboration Research. It is well organized with more than 157 Facilities with more than 1,300 experts in nationwide network. Many examples of collaborative research output were explained during review meeting that showed successfully executed program performance。(2名)
- Partly yes: It is not at all straightforward to define topics of relevance for LHD that can be directly addressed on other devices in universities and other research institutions. A good example is the H-mode research done on Heliotron J at Kyoto-university. Perhaps more could be done in the area of turbulence research, e.g. with linear laboratory devices like the one in Kyushu-university, where already collaborative work on plasma-wall interaction is done. Another positive example is the gyrotron development at Tsukuba-university, which allows the Japanese academia to maintain and to expand the know-how in this field. In any case, LHD greatly benefits from the broad and healthy academic environment provided by the Japanese universities involved in LHD operation。(1名)

[3] 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画を得て共同利用・共同研究を適切に進められたか。そのために環境を整備することができたか、また、大学の研究発展にも寄与できたか。

Did we properly carry out the inter-operation and collaborative research by obtaining more active participation from various research fields including the participation of those researchers who study subjects other than nuclear fusion? Accordingly, did we successfully prepare the environment? Also, did we successfully contribute to the research development of universities?

- 一般共同研究、LHD 計画共同研究に双方向型共同研究が加わり、様々なタイプの共同研究に対応できるシステムが整備された。これは核融合分野が他の分野に先駆けて取り組んだものであり、NIFS と核融合研究コミュニティの一致協力した努力の成果として高く評価できる。共同利用・共同研究の申請は年々増え続けており、核融合研究の大きな支えとなっている。その機会が徐々に減少しつつある大学における基礎研究に果たす役割は大きく、高く評価できる。(5名)
- 双方向型共同研究の展開により、全国の大学におけるプラズマ教育の充実・活性化のための環境整備を実現することができ、センターを含めた大学の研究の発展に大きく寄与していることを、高く評価する。(2名)
- 双方向型共同研究や LHD 計画共同研究の一部では、大学における研究の自主性の確保と人材教育に非常に貢献していることは高く評価できる。(1名)
- ユーザーズオフィスの設置、核融合科学アーカイブズの整備など環境整備が進められたことは高く評価できる。(1名)
- 3 つの共同研究を展開することにより、幅広い分野からの研究者を包括するように努力していることは評価できる。(1名)
- 一般共同研究及び LHD 計画共同研究の分野では共同利用、共同研究が大学の研究発展に寄与している例が目に見える形になっている。(1名)
- 天文など他分野との研究連携も進み始め、また国際共同研究拠点ネットワークプロジェクトを整備し、国内の核融合分野以外の研究者が参画できるように努めているのは評価できる。(1名)
- 核融合以外の分野との連携については、天体プラズマの研究、セラミックスなど産業との連携などで成果が見られ、一定の評価はできるが、本来分野を超えた連携は難しいものであり今後も努力を続けていただきたい。(1名)
- 「分野間連携による学際的・国際的研究拠点形成」事業において、核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からの共同利用・共同研究が進められており、適切な対応がとられている。(1名)
- 核融合以外というのが何を意味するか不明だが、たとえばイメージングサイエンスという学際領域における一角を核融合研究の中に取り込んでおり、他分野との連携の道を拓いている。(1名)
- 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画という観点からは、報告書記載事例数では若干少ないと思われるので、今後の増加努力を期待したい。(1名)
- 共同研究テーマが多岐にわたっているため、その成果が分厚い報告書として刊行されている。しかし、これを読んで LHD の研究成果の全貌を理解するのは困難である。共同研究を含め LHD で得られた成果を「核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野」の研究者に共有してもらい、「より一層の参画を得て共同利用・共同研究を適切に進める」ためにも、核融合研究としての LHD の成果、環

状系装置としての理解の進展、プラズマ物理学的知見の蓄積、さらに幅広い学術的成果等、研究の方向性や階層毎に適切に整理された成果のまとめと発信があるとよいように思われる。(1名)

- It is very encouraging to witness the NIFS and LHD Research Program finds way and execute interdisciplinary research in various science areas especially in environment, solar science, astrophysics, as well as life science. (1名)
- The NIFS inter-university collaborations are paying off in terms of fruitful contributions to the success of the LHD project. One such example is the investigation of the key role of the edge radial electric field in improved confinement, in collaboration with Tsukuba University and Kyoto University. (1名)
- A very positive example is the development of cryo-targets for ICF done by the NIFS cryo group, where the know-how obtained with pellets could be used. Also in the diagnostics area, there are first joint activities with ILE Osaka, which seem to be very promising. (1名)

[4] COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。

Did we successfully play a role as COE? Moreover, did we also play a role as COE in a global sense through international collaborative research and contributions?

- LHD は大学の共同利用装置として多くの大学等から研究者が使用している。この共同研究のため所内の研究者も貢献している。国内外で幅広く COE として十分にその役割を担っている。特に、ヘリカル系の研究では世界の最先端を進んでいる。国際的には、日米、日欧、日中、日韓等の連携体制を整備して、活動を促進しており、国際的にも COE としての役割を果たしている。これらの点から高く評価できる。(6名)
- 国内外において、まぎれもない COE と言える。これは、NIFS が予算規模メリットに溺れない組織化力を示した例であろう。(1名)
- 大いに役割を果たしてきた。ただ欲を言えば、NIFS のポテンシャルをもってすればさらなる大きな展開も想定できるので、期待したい。(1名)
- LHD は国内における重点化装置として位置づけられており、共同研究を通して大学における核融合研究の進展に貢献しているのは評価できる。外国の研究機関と個別の学術協定を締結し、国際的な核融合研究のリーダーシップを発揮しているのは評価できる。(1名)
- 学術研究の観点から、充分 COE としての役割を果たしていると評価する。また、国際エネルギー機関・実施協定「ステラレータ概念の開発」にもとづく共同研究活動によって、若手を中心に、国際的 COE としての役割を適切に果たしている。(1名)
- 多くの国際共同研究、国際連携の窓口となっており、誠実にその役割を果たして

いる。しかしながら、国際的な COE としての役割を果たすためには、各研究者の積極的な国際進出、国際貢献が不可欠で、そのための更なる努力が望まれる。例えば、ITPA への参加者は年々減少しており ITER が正式にスタートし国際的な競争力が求められる世界の核融合研究の流れと逆行しているような印象を受ける。また、国際会議への参加率も必ずしも高くない。各研究者がそれぞれの分野でしっかりと国際的な地位を築くことが国際的な COE を果たす基本条件となることを強く認識していただきたい。(1名)

- NIFS is the unquestioned center of excellence for helical/stellarator research in the world.
(2名)
- The Global COE role of NIFS and LHD is not limited to the helical systems, but rather all confinement concepts including tokamak. It is worth to note that the leadership in Asian fusion programs and among helical systems are well recognized and appreciated.
(1名)

[5] 他分野へも発信できる学術発信拠点となりえたか。

Did we successfully function as an origin for the academic scientific transmission that can also transmit to the research fields other than nuclear fusion?

- 大規模超伝導コイルシステムやマイクロ波加熱装置開発などの成果の応用、LHD で生成される高温プラズマの学術的利用等、LHD で得られた学術的成果の他分野への拡がりが高く評価できる。(1名)
- マイクロ波を用いた材料への応用や、天文等の他分野との研究連携等の新たな試みを実施しており、学術発振拠点として活動していることは高く評価できる。(1名)
- 他分野への貢献につながり、今後の萌芽となりうる機構内協力も進められている。他分野或いは一般社会への啓蒙に力を入れている執行部の姿勢は高く評価できる。(1名)
- マイクロ波の他分野への適用などハード面で学術発信している。今後、さまざまな応用を期待している。理論シミュレーションにおいては、他分野への展開が最近高まっており、興味ある結果が得られている。このような点で評価できる。(1名)
- LHD プラズマを光源として利用する研究やリソグラフィなどの工業応用を図る研究など着実に他分野に発信しており評価できる。(1名)
- LHD 本体の運転は総合的な科学・技術基盤の形成によって初めて実施されるものであり、これまでに各種の新規の技術開発がなされ、それらの多くは他分野においても極めて有効な知見・技術となり、大きな影響を与えていることは評価できる。(1名)
- 一部の分野において、大いに発信拠点となってきた。しかし、このこと自体（他分野への学術発信拠点）は、極めて難しい事柄である。(1名)

- LHD の実験情報の公開など地元の理解を得る努力は良くなされているが、将来計画を睨んでさらに力を入れる必要がある。マスメディアを通じた成果の公開も適切に行われている。(1名)
- プラズマの有効利用は核融合だけに留まることなく他の学問領域及び技術領域と関連性を持ちながら研究活動を推進することが望まれる。(1名)
- 今後の更なる努力を期待したい。(1名)
- The interdisciplinary collaboration did successfully contribute NIFS and LHD program as an origin of knowledge transmitted to the variety of science fields. (1名)
- NIFS has been involved with the International Strategy Board/International Cooperation Office and the Research Cooperation and Liaison Board/Office of the National Institutes for Natural Science in the NINS activities to establish a basis for international and interdisciplinary research. It would be of interest to learn more about the LHD International Mutual Experiment project (LIME). (1名)
- Partly yes: It is extremely difficult to make a concise assessment of 'spill overs' from nuclear fusion research. (1名)

〔6〕 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

Did we successfully contribute to the fostering of human resources who would play an active part in an international situation?

- 総合研究大学院大学では外国人留学生も多く、教育面での国際貢献は大きい。大学院生向けの入試広報活動も活発である。大学院生、若手助教の国際会議への出席件数も多く、国際的研究環境が築かれていると評価できる。(2名)
- 大学院生の教育及び大学院生や若手研究者の国際会議への派遣支援に努力しており、若手研究者を国際的に活躍できる人材として養成したと評価できる。(2名)
- 留学生も受け入れて最先端の教育が実施されており、これらは評価できる。(2名)
- COE 研究員として若手研究者を雇用し、国際会議等への派遣支援も行いながらその育成に努めているのは評価できる。(1名)
- 当然ながら、大いに養成してきた。「人材の養成」は、場の提供とその場にいる個々の能力によるところが大きい訳で、研究所としては良好な研究環境を準備提供することでその役割は尽きている。その意味で、極めて良好な場を提供し貢献してきたが、ただ欲を言えば、NIFS のポテンシャルをもってすれば、さらなる大きな展開も想定できるので、期待したい。(1名)
- 国内の大学、総合研究大学院大学、名古屋大学、北海道大学、富山大学と連携しており、大学院生や学生の研究・教育に貢献している。また、双方向型共同研究において、大学のセンターでは、多くの学生・大学院生の研究指導をしている。国際的には、COE 研究員制度を用いて海外からの若手研究者を受け入れており、国際的にも人材育成に貢献している。これらの点から高く評価できる。(1名)
- 若手の人材育成に貢献しており目的は達成されつつある。しかし、これらの人材育成が国際的に活躍できる人材養成につながっているかどうか調査・検証が必要

であろう。また、研究所の規模や研究者の人数を考慮すると、大学との連携を強化しながら、さらなる若手の人材育成を期待する。(1名)

- 他大学の大学院との連携に加え特別共同利用研究員の制度も活用して学生の教育がなされており、大学院での教育・研究内容が活かされるような場に就職している学生も多い様である。(1名)
- 過去4年間博士号取得者の数はこの規模の研究所としてはむしろ少ない。従って、質が問われる。(1名)
- [4]とも関連するが、やはり独自の積極的な人材育成プログラムを持ち、戦略的に取り組むことが必要である。
- 総研大以外にも実質的に LHD を研究の場とした学位取得者及びその後の進路情報もまとめるのがよいように思われる。(1名)
- NIFS の問題ではないが、研究職の多くが任期のあるポストであり養成した人材が不安定な状態にあるとすれば今後問題になると思われる。(1名)
- The data of NIFS and LHD Program on the human resource development showed very successful results. The Ph. D. Graduation results from LHD showed highly recognized thesis quality and the mixture of foreign students with domestic ones. (1名)
- The number of student researchers at NIFS from associated universities has declined slightly in the most recent twelve months. The plans of NIFS for enhancing student mobility by increasing the number of affiliated universities (including foreign universities) are commendable. (1名)
- Yes: The LIME fund and its successor have contributed to a great deal to the exchange of researchers between the fusion laboratories world wide. (1名)

[7] 今後の研究計画は適切か。特に、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えたものとなっているか。

Is our future research plan proper? Especially, is the perspective of the mid-/long-term plan that was drafted toward the actualization of a desired target value properly taken into consideration?

- 重水素実験の実施、閉ダイバータ化など、更なるプラズマの高性能化に向けた適切な計画が盛り込まれている。重水素実験では閉じ込めが格段に向上することが期待されており、ヘリカル型核融合炉への展望がみえてこよう。この点から高く評価できる。(6名)
- 第1期中期計画での目標は達成される見込みであり、適切である。第2期中期計画に向けての目的も明確であり、計画に対する検討も十分なされており、適切である。(2名)
- 実証炉に向けた展望が開けて来た点とその具体案を示しつつある点で評価したい。(1名)
- 今後の研究の進展に不可欠な NBI, ECH 等の加熱系の進展が着実に計画的に進め

られている。(1名)

- 今後の LHD の増強計画に関しては適切と判断する。ITER へのつながりが今後どうなっていくのかについては、まだ見えてこない部分が多い。(1名)
- 初期のパラメータ達成に向けた加熱機器の増強計画や重水素実験計画は適切である。ただし、これまでの LHD の成果に基づいて、達成目標の再検討(上方修正)は必要ないか。また、加熱機器の増強計画は、これまでに得られている LHD のプラズマ閉じ込め性能や輸送機構の知見による予測に基づいているか。(1名)
- 重水素実験が始まると、多くの実験がこれまでのような形で行えなくなる。特に、プラズマ・壁相互作用に関する研究では試料の持ち出しが難しくなるため、NIFS 内にそれらが取り扱える材料評価用の実験設備を計画的に整えていく必要がある。(1名)
- 炉工学研究、特にブランケット研究を大きく推進させる必要がありこの体制をつくることが重要である。(1名)
- 今後の研究計画については、世界的なヘリカル系コミュニティとの連携を深めるとともに、重水素実験や将来の核融合炉設計に関して若手研究者も交えた議論の活性化をして欲しい。(1名)
- The provided mid-/longer- term plan is very clearly positioned to lead fusion research program in the international scene. (1名)
- Future experimental plans call for (1) facility upgrades to LHD, including additional heating power, and (2) deuterium experiments. Both directions are appropriate in view of the impressive results achieved in LHD so far. (2名)
- The final design and development of the closed helical divertor should be started as soon as possible. It is not necessary to wait with the installation of a closed helical divertor until the clearance for Deuterium operation has been obtained. A closed, heavily pumped helical divertor will be in general of great benefit for LHD operation and performance, as the (pumped) local island divertor has impressively demonstrated already. More ECRH/ICRH heating power would be useful, too, especially for the necessary development of high-power steady-state operation. Finally, the different discharge scenarios should be integrated in order to achieve the different figures of merit simultaneously in the same plasma. (1名)

[8] 上記観点に挙げられているものを除き、平成 16 年度の外部評価で指摘された事項について適切に対応したか。

Besides the above described perspectives, did we properly resolve the issues pointed out in the 2004 Peer Review?

- (1) テーマの設定やその進め方は適切であったか。特に、実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、より良いシステムに成長させることができたか。また、ITER への寄与が明確なテーマを選択したか。

Were the selection of research themes and the research procedures proper? Especially

for the experiments, were the opinions of the NIFS staff and collaborative researchers heard to improve the system? Also, Did we select such research themes that clearly define the contribution to ITER?

- LHD 実験会議の場において所外共同研究者と核融合コミュニティとの議論がなされて適切に進められているのは評価できる。また、研究テーマの設定に関しても要望に応じてテーマ枠の変更を行いながら効率的に進めているのは評価できる。(6名)
- LHD 実験会議を頻繁に開催し密接な連携体制が取られていることは高く評価できる。(1名)
- Web 等で進め方や研究進行・研究内容を公開しながら進めている。(1名)
- 共同研究者の参画がより多くなった。(1名)
- テーマの設定やその進め方を議論する委員会に所外委員も多く加わり改善が見られた。(1名)
- 「実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、より良いシステムに成長させることができたか」という設問に対しては、設問自体の難しさはあるが、前回の記載事項からどの点を改善したのかが良く分からなかった。(1名)
- ITER へ貢献できるテーマとして、計測、理論、閉じ込めなどの研究はトロイダルプラズマの理解に貢献するものであり、この点から寄与している。(1名)
- ITER への寄与に関しては、ITPA 活動とリンクして可能なテーマを選定しており適切に活動しており評価できる。(1名)
- ITER への寄与に関しては、適切な対応がとられていると評価する。(1名)
- ITER との連携を始めており、今後更により明確化されると期待される。大学とトカマクを代表する JAEA との組織上の差異による問題を克服しつつ、着実に ITER 連携を進めていると思料される。(1名)
- 今後さらに ITER への寄与がより具体的になることが望まれる。(1名)
- ITER への更なる積極的な寄与を望みたい。(1名)
- ITER への寄与については、時代の要請はあるものの、意識し過ぎる必要はない。(1名)
- 組織運営としての進め方は合格点。ITER への寄与は未知。というより、LHD のユニークさを考えれば、ITER への寄与はむしろ脇に置いて良い。(1名)
- In the review documents, there are clear explanation for the LHD experimental group formation, flow of execution of experimental program and flow of preparation of LHD experiment. This showed much improvement of selection mechanism of research theme and research procedure over last review period. (1名)
- LHD contributions to ITPA are important because it is very useful to compare tokamak and helical/stellarator results. (2名)
- It must be noted that stellarators form a viable alternative to the tokamak concept; ITER is still an experiment and high-technology research needs concept varieties. In that sense,

the stellarator has an important meaning on its own. (1 名)

(2) 理論・データ解析に関しては、理論・シミュレーションとの連携を強めることにより、総合力をアップできたか。更に、トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たか。

As for the theory and data analysis, did we successfully improve the collective strength by intensifying the collaboration with theory and simulation groups? Furthermore, did we successfully work as the center for the torus plasma theory research in Japan by intensifying the collaboration with the tokamak?

- 理論・データ解析に関しては、理論・シミュレーションとの連携を強めることにより、IDB などの物理課題を解明するとともに、トロイダルプラズマの総合的理解と LHD の高性能化に貢献し、総合力をアップできたと高く評価できる。(2 名)
- できたと思われる。(1 名)
- 総合力のアップは、徐々に達成されつつある。しかし、環状プラズマの総合的理解については奥の深いものがあり、トカマクとの連携を含め、今後のさらなる進展に期待したい。(1 名)
- シミュレーション科学研究部の設置により体制を整備したことは評価できる。総合力がアップしたかはもう少し時間を経ないと評価できない。(1 名)
- トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たと評価できる。今後、引き続き我が国における環状プラズマの理論研究の中核として更に活動を発展していくことを期待したい。(2 名)
- NIFS の理論研究がシミュレーション研究も含め高い成果を上げ、かつ我が国の理論研究の中核であることは間違いない。今後、ヘリカル系の特徴としての電場と輸送の関係の精密な理解、高イオン温度の閉じ込め改善モードや高密度プラズマの内部拡散障壁の機構解明等を通して、より一層 LHD 実験への寄与をしていただきたい。(1 名)
- シミュレーション科学研究部の発足とここでの研究はトロイダルプラズマの理解に大きく貢献している。核融合のみならず、他分野へ波及している研究も実施されている。トロイダルプラズマ理論の中核となっている。適切に対応してきた。(1 名)
- Alfvén eigen mode へのシミュレーション等も行われ、実験との連携も深まりつつある。(1 名)
- トカマクとの連携も適切に対応していると評価する。(1 名)
- 今後さらにトカマクとの連携を強化することが望まれる。(1 名)
- 理論との連携は模範的である。一方トカマク連携が必要かどうか疑問。LHD が予想外に良い結果を生みつつある現在、もっと日本の独自性を主張して良い。(1 名)
- トカマク系の理論研究も進んでいると見えたが、NIFS は主に LHD を駆使した研究で環状プラズマの理論研究の中核となればよいのではないかと。(1 名)

- 理論研究においてトカマクとの連携に関しては、具体的な成果（事実）が不明である。（１名）
- The collaboration efforts of the Theory and Data Analysis Division with the Department of Simulation Science, with the LHD experimental program, and with tokamak research have all been enhanced during the past four years. （２名）
- The NIFS staff is extensively trained on LHD and will be ready to play an important role in the later exploitation of ITER. （１名）

（３） 計測機器の開発は、ITER にも適用可能な先進計測機器も視野に入れ、所内外の研究者と連携してチャレンジできたか。

Did we strive to develop diagnostic devices including such advanced diagnostic devices that might be applicable to ITER while collaborating with researchers in and outside of NIFS?

- ITER にも適用可能な先進計測機器も視野に入れ、所内外の研究者と連携して計測機器の開発を着実に進めており評価できる。（２名）
- 短波長遠赤外レーザーの開発など、LHD の高性能化だけでなく ITER への適用も見越した取り組みは評価できる。このことは高い研究レベルの維持にも重要である。（１名）
- 限定的ではあるが評価できる。重水素実験が実現すればさらに進展すると思われる。（１名）
- DD 実験等は、そのみでも ITER 等の計測器開発・経験の醸成に繋がる計測手法を開拓するために有用だと思料される。（１名）
- 所内外の研究者が実験炉にも適用できる計測技術の向上に努めてきており、適切に対応していると判断される。（１名）
- 断片的ではあるが、中性子計測やレーザー計測技術において ITER にも適用可能な先進計測機器の連携研究が行われており、一定の評価はできるが、もっとシステムティックな取り組みが必要と思われる。（１名）
- 高性能干渉偏光計測や Cotton-Mouton 偏光計の開発に加え第一ミラー光学特性劣化とその対策に関する研究開発などが進められているが、今後は更に精力的な諸内外の研究者との連携による研究活動が望まれる。（１名）
- ITER の各実験フェーズで使用される予定の計測器と建設・組み込みスケジュールも決まりつつある。日本の担当計測器の整理を踏まえて、チャレンジングでかつ実際 ITER に採用されうる計測器の提案・開発計画の策定が必要と思われる。（１名）
- 実験面でも ITER 関連の進展はありと見えたが、やはり NIFS は主に LHD の性能を究極まで引き出すための技術開発で評価されるべきであろう。（１名）
- この設問も ITER を意識しなければならなかった平成 16 年の政治状況を反映しており、答える必要を感じない。ITER に適用可能な計測器の開発など不必要で、

LHD 独自の道を突っ走ってほしい。（1 名）

- There are documented results of short wavelength laser diagnostics for ITER, and study of changing optical properties of retroreflector in ITER-like environment. These efforts are very encouraging for the ITER diagnostics preparation by providing LHD groups expertise and experience. （1 名）
- A new two-color far-infrared interferometer was developed for use on LHD (and possibly on ITER). In collaboration with Kyushu University, NIFS has proposed a polarimeter system for ITER. （1 名）
- Diagnostics development, the physics of three-dimensional toroidal systems, research on turbulence and transport; these research and development areas of NIFS will make a contribution to the international ITER project. （1 名）

2. 3 評価のまとめと提言

2. 3. 1 評価のまとめ

大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において大学共同利用機関核融合科学研究所が責任を有する大型ヘリカル装置 (LHD) 研究の評価に関して、達成度評価及び研究水準の評価を基本として必要不可欠な8つの観点からの評価につき、委員の意見を要約すると以下の様になる。[1]～[4]は、中期計画に記載されている事項で、[5][6]は、関連したものとなっている。

[1] 核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、下記事項を達成することなどにより、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることができたか。

(1) 核融合炉心プラズマを見通すことを目指して、プラズマの高性能化を図ることができたか。

LHD では、設計時において5つの重点研究課題に應えるために必要とされているプラズマ性能の目標が設定されている。これらの目標に対して、NBIの増強、ペレット入射装置の開発など、多くの適切な機器整備が行われ、超高密度プラズマの生成 ($1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$)、 β 値 (5%)、長時間プラズマの維持 (54 min)、中心イオン温度 (6.8 keV) 及び中心電子温度 (10 keV) を達成したことは、核融合炉心プラズマを見通すことを目指してプラズマの高性能化を図る観点から、高く評価できる。

核融合三重積の増大、温度の増大等、高性能化は着実に進展しており、ヘリカル型核融合炉の実現に対する新しいアプローチを提示する視点から大きな飛躍といえる。今後の重水素実験の開始により、更なる高性能化が期待される。

一方、長時間実証実験では、加熱パワーは不十分と考えられ、今後の加熱機器の合理的な整備計画が必要であろう。

(2) 環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を進めることができたか。

核融合炉心プラズマの実現には高温・高密度プラズマを長時間閉じ込めることが必要であり、さらに経済的な炉設計を行うには電磁流体力学的に安定な高ベータプラズマを必要とする。このような視点から、LHD 研究において高密度・高ベータプラズマの閉じ込め研究、圧力駆動型電磁流体力学的不安定性の研究、閉じ込め改善を実現する内部輸送障壁 (ITB) や帯状流 (Zonal Flow) の研究等、環状プラズマの総合的な理解を図る広範な学術研究が、プラズマパラメータの精確な測定を用いて、トカマクとの対比を考慮しつつ進展していることは、高く評価できる。

なお、今後の閉ダイバータによるリサイクリング制御の研究が、環状プラズマ閉じ込めの総合的理解に一層貢献することを期待する。また LHD で見出された不純物ホールのメカニズムの解明及び周辺プラズマ挙動に対する理論・データ解析の強化を期待する。

〔２〕 〔１〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

（１） 加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進めることができたか。

イオンへの直接加熱入力が増大、プラズマ中心への粒子補給及びイオン温度の高精度分布計測等を目的に、低エネルギー垂直 NBI の開発に集中的な投資が行われた結果、高い中心イオン温度の達成や不純物ホールの発見に繋がった。定常射出可能な連続ペレット入射装置が開発され、高密度・高閉じ込め放電の長時間維持実験を可能にした。また、トムソン散乱装置や炭酸ガスレーザー干渉計等の基幹的計測器の高性能化やルーチンの計測の外に、高精度荷電交換分光計測、炭酸ガスレーザーを用いたイメージング干渉計、トレーサー内蔵ペレット法の開発など、プラズマ計測技術を高めてプラズマ挙動の解明に寄与した。これらの加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良は、適切な研究計画とそれを期待通りに実現した研究・開発の成果であり、高く評価できる。

また予定されている重水素実験における加熱系の増強や整備は適切であり、評価できる。今後もプラズマ性能を向上させるために必要な加熱機器の増強と学術研究を推進するための計測機器の開発は必要である。

（２） プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明などを、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進めることができたか。

双方向型共同研究のシステムを活用し、外部に出向いて、極めて活発な、また幅広い共同研究が行われており、多くの成果を挙げている。これらの共同研究の成果は LHD 研究の目標の 1 つである環状プラズマの総合的理解を深めるものとなっており、評価できる。京都大学（Heliotron J）では閉じ込め改善とヘリカル磁場構造の関係の共同研究が、九州大学（TRIAM-1M/QUEST）では高温プラズマ定常化とプラズマ壁相互作用の共同研究及び球状トラスに関わる研究計画が、筑波大学（GAMMA10）ではプラズマ閉じ込め改善の物理機構解明の共同研究が、進展している。これらの共同研究において、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明を一段と加速するよう期待する。

〔３〕 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画を得て

共同利用・共同研究を適切に進められたか。そのために環境を整備することができたか、また、大学の研究発展にも寄与できたか。

一般共同研究、LHD 計画共同研究に双方向型共同研究が加わり、様々なタイプの共同研究に対応できるシステムが整備され、共同利用・共同研究を適切に進められるようになった。このような環境整備は核融合分野が他の分野に先駆けて取り組んだものであり、NIFS と核融合研究コミュニティの一致協力した努力の成果として高く評価できる。年々課題数・研究者数・研究交流も着実に増大し、研究内容も進んでいる。共同研究の運用方法も改善され、大学における研究の自主性の確保と人材教育に大いに貢献している。逆にこれらの制度がなければ大学研究室における基礎研究を維持できない状況にあり、全国の大学におけるプラズマ教育・研究の発展への寄与の観点から、高く評価できる。

核融合以外の分野との連携については、天文学やイメージングサイエンスなどの分野との研究連携も進み、また国際共同研究拠点ネットワークプロジェクトの整備に努めているのは評価できる。今後もこの努力を続ける必要がある。ユーザズオフィスの設置、核融合科学アーカイブズの整備などの環境整備が進められたことも高く評価できる。

〔4〕 COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。

NIFS は高い研究レベルと国際的共同研究の中核機関としての両面で、COE の役割を十分果たしている。特に LHD は国内において重点化装置として位置づけられ、環状系プラズマ研究において国際的な COE としての役割を大いに果たしている。また日米、日欧、日中、日韓等の連携体制を整備し、多くの国際共同研究、国際連携の窓口として、国際的な核融合研究のリーダーシップを発揮している。これらの点から高く評価できる。

〔5〕 他分野へも発信できる学術発信拠点となりえたか。

大規模超伝導コイルシステム、マイクロ波加熱装置、負イオン源技術開発などの成果の応用、LHD で生成される高温プラズマの学術的利用等、LHD 研究で得られた成果の他分野への拡がりが高く評価できる。また関連する学術発信拠点として活動していることも評価できる。理論シミュレーションにおいても、他分野への展開が最近高まっており、興味ある結果が得られている。

また、天文学等の他分野との機構内研究協力も進められており、マスメディアを通じた成果の公開も適切に行われている。ネットワーク拠点としての求心的な存在であり、広範な科学分野にインパクトを与えている。更に、他分野或いは一般社会

への広報に力を入れている姿勢も高く評価できるものである。

〔6〕 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

NIFS の大学院教育は、(1) 総合研究大学院大学物理科学研究科の基盤研究機関の一つ（核融合科学専攻）として、(2) 名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科、北海道大学大学院工学研究科、富山大学大学院理工学教育部との連携大学院、及び(3) 特別共同利用研究員としての他大学の学生の教育委託の 3 つによって行われている。LHD 実験では、この 3 つの人材養成の外に、一般共同研究、LHD 計画共同研究及び双方向型共同研究の展開によって、全国の大学における多くの学生の教育・研究にも貢献している。

総合研究大学院大学の核融合科学専攻としてはこの 4 年間に定員を超える博士号取得者を送り出しており、その 6 割が LHD 研究に関連する課題で学位を取っている。外国人留学生も多く、LHD 実験の教育面での効果と国際貢献は大きい。

また日米、日欧、日中、日韓等の国際連携において、大学院生や若手研究者の海外派遣や、海外の若手研究者の招へいを積極的に行っており、国内外の若手研究者を国際的に活躍できる人材として養成していると評価できる。

更にポスドク枠として数名の COE 研究員を雇用しており、若手研究者の育成に努力しているのは評価できる。

しかし、ITER を視野に入れた国際的に真に活躍できる人材の養成には更なる努力が望まれる。そのためには独自の積極的な人材養成プログラムを持ち、戦略的に取り組む必要がある。

〔7〕 今後の研究計画は適切か。特に、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えたものとなっているか。

第 1 期中期計画での目標は達成される見込みであり、第 2 期中期計画も、重水素実験、閉ダイバータ、プラズマ加熱パワーの大幅な増強が提案されており、中長期の展望を見据えた適切な研究計画になっており、評価できる。重水素実験では閉じ込めが格段に向上することが期待されており、ヘリカル型核融合炉への展望がみえてこよう。実証炉に向けた展望が開けて来た点とその具体案を示しつつある点で高く評価できる。重水素実験の開始に伴い、プラズマ壁相互作用(PWI)に関わる研究のさらなる充実が必要である。

〔8〕 上記観点に挙げられているものを除き、平成 16 年度の外部評価で指摘された事項について適切に対応したか。

- (1) テーマの設定やその進め方は適切であったか。特に、実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、より良いシステムに成長させることができたか。

また、ITER への寄与が明確なテーマを選択したか。

テーマの設定については LHD 実験会議の場において所外共同研究者と核融合コミュニティとの議論がなされ、適切に進められている。また Web 等で研究進行・研究内容を公開しながら、共同研究者の要望に応じてテーマ枠の変更を行い、効率的に進められており、より良いシステムに向けた改善が見られ高く評価できる。またトカマクとの共通性及び相補性の両面を意識した課題を選択することにより、ITER に寄与しており、評価できる。

(2) 理論・データ解析に関しては、理論・シミュレーションとの連携を強めることにより、総合力をアップできたか。更に、トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たか。

理論・データ解析に関しては、シミュレーション科学研究部の立ち上げによる理論・シミュレーションとの連携を図り、トロイダルプラズマの総合的理解と LHD の高性能化に寄与し、総合力をアップしてきており、評価できる。更に、トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たと評価できる。核融合のみならず、他分野へ波及している研究も実施されている。今後、より一層 LHD 実験への寄与と、引き続き我が国における理論研究の中核として活動を発展していくことを期待したい。

(3) 計測機器の開発は、ITER にも適用可能な先進計測機器も視野に入れ、所内外の研究者と連携してチャレンジできたか。

短波長遠赤外レーザー開発、高性能干渉偏光計測、Cotton-Mouton 偏光計やイメージング・ボロメータなどの開発に加え、第一ミラー光学特性劣化とその対策に関する研究開発など、ITER にも適用可能な先進計測機器を視野に入れ、所内外の研究者とチャレンジしており、評価できる。現在計画されている重水素実験等は、そのみでも ITER 等の計測器開発・経験の醸成に繋がる計測手法を開拓するために有用であり、今後、更に ITER への貢献も期待できる。

2. 3. 2 提言

最後に、今後の LHD 研究の進め方に関する提言をまとめた。

(1) 今回の LHD 研究の評価において、現在の LHD のプラズマパラメータは大型トカマク装置と比較・対照できるレベルに到達し、その研究成果には、当初の期待に沿うもの、もしくは期待以上のものがあると評価された。この評価を踏

まえ、第 2 期中期計画においては、加熱装置を増強し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定どおり推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現して欲しい。また、より高密度・高温条件下での定常実験を期待する。

(2) LHD は一般、LHD 計画、双方向型の 3 つの共同研究カテゴリーを有機的に活用して自身の研究成果を上げるとともに全国の大学の研究教育活動の充実・活性化に大きく貢献している。人材養成を含めた今後の共同研究活動の一層の発展に向けて、更なる取組を期待する。

(3) NIFS は既に、核融合分野における世界の COE としての地位を固めつつある。これからは COE に相応しい役割を自覚し、新しい研究に果敢に挑戦する勇気と意欲をもって、今後の LHD 研究を推進して欲しい。その努力の中から、世界に誇りうる LHD 研究の独自性が花開いていくことであろう。更なる飛躍を期待する。

第3章 シミュレーション研究に関する評価

3. 1節では、シミュレーション研究の経緯とこれまでの活動状況について(1) 核融合科学分野におけるシミュレーション研究の位置づけ、(2) 組織改編の効果と意義、(3) 平成16～19年度の研究成果、という三つの観点から述べる。3. 2節では、第1章で掲げた項目にしたがって、各委員から示された評価を集約して記述する。3. 3節で評価のまとめと提言を述べる。

3. 1 シミュレーション研究の経緯とこれまでの活動状況

核融合科学分野におけるシミュレーション研究の位置づけ

核融合は「1億度を超える超高温プラズマ」という未知の物質状態を生成し安定に閉じ込めるといふ科学技術の大きな挑戦である。これまでの基礎研究によって、プラズマの振る舞いを記述するための様々な理論モデル（基礎方程式）が定式化され、核融合炉心プラズマの物理的な理解が大きく進歩してきた。しかし、未来の核融合炉において、どのような現象が起こるのかを正確に予測することは未だ難しい。その困難は主に三つの要因によって構成される。第一に、理論モデルの不完全性、不確実性が残っていること。プラズマは多数の粒子が相互作用しながら集団運動する無限自由度非線形力学系であり、これを巨視的に記述し理解するための「有効な理論モデル」が確立しているとはいえない。実験（数値実験も含む）によって確定すべきパラメタも多く残されている。第二に、炉心プラズマは周辺の諸現象と絡み合った複雑系であり、単純なモデルに還元不可能であること。様々な要因、時空間スケールを統合した全体的な（ホリスティック）モデルは未だ構築されていない。第三に、普遍性と個別性の分離不可能性という困難があること。プラズマを記述する様々な理論モデルは、いずれも強い非線形性をもち、それらの「解」の普遍的な性質を抽出することは極めて難しい。

これら三つの課題は、いずれも〈階層(hierarchy)〉という概念に関心を向けさせる。巨視的な階層での有効な理論モデルを構築することは、マクロとミクロの関係を階層化することに他ならないし、ホリスティックなモデルから有効な知識を導き出すためには、現象を階層化して記述し理解する必要がある。しかし超高温プラズマでは、粒子レベルのミクロな運動がメソからマクロにわたる色々な階層の運動様式（集団現象）に直接的に連結する様々なメカニズムが共存・協働し、階層の分節を難しく（曖昧に）している。そのために、理論の世界で使われてきた〈くりこみ〉の方法が想定する単純化（普遍性と特異性の二分法）は許されない。まさしくここに大規模数値シミュレーションの必要性が喚起されるのであるが、多階層をあつかうことは数値シミュレーションにとっても困難な課題である。これまでの数値シミュレーションは、階層を切断した理論モデルを数値アルゴリズム化して行うものでしかないからである。

階層の問題に数値シミュレーションの手段で挑むためには、数値シミュレーションの方法と技術に革新的改良が求められる。

核融合科学研究所 (NIFS) のシミュレーション研究者は、プラズマにおける〈階層〉の問題を主題に据えて多角的かつ組織的な研究を行っている。こうした研究は、核融合プラズマに関する科学的な予測性を高めるという、核融合研究開発コミュニティにとって最も重要な課題に真っ向から取り組むものであると同時に、核融合研究が他の科学技術分野と協力し、科学技術全般に貢献するものでもある。

組織改編の効果と意義

NIFS は、その創設時からプラズマ研究における数値シミュレーションの重要性を認め、世界的にもトップレベルの研究者集団と研究設備を有してきた。その活動は国際的に高く評価されている。今後 NIFS のシミュレーション研究がより組織的な戦略をもって発展することを期して、平成 19 年度に、理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターをシミュレーション科学研究部に統合する組織改編が行われた。この組織改編は、核融合研究全般の動向及び NIFS における LHD 研究の目覚ましい進展に対応できる体制を整えようとするものである。同時に、大学共同利用機関である NIFS は、核融合分野における学術研究の COE として、大学等の研究者が行っている様々な基礎研究が交流する結節点となる役割も担っている。たとえば ITER や BA といった国際共同研究において我が国の研究者が大いなる貢献をするために、同研究部が積極的な活動を行うことに期待が集まっている。このような要請に応えるために、シミュレーション科学研究部には、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、新領域シミュレーション研究系、及び六ヶ所研究センターの三組織がおかれた。

LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系の研究目標は、環状系磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め物理の解明と体系化である。国内外の大学等との共同研究を行いながら、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトを推進し、現象を予測できるシミュレーションを目指して〈階層繰り込みシミュレーションモデル〉の構築を進めている。また、シミュレーション結果の可視化等に関連した仮想現実研究も本研究系を中心に推進されている。

新領域シミュレーション研究系の研究目標は、核融合科学を広い視点から捉えながらプラズマ物理のフロンティアを開拓することである。具体的には、レーザー核融合の多階層現象及び複雑性プラズマに関する二つのシミュレーションプロジェクトを推進している。

六ヶ所研究センターの役割は、学術研究の立場から ITER 及び BA との連携を推進することである。遠距離広帯域ネットワーク技術等の基盤技術開発を進めている。

平成 16～19 年度の研究成果

NIFS のシミュレーション研究者は、所内の理論研究者と実験研究者及び大学等の

核融合研究者、さらには核融合プラズマに関連する国内外の幅広い分野の研究者と多面的なネットワークを形成し、多くの顕著な成果をあげている。とりわけ以下の成果は特筆に価する。

LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトでは、〈階層繰り込みシミュレーションモデル〉の基幹となるモデル(コアプラズマの運動論モデル及び流体モデル)について計算アルゴリズム及びコードの開発が進んだ。運動論モデルでは、微視的揺動から巨視的構造(帯状流など)が形成されるメカニズムを解き明かすために、高精度ジャイロ運動論的ブラソフコードが開発された。これを用いたシミュレーションによって、帯状流が乱流輸送を制限することが示され、その3次元磁場配位依存性を議論できるようになった。流体モデルには、高エネルギー粒子の運動論効果が考慮され、TFTR等の実験結果をベンチマークできるレベルに到達した。さらに核燃焼プラズマのシミュレーションを目指し、3次元環状磁場配位への拡張、二流体プラズマモデルへの拡張、新しい数値ノイズ軽減手法(全特性曲線法)の開発が進められている。微視的乱流と帯状流の相互作用によって巨視的不安定性が起こることを示したことは、階層連結現象の典型的な例といえる。

レーザー核融合シミュレーションプロジェクトは、高速点火方式による実験計画 FIREX (Fast Ignition Realization EXperiment) を対象とした研究であり、平成17年から大阪大学、摂南大学、九州大学、兵庫県立大学との共同研究によって、放射・流体コード、相対論的粒子コード、及びフォッカープランクコードの結果を統合する Fast Ignition Integrated Interconnecting code (FI³)の開発を行っている。統合シミュレーションにより、レーザー照射の時系列やターゲットの最適設計等で実験を先導する役割を果たしつつある。

複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトにおいては、宇宙・天体物理学や物質科学など、学際的・普遍的な研究領域への展開を目指した大規模シミュレーション研究が行われている。巨視的な磁場構造変化と粒子のミクロな運動が結合する典型的な階層連結現象である磁気再結合現象について、開放系電磁粒子コードを用いたシミュレーションが行われ、磁化から外れるイオンの運動効果が明らかにされた。プラズマ物質相互作用関連では、分子動力学シミュレーション手法を用いたグラフェンと照射水素原子との相互作用や、粒子コードによる高密度領域(ブロブ)の運動シミュレーションなどの新しい研究分野が開かれつつある。

バーチャルリアリティ (VR) に関する研究開発では、ネットワーク利用による VR 装置間の接続、VR と数値シミュレーションの統合環境の構築、VR を使った設計支援環境の構築、VR を用いた核融合シミュレーション結果の簡易可視化、LHD 真空容器内の現実のイメージに近い VR-LHD モデルの作成などが行われている。

これらの研究成果は、シミュレーション研究を〈シミュレーション科学〉として確立しようとする高い目標をもち、〈階層〉を具体的な課題として組織的に取り組んだことによって得られたものである。もちろん、高い目標こそ短期間で容易に達成されるものではない。NIFS のシミュレーション研究者は、「核融合」を真に科学の研究テ

ーマとして捉え、厳密性と一般性をもった新たな「知」を創出すべく努力している。各プロジェクトの中期的な目標やロードマップにしたがった着実な成果とともに、個々の研究者がそれぞれのテーマをいわばライフワークとしてチャレンジしたことによる成果もあった。また新しい学際的分野を切り拓こうという研究もあった。こうした成果や挑戦は、NIFS に、単色的ではない、豊かな多様性をもつ学術的なアイデンティティーを与えることに大きく貢献している。

3. 2 項目別の評価

[1] シミュレーション研究を進めることによって、核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化、更に核融合研究を支える基礎研究としての複雑性の科学の探求等において、世界に先駆けた学術的進展があったか。

By carrying out the simulation research, did we successfully elucidate and systematize the physical mechanism of a nuclear fusion plasma confinement? Besides, did we make such academic scientific achievements that foreran the world in the search for complex science as a basic research that supports nuclear fusion research?

- 実際の磁場閉じ込めプラズマに適用できる高精度数値計算手法を開発し、温度勾配がもたらす乱流輸送や高エネルギー粒子-背景MHD相互作用などでめざましい成果を挙げており、世界的にも高く評価されている。(9名)
- 数値シミュレーションを、「シミュレーション科学」という新しい方法論として確立させようという意欲的な目標を立てて組織的な研究に取り組んでいる。このことを高く評価したい。(2名)
- NIFSのシミュレーション研究者は、理論的にも高い技能と深い学識を有しており、独自の方法論をもってシミュレーション技術の開発に取り組んでいる。具体的なテーマとして、「階層性」が重要な意味をもつ課題群を設定し、それぞれの研究者が様々な角度から研究・開発を行っている。これらの研究の知見と、それを上部階層へと繰り込む手法を開発するならば、その成果は将来様々な科学技術分野で応用される普遍的なものとなると期待される。(4名)
- ヘリカル系を中心とした3次元シミュレーション分野では、世界をリードしている。ここで培った知見や手法・コード群を、ITER への寄与を視野にいてトカマクに応用する事を強く期待する。(2名)
- 核融合研究を支える基礎研究としての複雑性の科学の探求等に関しては、長年の重要課題である磁気再結合研究において論争決着の無衝突物理機構を明らかにした点は特筆に値する。しかし、Predictive Simulation という観点では、更に世界を先導する開拓的成果を期待したいものである。(4名)
- レーザー核融合統合コードをターゲット設計に利用できる水準にまで高めた事は特筆に値する。(2名)
- レーザー核融合におけるペレットアブレーション過程の研究成果を、今回のNIFS 発信として評価して良いかどうかは不明確と言わざるを得ないでしょう(この時期における評価の範囲・定義が本件については不明確と言った方が良いのかも知れませんが)。(1名)
- 非線形MHDシミュレーション研究は二流体理論研究とも連携しながら所定の成果を挙げているが、当該分野の世界的動向を考慮するとともに、高エネルギーMHDや乱流輸送研究とも連携を図りながら研究の方向性を適切に見定める必要があろう。公開を前提にしたMHD共通コード開発は共同利用施設の目的に合致

した新しい試みとして評価できる。(1名)

- 乱流/MHDの多階層シミュレーションは厳密性を期した運動論モデルや圧縮性非線形MHDモデルによる大規模シミュレーションの先行研究として位置づけられ、所定の成果を挙げている。一方、多階層研究は多様な要素研究を含むとともに理論の枠組みも広いこと、大学を中心に同様の研究が進展していることなどを考慮して、プロジェクトの中での目標と位置づけを明確にするとともに、大学等との積極的な連携を進めていただきたい。(1名)
- 周辺プラズマは微粒子の挙動を中心にユニークで系統的な研究が進展している。外部との連携に重きをおいた計画は適切である。(1名)
- 統合輸送コードはプロジェクト推進の観点から研究所が中心に取り組む課題であり、一層の充実が望まれる。複合的な物理現象の解明から運転シナリオの最適化へと発展していくことが期待される。(2名)
- ペレットの多相効果を取り入れたシミュレーション研究に関しては、核融合研究を支える基礎研究結果を得て世界に先駆けた進展があったことを高く評価したい。しかしながら、LHDにおけるペレットの有効な入射法や、炉におけるペレット入射にはまだ貢献してないので、今後のさらなる改善、進展が望まれる。(1名)
- 複雑性における新しい研究分野としてのプラズマ-物質相互作用研究は、今後の核融合研究の重要課題であるのみならず、多くの他分野との学際性を有しており、それへの発信、及び自然科学研究機構連携研究推進の観点でも極めて有用・重要であると言えるであろう。現在は研究開始段階的との評価であり、プロジェクトとしてのゴールが必ずしも明確でないように思うが、今後の発展のために周辺プラズマ研究との連携などを積極的に模索することが肝要と考えられる。(3名)
- The considerable progress that has been made in simulation science at NIFS in recent years is evident. One indication of this progress is the list of publications during the past four years, showing that 233 papers were published, which is excellent. Also noticeable during the past four years is the continued increase in the direct application of simulations to understand and explain experimental results, which is commendable. (2名)
- In the area of magnetic confinement, several examples of excellent work are gyrokinetic-Vlasov simulations of turbulent transport, nonlinear simulations of energetic particle physics, pellet ablation studies, two-fluid macro-instability simulations with incorporation of micro-turbulence effects, development of a very high-resolution MHD code, and edge plasma simulations. In my opinion, the first two of these research efforts are definitely world-class work, and the others are of high quality. (1名)
- Numerous references are adopted in summary on major theoretical achievements at the recent IAEA conference held in Chengdu in 2006. Given these major achievements, now the policy encouraging the clarification of novel scenarios discovered recently at NIFS has to be pursued rigorously and aggressively. This should also contribute to the so

called fast track approach in the pursuit of fusion energy. The extension of it to the helical configuration appears timely and very topical. (1名)

- In the area of frontier simulations, the work on fast ignition simulations for laser fusion and the work on collisionless reconnection are of high quality. In addition, there are smaller research efforts on plasma-material interaction simulations and blob transport simulations. Also, NIFS is a leader in virtual reality simulations by default since I am unaware of any other fusion laboratory in the world that has a program in this area. (1名)
- The simulation studies of super-dense core plasmas and internal diffusive barrier are very relevant for LHD. I also applaud the simulations that are specifically done for understanding the physics of burning plasmas. Compared to four years ago, I am glad to see a number of recent publications related to the NIFS virtual reality system. (1名)

[2] [1] を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

To carry out the perspective [1], did we perform the following?

(1) 組織改編により、集約的研究成果を生み出し柔軟かつ有機的な運営が可能な研究基盤が整備されたか。

Through the organizational change, did we properly arrange the research platform that is capable of generating intensive research results and also capable of flexible as well as organic operation?

- LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、新領域シミュレーション研究系、及び六ヶ所研究センターから成るシミュレーション科学研究部を創設したことにより、NIFS が有する人的・ハード的リソースが統合・組織化された点は、今後の発展を図る上で大変有意義であると言える。(9名)
- その上で所内及び国内との共同研究を含めた形で進められている3つのシミュレーションプロジェクトは、それぞれの研究テーマが明確であって評価でき、今後集約的研究成果を生み出す基盤となることが期待される。また、研究プロジェクトは、研究の進展に合わせて柔軟に組織を再構成することが容易であり、有機的な運営が可能と考えられる。(1名)
- シミュレーションによって具体的な事象を説明すると同時に、方法論を地道に開拓し、また人材育成を行ってゆく必要がある。前者のためには組織的なプロジェクトを推進することが有効であるが、後者はいわば各研究者のライフワークとして自発的かつ長期的に研究を行うことができる環境が必要である。(1名)
- 従来の「実験」や「理論」という区分けとは違う、新しい分野として「シミュレーション科学」を位置付けようという試みは大変チャレンジングである。これが「第三の道」としての地位を確保できるかが、今後の試金石となろう。「実験」や「理論」との良い意味での差別化・競合を期待する。(1名)
- 核融合プラズマの多階層性研究をプロジェクトの中心に据える計画は学術的で

あり、広い分野をカバーするように組織も論理的によく検討されているが、集約的成果を生むためには更なる柔軟な対応が必要のように思われる。(1名)

- コア・周辺、運動論・流体モデルの全領域を現有メンバーでカバーするのは困難であるように思われる。課題が多岐に渡るため、大学との役割分担を前提に、今後、競争力が高い研究にある程度の集約は必要になるように思われる。(1名)
- 磁気リコネクションはプラズマ・核融合研究全体に及ぶ基礎概念であることから、横断的な連携・協力が期待される。(1名)
- レーザー核融合研究は、プロジェクトを構成する各々の素過程は基礎研究の色彩が強いことから、基礎プラズマ研究のグループを中心にレーザー核融合に関与する雰囲気醸成するとともに所内連携を一層図り、集団的な協力体制で研究をカバーする必要があるように思われる。(1名)
- 複雑性プラズマシミュレーションのプラズマ・物質相互作用やBlob輸送などは、周辺プラズマやレーザー核融合などに貢献できる可能性があることから、連携体制を検討していただきたい。(1名)
- 次世代スーパーコンピュータによる大規模シミュレーション研究をさらに発展させるためには、人材育成が重要であり若手研究者組織を拡充しプロジェクト的な研究体制を引き続き整備する事が望まれる。とくに、他分野との連携の窓口となる新領域シミュレーション研究系の体制の整備が重要である。(1名)
- 作業班の活動も組織としては不可欠なものであり、技術職員への期待も大きい。ただ、作業班への研究者の関与が研究者にとって大きな負担となることが心配され、これが過度の負担とならないような配慮がなされることが望ましい。(1名)
- 計算機及びネットワークの業務については、作業班という形で分担されることになったが、専門的な知識を必要とする部分の責任体制を明確にすることが望まれる。(1名)
- バーチャルリアリティなど、シミュレーション研究環境を支える組織体制をもう少し確固たるものにしていく必要がある。(1名)
- Several significant changes in the NIFS organizational structure have occurred in recent years. The effect of these changes has been positive. (1名)
- The organizational change has strengthened the ties with the experimental work carried out at the LHD device. (1名)
- Three simulation projects have been started, and also the direction of research has been clarified. By developing predictive hierarchy-renormalized simulation codes, each purpose will be achieved in future, which leads to the establishment of the simulation science in a new interdisciplinary capacity. (2名)

[3] 大学共同利用機関法人として、大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用した大学等との共同研究及び連携を積極的に推進し、シミュレーション研究の展開に貢献できたか。

As an inter-university research institute, did we actively promote the collaborative

research and research collaboration with universities that utilizes an analysis device for the large-scale simulation research (a plasma simulator) and the like? Also, did we contribute to the development of the simulation research?

- 日本全国の多数の大学研究者が共同利用研究として NIFS の大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用して多くの成果をあげており、日本におけるシミュレーション研究の展開に多大なる貢献をしている。（8 名）
- 大学や研究機関の多くの研究者が積極的に NIFS の計算機リソースを有機的に活用できるよう、より一層努めてもらいたい。プラズマシミュレータなどを利用した大型シミュレーションでは、NIFS に長期滞在しての研究が必要となろう。実験装置のように、より広く門戸を開放する必要がある。（2 名）
- 大型シミュレーション研究用解析装置の運用形態の変更により、大学等からの利用環境は改善され、共同研究が促進されるようになった点は評価できる。（1 名）
- 大学等との連携を積極的に取り入れたプロジェクト研究体制の導入により、大学等との連携に基づくシミュレーション研究のさらなる展開が期待できる。（1 名）
- 現計算機システムの一刻も早い高速化が望まれる。（1 名）
- レーザー核融合シミュレーション分野の FI³ 研究は、大阪大学と NIFS との有機的な連携が効果的に進んでいる点であり評価できる。（1 名）
- シミュレーションを中心に据えた双方向的な共同研究の推進や様々な研究をリモートに行う多様な共同研究を模索する観点から、関連大学・機関とのネットワークの相互通信など、先進的な情報科学の推進が重要な課題となろう。セキュリティに十分に配慮しつつも、シミュレーションデータの共有や画像の遠隔操作など、ネットワークを介した様々な使用形態や自由度をなるべく付与する方向で検討いただきたい。（1 名）
- The department of simulation science has carried out high quality work as an inter-university research institute. （1 名）
- The Department of Simulation Science actively participates in the Japanese modular integrated code development project called TASK. This is an excellent example of inter-university research collaboration with a national scope. （1 名）
- Another good example is the research collaboration on integrated simulations of implosion dynamics, laser-plasma interactions, fast electron transport, and core heating in laser fusion. This effort at NIFS is carried out through a Bilateral Collaboration with Osaka University. （1 名）
- The inter-university collaborative nature of the three main simulation projects at NIFS is clearly evident from the organization chart for these projects, which shows that scientists from the Department of Simulation Science work hand-in-hand with simulation scientists from the LHD Theory and Data Analysis Division and with simulation scientists from outside universities and laboratories (both in Japan and elsewhere). （1 名）

- The board governing large simulation projects is charged with duties of allocating CPU time according to the LHD and NIFS priorities. Yet, there is some room for improvements and further investment in order to upgrade and refine already existing computers and their infrastructure. This is the subject of the highly desirable increase in funding of NIFS and its activities. (1 名)

[4] COEとしての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にもCOEとしての役割を果たすことができたか。

Did we successfully play a role as COE? Moreover, did we also play a role as COE in a global sense through international collaborative research and contributions?

- 優秀な数多くの研究者集団による最先端の研究成果を挙げている点に止まらず、プラズマ・核融合分野におけるトップクラスの高速計算機の導入・運用を図っており、国際会議やワークショップを主催・運営するなど、国際的な COE としての役割を十分果たしており、評価できる。今回の評価対象期間に発表された 285 件のオリジナル論文の内、85%が共同研究によるものであり、共同利用機関として十分な役割を果たしている。(10 名)
- ITER 及び BA に大学の研究者が参加するための窓口としての役割を期待する声があり、今後検討を期待する。とくに BA で行われるシミュレーション研究において、我が国で開発・整備されたプログラムやアルゴリズムが国際標準として用いられるよう組織化された努力が必要であり、NIFS のシミュレーション科学研究者の活躍に期待が集まっている。(3 名)
- 外部の多くの共同研究者を巻き込んで研究が進められており、その努力に敬意を表する。NIFS が拠点となり成果をあげると同時に、大学や他の研究機関で、世界と競争できるグループの増加が求められる。多数の副拠点が構築され競争と協力のバランスのとれた共同研究体制の実現を望む。(1 名)
- NIFS is the best known Japanese centre in fusion studies abroad. Therefore, there is a lot of interest in the world to visit NIFS and to contribute to its excellent facilities. (1 名)
- NIFS has been functioning successfully as a Center of Excellence for simulation science. (1 名)
- NIFS functions as a **center** for simulation science, as evidenced by the following:
 - The Department of Simulation Science has a “critical mass” (21 professional scientists), and its size allows it to tackle a broad range of inter-related research projects.
 - The Department of Simulation Science addresses research projects in a synergistic manner. In other words, there is clear evidence of collaborative work among the scientists in the Department, and the Department addresses difficult problems that require a team effort.
 - NIFS research efforts in simulation science are central to inter-university

collaborations that extend throughout Japan.

- NIFS simulation research is also centrally engaged in collaborations that extend around the world. NIFS has an active personal exchange program, both in hosting guest professors and researchers at NIFS and in sending NIFS scientists abroad.
- The NIFS computational facilities provide super-computer cycles for simulations performed by researchers at other laboratories and universities.
- NIFS is the largest user of the SINET3 high-speed network that comprises a virtual laboratory for fusion research in Japan.
- NIFS has played a central role in organizing and hosting a large number of national and international conferences related to simulation science (15 during the past four years). For example, NIFS organized the 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (July 2005). (1名)
- The **excellence** of the NIFS simulation research is evidenced by the following:
 - NIFS simulation scientists have been selected for numerous invited talks at prestigious international conferences (e.g., three oral invited talks at the 2004 IAEA Fusion Energy Conference in Portugal and one invited talk at the 2006 IAEA Fusion Energy Conference in China). Another outstanding example is the invited review talk on zonal flow physics at the 2006 APS Division of Plasma Physics Annual Meeting (the first review talk ever given by a scientist from Japan at this meeting).
 - NIFS simulation scientists have an excellent publication record: 37 papers in 2004, 35 in 2005, 87 in 2006, and 74 so far for 2007. Note that the number of publications has been double in each of the last two years compared to what it was before that.
 - The computational facilities for simulation research at NIFS are excellent. The LHD Numerical Analysis System was updated two years ago, and the Plasma Simulator will be replaced in 2009. (1名)
- The department of administration provides excellent support in terms of housing, travel and instructions. Seminars and less formal discussions are held quite frequently. (1名)
- One can think of further improvement in terms of increasing the budget in order to enhance the input from abroad. (1名)

[5] 自然科学研究機構内分野間連携等を通し、他分野へ発信できる学術発信拠点となり得たか。

Through the interdisciplinary collaboration within the National Institutes of Natural Sciences, did we successfully function as an origin for the academic scientific transmission that can also transmit to the research fields other than nuclear fusion?

- プラズマ・核融合の分野が学際的な発信力をもつために、理論・シミュレーション研究が果たす役割は極めて重要である。NIFS では、宇宙・天文分野との連携・協力をはじめとし、積極的な活動が行われており、その活動は評価できる。(9

名)

- 今後は、より広範な機構間の連携、例えば情報・システム研究機構や宇宙航空研究開発機構など、他の法人とも連携し、さらに一層の学術の発信に努めることを期待する。(1名)
- 分野間連携は幅広いスコープや広範囲の知識を必要とすることから、当該分野における大学等の外部の研究活動との一層の協力が望まれる。(1名)
- プラズマ・核融合分野には高いレベルの膨大な研究の蓄積がある。これを他分野の研究者が理解できるような形で発信できるようになることを期待する。(1名)
- 連結階層シミュレーションは核融合プラズマ分野に限らず、より広範な学術分野を包含するシミュレーション科学の中心的課題の一つであろう。NIFS で培ったこれまでの経験と実績を基盤として、連結階層シミュレーションに関連した学術発信拠点を目指して欲しい。特に連結階層シミュレーションでは、そのシミュレーション結果と同時に、連結階層に必要な新しい手法の構築が強く求められよう。(1名)
- リコネクション物理や分子動力学のシミュレーションでは自然科学機構内の分野間連携を意識して積極的に推進しており、その点は評価できる。ただし学術発信拠点到までには至っていないと思われるので、より一層の努力を期待する。(2名)
- プラズマ物理を基盤とした他研究分野への貢献は大いに評価できるが、分子科学、生理学、基礎生物学など、もともとプラズマ科学と関わりの薄い研究分野との連携はこれからのように見受けられる。これらに対しては、サイエンスそのものというよりは、シミュレーションの計算手法など方法論的な側面からの連携、協力が進められていくものと期待される。(1名)
- 分野間連携はまだ緒に就いたばかりであって、学際的共同研究は長い目で見て育ててゆく必要があり、早急な評価は困難と考える。いずれの課題においても相互作用が深まりつつあることは理解できた。(1名)
- The promotion of inter-institute (NINS) collaborations will be materialized in a program named “Hierarchy and Holism in nature” in envisaged collaboration project aimed at a development of new fields. Also, the project on “Development of non- equilibrium quantum physics” has been initiated. These are important first steps enhancing the impact of fusion research on other fields of research pursuit by NINS. (1名)
- Two examples were cited of interdisciplinary research (via the National Institutes for Natural Science): one is the study of gravitational many-body system, and the other is the study of non-equilibrium plasma/matter physics (e.g., temperature- gradient quantum Nernst effect). Both of these investigations are presumably still in their initial stages. (1名)
- It is significant that NIFS is providing leadership in organizing the International Symposium on Hierarchy and Holism (Feb 2008) through the National Institutes for Natural Science. This will provide an important opportunity for the initiation and

enhancement of interdisciplinary research projects. (1名)

[6] 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

Did we successfully contribute to the fostering of human resources who would play an active part in an international situation?

- 個々の研究者は、夫々の分野で大変優れた成果を挙げており、世界的に高く評価されている。これは優秀な若手研究者が継続的に採用されていること、研究所内でのセミナーや学術的議論が自由闊達に行われていること、良い意味での研究者間の競争がなされていること、などに起因している。これも一重に、適正規模の研究者集団が最先端の計算機を比較的自由に使える環境にあるからとも言えるので、今後もこのような体制や雰囲気を持続・発展させることを期待する。(9名)
- 夏の学校を開く等、人材育成の取組みを高く評価する。あえて言うならば、若手研究者の育成は急速な計算機の大規模化に対応するため重要課題であり、大学院生の確保にさらに努力するとともに、特任研究員等を含む若手研究者組織のさらなる整備が望まれる。(1名)
- PDや若手研究者が育成される場としてNIFSの役割は極めて重要である。今後も国際的に開かれた研究の場を創造し、核融合研究の長期的な発展を支える人材育成のための具体的なプランをコミュニティに提示してもらいたい。(1名)
- 学生を含む人材の養成にあたっては、大学の教育活動などとの連携も望まれる。(1名)
- 大学院教育という側面においては、学位取得者の数は研究所の規模と比べて少ないようにも見える。(2名)
- 報告されている限りでは、大学院修了あるいはCOEで育った人数が少ないように見えるが、これは当人の能力・素質の要素もあり、問題ではないと判断する。(1名)
- 国内の核融合シミュレーション分野における若手研究者の大部分がNIFSに所属しており、その人材育成はきわめて重要である。若手研究者の国際的な活躍の場を広げるために、国際会議等への海外派遣を促進すると共に、日米協力や日欧協力による中長期的な派遣を有効に利用することが望ましい。(1名)
- NIFS has an active education and training program for graduate students and young researchers. Within the Graduate University for Advanced Studies, it functions as the Department of Fusion Science and teaches its own graduate students. Also, through cooperative degree programs with other universities, it offers courses and degree programs to students. In addition, graduate students from other universities carry out thesis-related research at NIFS through collaborative research projects. (1名)
- NIFS is determined to support a young researcher on top of its ability. Excellent facilities such as Plasma Simulator, Virtual Reality systems, LHD numerical analysis system are at

- full disposal of a young scientist technically supported by NIFS permanent staff. (1名)
- NIFS operates an annual Asian Winter school (Toki Lectures on Simulation Science) through the Graduate University for Advanced Studies. It also runs the Summer School for Young Students. (2名)
- Through the Graduate University for Advanced Studies, NIFS graduated eight Ph.D. students during the period 2004-2006. Three of them were international students. I recommend keeping a record of where the NIFS simulation science Ph.D. students become employed after graduation. (1名)
- NIFS has a postdoctoral program. During 2004-2007, three young scientists who had been postdoctoral fellows in the Department of Simulation Science (one supported as a COE researcher and another as a JSPS Fellow) were hired onto the regular staff. (1名)
- It would be unfortunate if the mobility of university graduate students to do research at national laboratories (such as NIFS) were to be hampered as a result of the new status of Japanese national universities. These are excellent opportunities for students to acquire broadened experience and exposure. Hence the NIFS plans for enhancing student mobility by increasing the number of affiliated universities (including foreign universities) are commendable. (1名)

[7] 今後の研究計画は適切か。特に、中長期的な展望を見据えたものとなっているか。

Is our future research plan proper? Especially, is the perspective of the mid-/long-term plan properly taken in consideration?

- シミュレーション科学を確立するという大きな目標を置き、階層性に注目するという具体的なテーマを設定した研究計画及びロードマップを立てている点は高く評価できる。(9名)
- 敢えて難を言えば、以前行った評価の際と比べると、シミュレーション研究がLHD研究に少しシフトしすぎている感がある。また組織改編で、「シミュレーション科学研究部」と名付けられた割には、シミュレーション研究が持っているその幅広さ、複雑性科学研究の比重が少々軽くなってきている趣がある。LHDなど具体的な装置における核融合研究は非常に重要な研究ではあるが、同時に、広い学術分野への発信・貢献を今後も強く推し進めていただきたい。(1名)
- ニューメリカル炉を目指した階層統合シミュレーションのロードマップを作成したことは評価できるし適切である。また、ニューメリカル炉のプロジェクトの遂行を設定した中長期的展望は評価できるし、大いにやってほしい。ただ、大規模シミュレーションも行いながら、ニューメリカル炉のプロジェクトを推進させることができるだけのマンパワーがあるのか気がかりである。また、非常に少ない人員でこのような幅広い評価に耐え抜いていることは賞賛に値する。(1名)
- 六ヶ所研究センターを設けて、ITER・BA活動との強い連携を目指している点は

理解できるが、ITER との具体的な連携に関しては、殆んど見えてこない。まさに器を作ったところに止まっている。今後は、ヘリカルに限らず ITER や BA に関連した具体的な研究テーマを積極的に取り上げ、組織的に貢献することを強く期待する。(2名)

- 多階層性研究をキーワードに据えた研究方針は学術的であり、時代のトレンドではあるが、多くの要素を含み広範囲の知見を必要とすることから、プロジェクトとして適切か必ずしも定かではない。今後、これまでの要素研究ももとに多階層を見据えた結合(コアと周辺、運動論と流体など)を進めることになるが、今後の進展が期待される。そのためにはプロジェクト間の連携や交流を一層強化するとともに、外部の知見や協力研究を積極的に取り入れることが重要になろう。(1名)
- Nonlinear、 non-equilibrium、 open系のシミュレーション研究というアイデンティティは、確かにそうであるが、「だから難しい」と同時に「だから面白い」という側面が十分アピールしていないように思われる。(1名)
- 米国のSciDACで成果を上げているように、計算科学との連携を視野に入れた研究計画が望まれる。(1名)
- For future research directions, the Department of Simulation Science will continue to pursue existing successful research projects. In addition, it will focus on some new initiatives, such as simulations for LHD deuterium experiments and also simulations for a proposed helical fusion reactor. The latter simulation project is referred to as the LHD Numerical Test Reactor (LHD-NTR). Both of these new initiatives are appropriate and should provide critical information to the NIFS experimental program for its strategic planning and future operations. (2名)
- One suggestion is that the fusion test reactor studies should involve not only plasma physics simulations, but also fusion engineering simulations. I would also encourage consideration of the use of computer clusters, which are highly efficient for certain types of simulation problems and for code benchmarking, and which are relatively inexpensive. (1名)
- In a long run the complex plasma simulation project attempts to apply their research to fusion research and will contribute to LHD-NTR gradually. Yet, this process cannot be too slow. The challenge toward the establishment of simulation science as a new academic field as well as for the development of LHD-NTR will be reflected in the next mid-term plan starting in FY2010. (1名)
- The two purposes of simulation research at NIFS are to contribute to the understanding of plasma behavior and to promote simulation science as a new interdisciplinary field. For the latter purpose, it would be useful to establish contacts with specialists in computer science at other universities and laboratories. Such contacts can be helpful for the development of advanced algorithms for plasma simulations. The SciDAC fusion

simulation projects in the US stress the usefulness of such contacts. (1 名)

[8] 上記観点に上げられているものを除き、平成16年度外部評価及び平成17年度組織検討委員会において指摘された事項について適切に対応したか。

Besides the above described perspectives, did we properly resolve the issues pointed out in the 2004 Peer Review and the 2005 Organization Review Committee?

(1) LHD・磁場閉じ込めプラズマ、レーザー核融合プラズマ、複雑性プラズマの各プロジェクトによるテーマ設定、研究の進め方は適切か。

Were the selection of research themes and procedures by a respective project for the LHD/magnetic field confinement plasmas, laser nuclear fusion plasmas, and complex plasmas proper?

- LHD・磁場閉じ込め分野では階層拡張・階層統合シミュレーション、レーザーに関しては FI³、複雑性に関しては分野間連携、などに力点を置いてテーマ設定している点は適切であり、今後もこれらの研究を精力的に推進してゆくことを期待する。(9 名)
- 複雑性プラズマにおいては、もう少し広い観点から研究を進める必要があるのではないかと考える。この分野を、もっと強力に進めていくことを切望し、そのために、より広範な連携を進めていくことを期待する。(1 名)
- レーザー、及び複雑性プラズマプロジェクトにつき一層重点的に取り組む体制の整備が望まれる。(3 名)
- FIREX 計画に係る先導シミュレーション研究における NIFS 専任のシミュレーション研究者の関わり具合が私にはまだ良く見えてきていないようである。(1 名)
- 複雑性プラズマにおけるグラフィットについては、分子研との連携も視野に入れながら、ポテンシャルの取り扱い等も含め、実在系に対する高度なシミュレーション手法の確立が望ましい。(1 名)
- The issues pointed out in the 2004 Peer Review and the 2005 Organization Review Committee were taken into account properly enhancing activities in all three seemingly diverging fields quite significantly. The choice of sub-projects within these three main simulation projects has been appropriate. The increased emphasis on simulations for the LHD experiment has been especially commendable during the past four years. (2 名)
- The reconnection studies have achieved impressive resolution of underlying physics. Now these studies should also develop more contact with experimental results (e.g., to validate the theoretical models against observations of reconnection and substorms in the Earth's magnetotail, coronal mass ejection, and magnetic reconnection in laboratory experiments). (1 名)
- The work on integrated laser-target simulations with PIC, Fokker-Planck, and fluid codes has likewise been impressive. It would be interesting if these integrated simulations could provide positive feedback to the integrated simulations for magnetic confinement,

and vice versa. (1 名)

(2) ITER 及び BA への寄与が明確な研究テーマを設定し、体制を準備しているか。

Did we select such research themes that clearly define the contribution to ITER and BA and prepare the appropriate environment?

- 燃焼プラズマのシミュレーションに取り組む等適切にテーマ設定がなされている。(2 名)
- ITER 関連の研究テーマの一つとして、TAE 研究は ITER に大いに貢献しており高く評価できる。(4 名)
- ただしもっと多くのテーマを取り上げるべきであるとも言える。(1 名)
- 本格的な寄与をするためには多数の人材が必要であり、どのような体制で臨むかは今後も検討されるべき事柄である。(1 名)
- ITER 及び BA は開始されたばかりのプロジェクトのため今後の展開が望まれる。(1 名)
- ヘリカル炉への取り組みがまだ遅れているのに、ITER 及び BA への寄与が明確なテーマを優先的に設定しなければいけないとすることには違和感を覚える。ヘリカル炉についてまず真剣に取り組めば、ITER 及び BA への寄与は自然に可能になるであろう。(1 名)
- 3 次元磁場閉じ込めシミュレーション LHD-NTR の研究と 2 次元シミュレーションベースの ITER の研究とを学術的に相補的基盤を有するものと考えて、また近未来の NIFS と六ヶ所のスーパーコンピュータの稼動時期や性能等を見据えた上で、研究テーマ設定と体制準備を行おうとうとしていることは評価されて宜しいと思われる。(1 名)
- 六ヶ所研究センターを開設するなど連携協力の体制を整えていることは高く評価される。(1 名)
- ITER 連携推進室や六ヶ所研究センターを設けて、ITER への貢献に努めている点は評価できる。ただし専属の研究者・技術者が少ない点なども含め、まだまだ「器を作っただけ」で、研究としては十分機能していない。六ヶ所研究センターの情報インフラ、人員配置について、大まかでも良いから早期に将来計画を立てる必要があるのではないか。(3 名)
- BA については、2012 年の計算機シミュレーションセンター運用開始に向けて磁気核融合シミュレーションコードの組織的開発を進めることが当面の重要課題である。炉工学に関するシミュレーションについても、情報収集ならびに連携を図る体制を構築することが望ましい。六ヶ所研究センターの役割については、計算機シミュレーション・ネットワークに限定することなく、炉工学関係を含めることも検討することが望ましい。(1 名)
- シミュレーションコードのグローバルスタンダードに我が国独自の貢献ができ

るような長期的・組織的な戦略が必要であろう。(1名)

- 若手のキャリアパスとしてアピールできる明確なビジョンや計画が示される必要がある。(1名)
- The governmental decision on priority in 2003 defines clearly that the role of JAEA is to research for the development of fusion reactors mainly using ITER and the NIFS role is to advance related academic research. Another important research objective of DSS at NIFS is to develop LHD-NTR, a three-dimensional magnetic confinement simulation code, which includes the research of Tokamaks like ITER as a special case. Thus, studies of LHD-NTR and ITER are inseparably related from a scientific point of view. The Rokkasho Center will be utilized under the policies mentioned above and considerations with regard to time sequences of operation schedules of the available super computers. (1名)
- The internal structure of the new Department of Simulation Science has served to increase the emphasis on research for ITER and Broader Approach. The most obvious new development here has been the recent establishment of the off-site Rokkasho Research Center. The creation of this Center is strategically laudable. (1名)
- Moreover, within the magnetic confinement division of the Department of Simulation Science, the work on gyrokinetic simulations for ITG and ETG turbulent plasma transport (some of which was performed on the Earth Simulator computer) and the work on energetic particle simulations for burning plasmas are clearly relevant to ITER. (1名)
- Programmatically, the Department of Simulation Science is involved in a number of ITER-related collaborations, which it promotes through an ITER Collaboration Committee, an ITER Research Coordinating Group, and an IFERC Project Committee. Also, NIFS simulation scientists participate in ITPA Topical Group meetings and helped write the “Progress in the ITER Physics Basis” (a massive document that was recently published in the Nuclear Fusion journal). NIFS simulation scientists participated in the first ITER Summer School (France, 2007) and will also certainly participate in the second such summer school (to be held in Japan in 2008). (1名)

(3) 研究及び計算機環境の進展を配慮し、共同利用の観点を踏まえつつ、大型シミュレーション研究用解析装置の構成を検討し、運用計画を立案しているか。

While considering the development of research and computer environment as well as the perspective of inter-operation, did we work on the constitution of an analysis device for the large-scale simulation research? Then, did we make plans for its operation?

- 外部共同研究者の視点を入れて装置構成や運用がなされており、高く評価できる。(8名)
- スパコン利用に関する共同研究の透明性を高める努力は評価する。(1名)

- 作業班を組織し、共同研究者の意見を反映させたベンチマークコード群整備の活動は評価できる。(2名)
- 大型シミュレーション研究用解析装置の運用形態については、ジョブ区分の簡素化等によって、共同利用により配慮された改善が進められていることは評価できる。今後さらに、簡素でありかつ合理的な運用形態を目指すことが望まれる。(1名)
- 共同研究の観点からは、スカラー並列がほとんどを占めている大学の計算環境から大幅なコードの変更なしに性能を発揮できる、シームレスな連携が可能な計算機システムが望まれる。次期計算機システムの選定に期待するところは大きい。(1名)
- 当面の計画は概ね評価できる。しかしながら、スーパーコンピュータのアーキテクチャは2~3年後あたりに大変革期を迎える可能性が高い。単にリプレースを重ねるのではなく、予算と時期、政治的情勢を見極めながら、その構成を考えていくべきであり、それを見極められる人材配置も重要な課題であると考え。また、極論するならば、天文台、分子研、核融合研による統合的なシステム、更には、ITERのBAインフラも見据えた構成を考えるべき時期に来ているのではない。自然科学研究機構という組織体系を、コンピュータシステムという汎用的インフラの面からも有効に生かすべき時期が来ていると考え。(1名)
- Simulation collaborations are actively promoted by developing open MHD source, benchmark suite project for fusion-related simulations, and organization of working groups on computer and network infrastructures. By developing predictive hierarchy-renormalized simulation codes, many goals will be achieved in future. (1名)
- Firm plans have to be established by considering also the convenience for collaborators at universities, once the specifications of the ITER-BA computer and other research facilities become clear. The Rokkasho Center will be utilized under the policies to be worked out in future and considerations regarding super computers available at the time. (1名)

(4) 可視化やバーチャルリアリティシステムの成果を公表・発信し、成果の幅広い波及、連携研究に努めているか。

Did we disclose and transmit the research result for the visualization and virtual reality system to widely spread research results and promote research collaboration?

- 高い成果をあげていると評価する。(1名)
- 最先端のバーチャルリアリティシステムを導入・運用し、LHDの運転・実験、シミュレーション結果の可視化などにおいて大いに成果を挙げている。ただしそれ以外の分野に広く活用を図ってもらうべくユーザー数を増やす努力が弱い。(2名)
- 多くのシミュレーション研究成果はデータの可視化に力を入れて発表されてお

り、評価できる。仮想現実的可視化については基礎的な研究が着実に進められているが、核融合シミュレーション結果への適用はまだその範囲が限られている。

(1名)

- 仮想現実的可視化研究については、企業との共同研究に留まらず、3次元データ形式やインターフェースの共通化・標準化とその公開を進めることが、共同研究への波及や連携研究の発展の観点から望まれる。(1名)
- バーチャルリアリティシステムの成果全体は評価できる。しかしながら、組織体系として非常に脆弱な面を持っている。バーチャルリアリティによる研究成果は、学術研究という側面だけではなく、情報発信として多分に政治的側面も有している。人材的な面での強化策を積極的に考えるべきである。(1名)
- 所定の成果を得ているが、これらの先進装置は外部からの使用が必ずしも容易ではない。当該分野において多様な使用形態のもとで連携研究を積極的に進めるためには、ネットワークの相互通信が一層重要になる。今後ネットワークの高速化やハードウェアやソフトウェアの格段の進展などを考慮しながら、様々な先進可視化を含む様々な計算機資源のリモートでの積極的な使用を可能にする取り組みを積極的にしていただきたい。(1名)
- バーチャルリアリティ、可視化が研究にどのように役立ったのかについて、もっと強い主張があってもいい。(1名)
- 可視化はシミュレーションに不可欠の技術であるが、その科学的な地位は、まだ理解のための補助的な手段という域を出ていない。単に技術開発を競うだけではなく、シミュレーションにおいて結果の representation (表象) がいかにあるべきかを深く考察する研究も必要であろう。(1名)
- 今後さらに炉設計ともさらに連携を強めて、炉の保守、点検、管理の思想を先導するエンジニア部門としても活動できるべく、技術部との連携も必要であろう。(1名)
- The researches on Virtual Reality (VR) are extended from stand alone VR system to a VR system communicating with other VR systems, leading to wider applications in various fields. This has to be judged as a major achievement by all international standards. (1名)

3. 3 評価のまとめと提言

3. 3. 1 評価のまとめ

項目別に評価を総括すると、以下のようにまとめられる。

〔1〕 シミュレーション研究を進めることによって、核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化、更に核融合研究を支える基礎研究としての複雑性の科学の探求等において、世界に先駆けた学術的進展があったか。

磁場閉じ込めプラズマの様々な実験データを説明し、さらに核融合プラズマの基本的な特性を予測できる高精度数値計算手法を開発し、多くの成果をあげている。これらは、300件近いオリジナル論文として発表されており、また2006年のIAEA核融合エネルギー会議のサマリーで多くの成果が引用されている。これらのデータは、NIFSのシミュレーション研究が国際的な場で極めて重要な貢献を行っていることを客観的に裏付けている。とくに、プラズマ乱流・構造形成に係るジャイロ運動論効果、高エネルギー粒子の非線形挙動、2流体効果などを高精度でシミュレーションしたこと、高分解能電磁流体力学（MHD）、ペレットアブレーション、プラズマ―物質相互作用などで成果をあげたことは極めて高く評価される。これらはいずれも核融合プラズマの「多階層性」という本質に迫る研究であり、トカマクやレーザー核融合も含めた核融合の様々な領域で極めて重要な意味をもつ。同時に「シミュレーション科学」という新しい科学の地平で核融合プラズマ研究の存在感を際立たせる先駆的な研究成果である。NIFSのシミュレーション研究者が、シミュレーションを科学の新しい方法論として確立しようという高い目標をもって研究に取り組んだ成果として高く評価される。

統合輸送コードの開発においては、大学等との積極的な連携のもとでNIFSが先導的な役割を担うことが期待される。高速点火や周辺プラズマ、プラズマ―物質相互作用といった複雑性・多階層性の研究は世界に先駆けた意欲的な研究であり、今後の核融合研究の重要課題であるのみならず、多くの他分野との学際性を有しており、今後さらなる研究の発展が期待される。

〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

（1） 組織改編により、集約的研究成果を生み出し柔軟かつ有機的な運営が可能な研究基盤が整備されたか。

シミュレーション科学研究部は全体として「階層」をキーワードとして学術的なビジョンをもち、磁場閉じ込め核融合プラズマ、レーザー核融合プラズマ、宇宙プラズマ等の振る舞いを予測する緻密なシミュレーション研究に、革新的数値計算手法、仮

想現実技術、遠距離広帯域ネットワーク技術等の基盤技術開発を融合し、シミュレーション科学の新展開を目指している。LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、新領域シミュレーション研究系、及び六ヶ所研究センターから成るシミュレーション科学研究部を創設したことにより、NIFS が有する人的・ハード的リソースが統合・組織化されたことは、今後の発展を図る上で有意義である。所内及び国内との共同研究を含めた形で進められている3つのシミュレーションプロジェクトは、それぞれの研究テーマが明確であり、今後集約的研究成果を生み出す基盤となることが期待される。

これらの課題はいずれも学際的であり、大学等との積極的な連携・協力、分野間の有機的な連携を一層強化することが期待される。また、次世代スーパーコンピュータによる大規模シミュレーション研究をさらに発展させるためには、人材育成が重要であり、若手研究者組織を拡充する事が望まれる。計算機及びネットワークの業務については、作業班という形で分担されることになったが、専門的な知識を必要とする部分の責任体制を明確にすることが望まれる。また、バーチャルリアリティなど、シミュレーション研究環境を支える組織体制を確固たるものにしていく必要がある。

〔3〕 大学共同利用機関法人として、大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用した大学等との共同研究及び連携を積極的に推進し、シミュレーション研究の展開に貢献できたか。

日本全国の多数の大学研究者が共同利用研究として NIFS の大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用して多くの成果をあげており、日本におけるシミュレーション研究の展開に多大なる貢献をしている。とくに統合コード開発の大学間共同プロジェクト（TASK）への貢献やレーザー核融合シミュレーションでの大阪大学との協力などが特筆される。大学等からの利用環境は改善され、共同研究が促進されるようになった。約 300 件の発表論文の内、約 85%は大学等の研究者との共同研究の成果であることから、NIFS が共同利用研究機関として十分な貢献を行っていることが客観的に裏付けられる。

今後も、大学等との連携を積極的に取り入れたプロジェクト研究体制の導入などにより、計算機リソースの活用が一層進むよう努めてもらいたい。また、シミュレーションデータの共有や画像の遠隔操作など、ネットワークを介した様々な使用形態を可能とする検討が期待される。

〔4〕 COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。

21 人の専門家集団を構成し、広範なテーマに展開しつつ最先端の研究成果を挙げている。プラズマ・核融合分野におけるトップクラスの高速計算機の導入・運用を図っ

ており、外部の多くの共同研究者を巻き込んで研究が進められた。また国際会議やワークショップ（4年間で15件にのぼる）を主催・運営するなど、国際的なCOEとしての役割を十分果たしている。

ITER 及び BA に大学の研究者が参加するための窓口としての役割も期待される。BA で行われるシミュレーション研究において、我が国で開発・整備されたプログラムやアルゴリズムが国際標準として用いられるよう組織化された努力が必要であり、NIFS のシミュレーション科学研究者の活躍に期待が集まっている。また、海外からの協力を取り込むための予算措置も望まれる。

【5】 自然科学研究機構内分野間連携等を通し、他分野へ発信できる学術発信拠点となり得たか。

プラズマ・核融合の分野が学際的な発信力をもつために、理論・シミュレーション研究が果たす役割は極めて重要である。NIFS では、宇宙・天文学分野、分子科学分野との連携・協力をはじめとし、積極的な活動が行われており、その活動は評価できる。

プラズマ・核融合分野には高いレベルの膨大な研究の蓄積がある。これを他分野の研究者が理解できるような形で発信してゆくことが求められる。とくに、分子科学、生理学、基礎生物学など、もともとプラズマ科学と関わりの薄い研究分野との連携はこれからのように見受けられる。これらに対しては、サイエンスの内容より、シミュレーションの計算手法など方法論的な側面からの連携・協力が可能である。階層連結というテーマは、その中心となるだろう。今後、長期的な視点に立って、大学、情報・システム研究機構や宇宙航空研究開発機構なども含めた広範な学術的ネットワークを確立する必要がある。

【6】 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

個々の研究者は、夫々の分野で大変優れた成果を挙げており、世界的に高く評価されている。これは優秀な若手研究者が継続的に採用されていること、研究所内でのセミナーや学術的議論が自由闊達に行われていること、良い意味での研究者間の競争がなされていることなどによる。また、様々なトレーニングプログラムを実施し、国内のシミュレーション研究者の技能向上に多大な貢献が成されている。より広い意味での人材育成、社会的理解の醸成に関しては、夏の学校を開く等、幅広い取り組みを行っており、高く評価される。

国内の核融合シミュレーション分野における若手研究者の大部分が NIFS に所属しており、PD や若手研究者が育成される場として NIFS の役割は極めて重要である。今後も国際的に開かれた研究の場を創造し、核融合研究の長期的な発展を支える人材育成に貢献することが望まれる。また、特任研究員等を含む若手研究者組織のさらなる

充実計画を具体化しコミュニティに提示することで、優秀な研究者をこの分野に呼び込む必要がある。大学院教育については、大学の教育活動への協力・連携などが望まれる。

〔7〕 今後の研究計画は適切か。特に、中長期的な展望を見据えたものとなっているか。

シミュレーション科学を確立するという大きな目標を置き、階層性に着目するという具体的なテーマを設定した研究計画及びロードマップを立てている点は高く評価できる。LHD 核融合炉のモデル予測を目指した階層統合シミュレーションのロードマップを作成するなど、LHD 研究に直結する課題の研究体制が充実したことも評価できる。

今後の発展のためには、多くの要素研究を有機的につなぐ必要があり、プロジェクト間の連携や交流を一層強化するとともに、計算科学との連携、非線形・非平衡現象に係る他分野との交流、炉工学とも整合化するための協力など、外部の知見や協力研究を積極的に取り入れることが重要になろう。複雑性科学研究の比重が少々軽くなっていることへの懸念も指摘された。広い学術分野への発信・貢献を今後も活発に行う必要がある。

〔8〕 上記観点に上げられているものを除き、平成 16 年度外部評価及び平成 17 年度組織検討委員会において指摘された事項について適切に対応したか。]

（1） LHD・磁場閉じ込めプラズマ、レーザー核融合プラズマ、複雑性プラズマの各プロジェクトによるテーマ設定、研究の進め方は適切か。

平成 16 年度外部評価及び平成 17 年度組織検討委員会において指摘された事項に対応し、三つの領域で顕著な成果をあげたと評価できる。とくに、LHD・磁場閉じ込め分野では階層拡張・階層統合シミュレーション、レーザーに関しては FI³、複雑性に関しては分野間連携、などに力点を置いてテーマ設定している点は適切である。

複雑性プラズマにおいては、広い観点から研究を進める必要があることから、より広範な連携を進めていくことを期待する。たとえば、グラフィットについては、分子研との連携も視野に入れながら、高度なシミュレーション手法の確立が期待される。レーザー核融合に関するシミュレーション研究に関しても、磁場閉じ込めとの連携を含め、より充実した研究体制の構築が望まれる。

（2） ITER 及び BA への寄与が明確な研究テーマを設定し、体制を準備しているか。

燃焼プラズマのシミュレーションに取り組む等、適切にテーマ設定がなされてい

る。LHD-NTR と ITER 研究は学術的に共通性をもつものとして研究を進めることができる。TAE 研究、高エネルギー粒子の研究などは、ITER に直結する成果といえる。また、ITPA の活動などに貢献したり、ITER summer school に参加したりして、ITER に貢献している。

今後、炉工学も含めたさらに多くのテーマに取り組み、ITER/BA に対して本格的な寄与をするためには多数の人材が必要であり、六ヶ所研究センターを核として、今後どのような体制で臨むかについて長期的ビジョンをもち具体的に検討する必要がある。

(3) 研究及び計算機環境の進展を配慮し、共同利用の観点を踏まえつつ、大型シミュレーション研究用解析装置の構成を検討し、運用計画を立案しているか。

外部共同研究者の視点を入れて装置構成や運用がなされており、高く評価できる。研究テーマに応じて作業班を組織し、共同研究者の意見を反映させたベンチマークコード群整備の活動、ジョブ区分の簡素化、スパコン利用に関する共同研究の透明性を高めるなど、共同研究の活発化に向けた努力は評価される。

一方、計算機共同研究における技術的観点からは、スカラー並列がほとんどを占めている大学の計算環境から大幅なコードの変更なしに性能を発揮できる、シームレスな連携が可能な計算機システムが望まれる。スーパーコンピュータのアーキテクチャは 2~3 年後あたりに大変革期を迎える可能性が高い。単にリプレースを重ねるのではなく、予算と時期、政治的情勢を見極めながら、その構成を考えていくべきであり、それを見極められる人材配置も重要な課題である。さらに、ITER の BA インフラも見据え、自然科学研究機構という組織体系をコンピュータシステムという汎用的インフラの面からも有効に生かすようなビジョンが求められる。

(4) 可視化やバーチャルリアリティシステムの成果を公表・発信し、成果の幅広い波及、連携研究に努めているか。

成果は高く評価されたが、バーチャルリアリティ、可視化が研究にどのように役立ったのかについてより強い主張が必要である。3 次元データ形式やインターフェースの共通化・標準化とその公開を進めることが、共同研究への波及や連携研究の発展の観点から望まれる。

また、人材的な面での強化策を積極的に考えるべきである。これらの先進装置は外部からの使用が必ずしも容易ではない。当該分野において多様な使用形態のもとで連携研究を積極的に進めるためには、ネットワークの相互通信が一層重要になる。今後ネットワークの高速化やハードウェアやソフトウェアの格段の進展などを考慮しながら、様々な先進可視化を含む様々な計算機資源のリモートでの積極的な使用を可能にする取り組みが求められる。

3. 3. 2 提言

以上のように、NIFS のシミュレーション研究に関して、その実績は高い評価を得た。また組織運営のあり方や研究計画の学術的価値も高く評価された。その上で、NIFS のシミュレーション研究が一層発展し、国内外の核融合科学研究者コミュニティ及び関連分野の研究者と一層強い連携を形作るために、以下の点について要望が示された。

- (1) 統合輸送コードの開発など大規模・長期的研究において、全国の大学等が有する高い潜在能力を活かすために NIFS が先導的な役割を果たすことが望まれる。また、複雑性シミュレーション、レーザー核融合や周辺プラズマ、プラズマ―物質相互作用といった研究は、他分野に広がる学際性を有しており、分野間の連携を一層強めるために組織・体制を充実させることが望まれる。また、研究環境をサポートする人員と体制を整備することが求められる。
- (2) 国内の核融合シミュレーション分野における若手研究者の多くが NIFS に所属しており、PD や若手研究者が育成される場として NIFS の役割は極めて重要である。今後も国際的に開かれた研究の場を創造し、核融合研究の長期的な発展を支える人材育成に貢献することが望まれる。また、PD や特任研究員等を含む若手研究者組織のさらなる充実計画を示し、それをコミュニティに提示することで、優秀な研究者をこの分野に呼び込む必要がある。また、流動性を高めるなどして、若手研究者のキャリアパスを確保する必要がある。
- (3) 我が国のシミュレーション研究者が、ITER や BA への参加を通じて、核融合科学の全般分野に展開できるよう、研究組織、共同研究体制を早急に整備する必要がある。

第4章 おわりに

本外部評価委員会は、本年度が平成 22 年度からの第 2 期中期計画の策定に向けて今期における活動状況を中間評価する上で重要な年度であると捉え、核融合科学研究所の研究の二本柱である「大型ヘリカル装置（LHD）研究」及び「シミュレーション研究」の今期におけるこれまでの活動を評価した。

今期中期計画が開始されて以来 4 年が経過しようとしているが、この間の LHD 研究とシミュレーション研究は、積極的な組織の見直しや重点的な研究投資に加え、所員の高いモチベーションや活発な全国共同利用研究により飛躍的な成果を挙げている。

LHD の第 2 期中期計画においては、現在の活発な研究活動を更に飛躍させるため重水素実験計画等を着実に推進し、研究所の使命である核融合炉の実現を目指した核融合科学の学術的体系化をはかり、世界に先駆けた成果を挙げることを期待したい。

シミュレーション研究においては、現象を予測できるシミュレーションを目指し、その基礎となる幅広いシミュレーション科学の研究や統合輸送コードの開発などを国内外の核融合科学研究者コミュニティ及び関連分野の研究者と一層強い連携を形成することによって、強力に推進していただきたい。

核融合科学研究所におかれては、本外部評価を今後の計画策定・遂行に反映させることによって、研究・業務の一層の充実を図り、核融合研究の中核機関として更に大きな役割を果たされることを願っている。

添 付 資 料

核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則

制 定 平成16年12月28日 規則第27号
最終改正 平成18年12月22日

(設置)

第1条 核融合科学研究所の研究等の実績に関する評価を行うため、核融合科学研究所運営会議（以下「運営会議」という。）に核融合科学研究所運営会議外部評価委員会（以下「委員会」という。）を置く。

(組織)

第2条 委員会は、25名以内の委員をもって組織する。

2 委員は、核融合科学研究所の研究等に関し識見を有する者で構成し、運営会議の議を経て、所長が委嘱する。

(任期)

第3条 前条第2項の委員の任期は、2年とし、再任を妨げない。

2 前項の委員に欠員が生じたときは、その都度補充する。この場合における委員の任期は、前任者の残任期間とする。

(委員長)

第4条 委員会に委員長及び副委員長を置く。

2 委員長及び副委員長は、第2条第1項の委員のうちから運営会議で選出する。

3 委員長は、委員会を招集し、その議長となる。ただし、委員長に事故があるときは、副委員長が議長となる。

(意見の聴取)

第5条 委員会は、必要に応じて、次に掲げるものから意見を聴くことができる。

- (1) 核融合科学研究所運営会議共同研究委員会
- (2) 核融合ネットワーク
- (3) その他必要と認める者

(専門部会)

第6条 委員会は、必要に応じて、専門部会を置くことができる。

2 前項の専門部会には、委員以外の者を加えることができる。

(庶務)

第7条 委員会の庶務は、管理部経営企画課において処理する。

(雑則)

第8条 この規則の実施に関し必要な事項は、別に委員会が定める。

附 則

1 この規則は、平成16年12月28日から施行する。

2 この規則の施行後最初の委嘱に係る委員の任期は、第3条第1項の規定にかかわらず、平成18年3月31日までとする。

附 則

1 この規則は、平成18年9月15日から施行する。

2 この規則の施行後最初の委嘱に係る委員の任期は、第3条第1項の規定にかかわらず、平成20年3月31日までとする。

附 則

この規則は、平成18年12月22日から施行し、平成18年10月1日から適用する。

平成19年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員名簿

		氏 名	所 属 ・ 職 名
大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会	委員長／専門部会長	吉田 直亮	九州大学応用力学研究所教授
	専門部会幹事	佐野 史道	京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター長
		斉藤 輝雄	福井大学遠赤外領域開発研究センター長
		笹尾 眞實子	東北大学大学院工学研究科教授
		佐藤 浩之助	九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター長
		長 照二	筑波大学プラズマ研究センター長
		利根川 昭	東海大学理学部教授
		二宮 博正	日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門研究開発推進室長
		日野 友明	北海道大学大学院工学研究科教授
		松山 政夫	富山大学水素同位体科学研究センター長
	専門委員	櫻井 隆	自然科学研究機構国立天文台副台長
	専門委員	永山 國昭	自然科学研究機構岡崎共通研究施設岡崎統合バイオサイエンスセンター長
シミュレーション研究専門部会	副委員長／専門部会長	吉田 善章	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	専門部会幹事	大澤 幸治	名古屋大学大学院理学研究科教授
		小川 雄一	東京大学高温プラズマ研究センター長
		岸本 泰明	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授
		畠山 力三	東北大学大学院工学研究科教授
		福山 淳	京都大学大学院工学研究科教授
		御手洗 修	九州東海大学産業技術研究所教授
		三間 罔興	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長
		渡邊 國彦	海洋研究開発機構地球シミュレータセンタープログラムディレクター
	専門委員	岡崎 進	自然科学研究機構岡崎共通研究施設計算科学研究センター長
	専門委員	富阪 幸治	自然科学研究機構国立天文台理論研究部主任

	主たる評価対象	氏 名	所 属 ・ 職 名
外国人委員	大型ヘリカル装置（LHD）研究	Gyung-Su Lee	Vice-President, National Fusion Research Institute (Republic of Korea)
	シミュレーション研究	James W. Van Dam	Director, Institute for Fusion Studies in the University of Texas at Austin (USA)
	シミュレーション研究	Michael Tendler	Professor, Royal Institute of Technology (Sweden)
	大型ヘリカル装置（LHD）研究	Thomas Klinger	Professor, Scientific Director of the Project Wendelstein 7-X, Max-Planck-Institute for Plasma Physics (Germany)

平成 19 年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

平成 19 年度第 1 回核融合科学研究所運営会議外部評価委員会

日 時 平成 19 年 7 月 26 日（木） 13 時 40 分～16 時 00 分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟 4 階 第 3 会議室
出席者 吉田 直亮 委員長、吉田 善章 副委員長、大澤 幸治、岸本 泰明、
斉藤 輝雄、笹尾 眞實子、佐藤 浩之助、佐野 史道、長 照二、利根川 昭、
二宮 博正、日野 友明、福山 淳、松山 政夫、御手洗 修、三間 罔興、
渡邊 國彦の各委員
岡崎 進、櫻井 隆、富阪 幸治、永山 國昭の各専門委員

平成 19 年度第 2 回核融合科学研究所運営会議外部評価委員会

日 時 平成 19 年 12 月 1 日（土） 13 時 00 分～17 時 00 分
場 所 名古屋ルーセントタワー 16 階 会議室（ニュートン+オパーリン）
出席者 吉田 直亮 委員長、吉田 善章 副委員長、大澤 幸治、小川 雄一、
岸本 泰明、斉藤 輝雄、笹尾 眞實子、佐藤 浩之助、佐野 史道、長 照二、
利根川 昭、二宮 博正、畠山 力三、日野 友明、福山 淳、松山 政夫、
御手洗 修、渡邊 國彦、Gyung-Su Lee、James W. Van Dam、
Michael Tandler、Thomas Klinger の各委員
岡崎 進、櫻井 隆、富阪 幸治、永山 國昭の各専門委員

平成 19 年度第 3 回核融合科学研究所運営会議外部評価委員会

日 時 平成 20 年 2 月 22 日（金） 13 時 40 分～16 時 50 分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟 4 階 第 3 会議室
出席者 吉田 直亮 委員長、吉田 善章 副委員長、大澤 幸治、小川 雄一、
岸本 泰明、斉藤 輝雄、佐藤 浩之助、佐野 史道、利根川 昭、二宮 博正、
日野 友明、渡邊 國彦の各委員
岡崎 進 専門委員

大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会日程

大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会（平成１９年度第１回）

日 時 平成１９年７月２６日（木）１６時００分～１７時００分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟４階 第３会議室
出席者 吉田 直亮 部会長、佐野 史道 部会幹事、斉藤 輝雄、笹尾 眞實子、
佐藤 浩之助、長 照二、利根川 昭、二宮 博正、日野 友明、松山 政夫
の各委員
櫻井 隆、永山 國昭の各専門委員

大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会（平成１９年度第２回）

日 時 平成１９年１２月１日（土）１７時１０分～１８時００分
場 所 名古屋ルーセントタワー１６階 会議室（ニュートン＋オパーリン）
出席者 吉田 直亮 部会長、佐野 史道 部会幹事、斉藤 輝雄、笹尾 眞實子、
佐藤 浩之助、長 照二、利根川 昭、二宮 博正、日野 友明、松山 政夫、
Gyung-Su Lee、Thomas Klinger の各委員
櫻井 隆、永山 國昭の各専門委員

大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会（平成１９年度第３回）

日 時 平成２０年１月１８日（金）１３時４０分～１７時３０分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟４階 第３会議室
出席者 吉田 直亮 部会長、佐野 史道 部会幹事、笹尾 眞實子、利根川 昭、
二宮 博正、日野 友明、松山 政夫の各委員

大型ヘリカル装置（LHD）研究専門部会（平成１９年度第４回）

日 時 平成２０年２月１６日（土）１３時３０分～１６時３０分
場 所 駅前モンブランホテル２階 第一会議室
出席者 吉田 直亮 部会長、佐野 史道 部会幹事、斉藤 輝雄、笹尾 眞實子、
佐藤 浩之助、二宮 博正、日野 友明、松山 政夫の各委員
櫻井 隆 専門委員

シミュレーション研究専門部会日程

シミュレーション研究専門部会（平成１９年度第１回）

日 時 平成１９年７月２６日（木）１６時００分～１７時００分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟４階 第３会議室
出席者 吉田 善章 部会長、大澤 幸治 部会幹事、岸本 泰明、福山 淳、御手洗 修、
三間 圀興、渡邊 國彦の各委員
岡崎 進、富阪 幸治の各専門委員

シミュレーション研究専門部会（平成１９年度第２回）

日 時 平成１９年１２月１日（土）１７時１０分～１８時００分
場 所 名古屋ルーセントタワー１６階 会議室（ニュートン＋オパーリン）
出席者 吉田 善章 部会長、大澤 幸治 部会幹事、小川 雄一、岸本 泰明、
畠山 力三、福山 淳、御手洗 修、渡邊 國彦、James W. Van Dam、
Michael Tendler の各委員
岡崎 進、富阪 幸治の各専門委員

シミュレーション研究専門部会（平成１９年度第３回）

日 時 平成２０年２月４日（月）１３時４０分～１７時００分
場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟４階 第３会議室
出席者 吉田 善章 部会長、大澤 幸治 部会幹事、岸本 泰明、畠山 力三、
三間 圀興、渡邊 國彦の各委員
岡崎 進、富阪 幸治の各専門委員

Peer Review Report on Large Helical Device (LHD) Research

Reviewer: Gyung-Su LEE

The following perspectives consist of factors inevitable to make reviews for the LHD research that was addressed in the Mid-term Plan determined by the National Institutes of Natural Sciences, the Inter-University Research Institute for which the National Institute for Fusion Science, the National Institutes of Natural Sciences are responsible. They are formulated in accordance with the achievement reviews and reviews for the research standard.

The perspectives [1] to [4] refer to the articles addressed in the Mid-Term Plan, and [5] and [6] are those relative to the plan.

[1] By achieving things written below, did we succeed in a academic systematization and also produce outstanding results that led the world in the field of nuclear fusion science as well as in the fields like plasma physics and fusion engineering that are the basis of nuclear fusion science to actualize the fusion energy?

(1) Did we succeed in enhancing the plasma performance to see through the nuclear fusion core plasmas?

During 2004-2007 review period of Mid-Term Plan, the LHD Research Program succeeded to achieve outstanding experimental results of enhancing plasma performance. Especially, demonstrated experimental results such as Super Dense Core Plasma with Internal Diffusion Barrier, Extension of High-beta Regime, Steady-state Operation and Extension of High-Ion Temperature Regime, showed the LHD Plasma Performance exceed initial target of Mid-Term Goals. It is also worthwhile to mention the achievement of fusion triple products, electron temperature, and pulse length closed to the final target values during the period, with plasma stored energy closed to the large tokamak results.

(2) Did we properly carry out the academic scientific research for the comprehensive understanding of torus plasmas and the actualization of nuclear fusion core plasmas?

In addition to enhancing plasma parameters, the LHD Research Program put its high priority on the understanding of toroidal plasma so that the realization of fusion core plasma to be obtained in the LHD. Especially, the experimental results and understanding of physics of thermal and particle transport, plasma-wall interaction, stability and energetic particle physics, RF and MW heating physics are some examples of success of program in this area.

[2] To carry out the perspective [1], did we perform the following?

(1) Did we properly carry out the maintenance and intensification of heating devices as well as diagnostic devices and the improvement of devices?

During Mid-Term period, the P-NBI system construction and operation contributed very much to achieve core plasma performance enhancement, also the ECH Gyrotron

development and ICRH Antenna improvement contributed to enhance understanding of toroidal plasmas. It is worth to mention that the accelerated enhancement of P-NBI power in next period would improve core plasma performance further so that LHD could surpass its final target values. So, I would recommend to increase resources to the program if it is allowed. For diagnostics area, the LHD Research Program has a leadership role in many areas. It is understandable by noting the massive data from diagnostic output of LHD experiment. It is also worth to mention the successful installation and operation of Charge Exchange Recombination Spectroscopy systems to measure ion temperature accurately and demonstrate understanding of high ion-temperature modes resulting to discovery of improved modes. There are various activities for improving LHD device itself, such as sub-cooling of helical coils, improved actively pumped LID system, and optimized helical divertors. These enhancement and improvement did very important role for deepening of understanding of core plasma physics by allowing machine operation flexibility. In conclusion, the device engineering including heating system addition, diagnostics improvement as well as machine improvement was very successful for supporting core program of LHD research during review period, and recommend continuing its effort to next period.

(2) Did we properly carry out the research to elucidate the physical organization necessary to improve the plasma performance as a bilateral collaborative research by organically utilizing devices and equipments of various research institutes, universities, university research institutes, and research centers?

For efficiently executing program by utilizing domestic institutions' capacity, the LHD Research Program executed extensive collaboration programs with a few different schemes such as LHD Program Collaboration, Bilateral Coordinated Collaboration, and General Collaboration Research. It is well organized with more than 157 Facilities with more than 1,300 experts in nationwide network. Many examples of collaborative research output were explained during review meeting that showed successfully executed program performance.

[3] Did we properly carry out the inter-operation and collaborative research by obtaining more active participation from various research fields including the participation of those researchers who study subjects other than nuclear fusion? Accordingly, did we successfully prepare the environment? Also, did we successfully contribute to the research development of universities?

It is very encouraging to witness the NIFS and LHD Research Program finds way and execute interdisciplinary research in various science areas especially in environment, solar science, astrophysics, as well as life science. After incorporation to the National Institute of Natural Sciences of NIFS, the "experimental efforts" of cooperative research themes is gaining successful results and obtaining active participations from fields other than fusion. With coordinated effort of NIFS leadership, this program succeeded to contribute more than normally expected.

[4] Did we successfully play a role as COE? Moreover, did we also play a role as COE in a global sense through international collaborative research and contributions?

The NIFS as organization and the LHD Research Program is the major Center of Excellency in the field of fusion research in the world-wide sense. It is now well established and recognized by all major fusion research program. The international research network formed by NIFS and LHD Program is now encompassing all major fusion programs in the world, and the leadership role of NIFS and LHD is outstanding. The Global COE role of NIFS and LHD is not limited to the helical systems, but rather all confinement concepts including tokamak. It is worth to note that the leadership in Asian fusion programs and among helical systems are well recognized and appreciated.

[5] Did we successfully function as an origin for the academic scientific transmission that can also transmit to the research fields other than nuclear fusion?

Review documents showed that the NIFS and LHD Program actively pursued to communication among various academic and scientific fields other than fusion research. Especially, the interdisciplinary collaboration did successfully contribute NIFS and LHD program as an origin of knowledge transmitted to the variety of science fields.

[6] Did we successfully contribute to the fostering of human resources who would play an active part in an international situation?

The data of NIFS and LHD Program on the human resource development showed very successful results. The Ph. D. Graduation results from LHD showed highly recognized thesis quality and the mixture of foreign students with domestic ones. From this results, one can judge success of the NIFS effort to educate young experts who could play role in an international situation.

[7] Is our future research plan proper? Especially, is the perspective of the mid-/long-term plan that was drafted toward the actualization of a desired target value properly taken into consideration?

The future research plan of LHD experiment is well laid out in review documents. The planned improvement of LHD in heating power in P-NBI, ICRH, and ECH will enable achieving LHD goals and goes beyond what has been achieved. Also, poloidal coil power supply upgrade will give flexibility of dynamic control of equilibrium. The “closed divertor” upgrade will give big impact on particle control capability of LHD, so that LHD will have further improvement of IDB formation. The long waited D-D experiment capability of LHD will also open new dimension of experimental avenue. It is evident that the LHD team thought out very thoroughly for scenario to achieve the goal of LHD, and to realize desired target parameters in confinement, long-pulse, and high-beta issues. Therefore, the provided mid-/longer- term plan is very clearly positioned to lead fusion research program in the international scene.

[8] Besides the above described perspectives, did we properly resolve the issues pointed out in the 2004 Peer Review?

- (1) Were the selection of research themes and the research procedures proper? Especially for the experiments, were the opinions of the NIFS staff and collaborative researchers heard to improve the system? Also, did we select such research themes that clearly define the contribution to ITER?**

In the review documents, there are clear explanation for the LHD experimental group formation, flow of execution of experimental program and flow of preparation of LHD experiment. This showed much improvement of selection mechanism of research theme and research procedure over last review period. The opinion of NIFS staff and collaborative researchers could be well taken into account by the improved system. There are also a few evidence to contribute ITER project by contributing ITPA activities in LHD research program, however it would be highly recommendable to engage further in ITER related physics research as well as engineering and technology research.

- (2) As for the theory and data analysis, did we successfully improve the collective strength by intensifying the collaboration with theory and simulation groups? Furthermore, did we successfully work as the center for the torus plasma theory research in Japan by intensifying the collaboration with the tokamak?**

After last peer review of LHD research program, the reorganization of computation and simulation groups in NIFS has executed. And results of reorganization have been review as very successful integration. It is also worth to note that the theory, simulation and experimental coworks in LHD program provide high quality output of understanding of toroidal plasma physics. It is recommended that inter-department and/or inter-division working group formation for specific tasks to further enhancing understanding of physics by theory, simulation and experiment collaboration. It is also recognized that the theory and simulation group contributed tokamak physics area with collaborative works. Especially, comparative study between tokamak and helical system in experiment as well as theory seems well placed to go beyond what has been achieved. Using these studies, the commonality and difference between two systems will enhance understanding of toroidal physics.

- (3) Did we strive to develop diagnostic devices including such advanced diagnostic devices that might be applicable to ITER while collaborating with researchers in and outside of NIFS?**

There are documented results of short wavelength laser diagnostics for ITER, and study of changing optical properties of retroreflector in ITER-like environment. These efforts are very encouraging for the ITER diagnostics preparation by providing LHD groups expertise and experience. It is recommended to actively pursue and to go beyond what have been achieved so far. The collaboration with other ITER DAs would be very much rewarding.

大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価

評価者：ギョン スー リー

下記外部評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が責任を有する LHD 研究の評価に必要不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

〔1〕～〔4〕は、中期計画に記載されている事項で、〔5〕〔6〕は、関連したものとなっている。

〔1〕 核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、下記事項を達成することなどにより、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることができたか。

（1） 核融合炉心プラズマを見通すことを目指して、プラズマの高性能化を図ることができたか。

2004～2007 年期の中期計画期間中、LHD 研究プログラムは、プラズマ性能を向上させ、秀でた実験成果を築くに至った。取り分け、内部拡散障壁を伴う超高密度炉心プラズマ、高ベータ値の更新、定常運転及び高イオン温度の更新などにおける実験結果から、LHD プラズマ性能が当初中間目標を上回ったことを実証した。

また、核融合三重積、電子温度、及び放電時間に関する成果が本期間中の最終目標値に近く、プラズマ蓄積エネルギーが大型トカマク成果に近かったことは、賞賛に値する。

（2） 環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を進めることができたか。

プラズマパラメータの向上に加え、LHD 研究プログラムは核融合炉心プラズマの実現を LHD で可能にするため、トロイダルプラズマの理解に高い優先度を置いた。特に、熱・粒子輸送物理、PWI、安定・高エネルギー粒子物理、RF 及び MW 加熱物理等の実験結果と理解などは、本分野におけるプログラムの成功例と言えるだろう。

〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

（1） 加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進めることができたか。

中期計画期間中、P-NBI システムの建設及び運転が、炉心プラズマ性能の向上に大きく貢献した。また、ECH ジャイロトロンの開発及び ICRH アンテナの改良においては、トロイダルプラズマの理解向上を導いた。そのような状況の

中、次期 P-NBI パワーの増力が炉心プラズマ性能を一層向上させ、結果 LHD が同最終目標値を上回るだろうことを、書き添えて置きたい。よって、可能であれば、資金の増額を推奨したい。計測分野に関しては、LHD 研究プログラムは多方面でリーダーシップ的役割を発揮している。これは、LHD 実験の計測結果から得られる大量のデータから理解できる。また、イオン温度を正確に計測し、改良モードの発見につながる高イオン温度モードの理解を実証するための荷電交換分光装置システム設置及び運用の成功に関しても、言及に値する。LHD 装置そのものの改良を目指した活動も多々実行されており、ヘリカルコイルの過冷却、改良された LID システム、及び最適化されたヘリカルダイバータ等が例として挙げられる。これらの向上や改良は、装置運転の柔軟性を助長し、炉心プラズマ物理理解を深めていく上で、非常に重要な役割を果たしたといえる。結果、加熱システム補強を含めた装置技術、そして計測及び装置の改良は、本評価期間中の LHD 研究における基幹プログラムを支持したという点で、大きな成功を収めたものであった。以後、次期に繋がる継続的な努力を推奨したい。

(2) プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明などを、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進めることができたか。

国内各研究機関の設備等を利用し、プログラムを効率的に進めるという点において、LHD 研究プログラムは、LHD 共同研究、双方向型共同研究、一般共同研究に代表される広域共同研究プログラムを複数の組織とともに実行した。こちらは 157 以上の研究機関、及び国内外から 1,300 人以上の専門家を擁し、上手く構成されたプログラムである。共同研究成果の多くが評価会議中に発表され、プログラムの高い機能性を証明した。

[3] 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画を得て共同利用・共同研究を適切に進められたか。そのために環境を整備することができたか、また、大学の研究発展にも寄与できたか。

NIFS と LHD 研究プログラムが方向性を見出し、様々な科学分野、特に環境学、太陽科学、天体物理学、生物科学等の分野で学際研究を展開する場面に立ち会えて非常に喜んでいる。NIFS の法人化、自然科学研究機構への統合後、共同研究テーマの「実験的な努力」は、目覚ましい成果を積み重ねており、核融合分野以外からも積極的な参画を得ている。NIFS のリーダーシップを司る様々な努力と合わせ、本プログラムは予想された以上の貢献度を示す結果となった。

[4] COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。

組織としての NIFS 及び LHD 研究プログラムは、核融合研究分野において世界的な主要 COE だと言える。組織的に磐石で、主だった全ての核融合研究プログラムにおける知名度も高い。NIFS 及び LHD 研究プログラムによって形成さ

れた国際研究ネットワークは、現在世界各国の主要核融合プログラムを網羅しており、NIFS 及び LHD のリーダーシップ的役割は傑出している。NIFS と LHD の国際的 COE としての役割は、ヘリカルシステムのものに止まらず、むしろトカマクを含む閉じ込め概念全体に及ぶものと言える。アジア核融合プログラム及びヘリカルシステムにおいて、高いリーダーシップを維持し、またそれが受け入れられていることは、特筆に値する。

〔5〕 他分野へも発信できる学術発信拠点となりえたか。

評価資料から、核融合研究以外の学術分野との連携を試みる、NIFS 及び LHD プログラムの積極的姿勢が伺えた。取り分け学術連携に至っては、多方面の科学分野に向けられた知識の発信源として、NIFS 及び LHD プログラムに大いに貢献した。

〔6〕 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

NIFS 及び LHD プログラムの人材育成に関するデータから、大変素晴らしい成果が伺える。LHD の博士課程終了生は極めて傑出した論文を書いており、国内外生徒のバランスも望ましい。これらから、国際的な場面で活躍できる若手専門家育成を目指した NIFS の努力が、実りあるものであったと判断できるだろう。

〔7〕 今後の研究計画は適切か。特に、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えたものとなっているか。

LHD 実験の今後の研究計画は、評価資料において分かり易く整理されている。LHD 改良計画－NBI、ICRH、及び ECH の加熱電力向上を実現すれば、これまで達成してきた以上の LHD 目標に到達し得るだろう。また、ポロイダルコイル電力供給の向上に至っては、平衡 (=equilibrium) の動的制御に柔軟性をもたらすだろう。閉ダイバータへのアップグレードは、LHD の粒子制御性能に大きく影響すると思われ、結果、LHD の IDB 形成は、更に向上すると思われる。長く待たれた LHD の DD 実験の実施についても、目的実現に向けて新たな局面を迎えるに違いない。LHD チームが LHD の目標達成、あるいは閉じ込め、長時間放電、高ベータ値関連の目標パラメータ到達に向けて、様々なシナリオを考え尽くしているのは明白である。よって、作成された中期・長期計画は、国際的な場面で核融合研究プログラムを先導することを明確に見据えている。

〔8〕 上記観点に挙げられているものを除き、平成 16 年度の外部評価で指摘された事項について適切に対応したか。

(1) テーマの設定やその進め方は適切であったか。特に、実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、より良いシステムに成長させることができたか。

また、ITER への寄与が明確なテーマを選択したか。

評価資料内において、LHD 実験グループ構成、実験プログラムの実施行程、LHD 実験準備行程に関して明確な説明がなされている。これは先の評価期間から、研究テーマの選択メカニズム、及び研究プロセスに関して大きく向上させた。NIFS 職員や共同研究者の意見なども、改良されたシステムを利用して前回以上に反映されるだろう。また、LHD 研究プログラムにおける ITPA 活動に貢献することで、ITER 計画に寄与している場面も見受けられるが、今後より一層、ITER 関連物理研究及び工学・技術研究に従事することが高く望まれる。

- (2) 理論・データ解析に関しては、理論・シミュレーションとの連携を強めることにより、総合力をアップできたか。更に、トカマクとの連携を強化することにより、我が国における環状プラズマの理論研究の中核となり得たか。**

LHD 研究プログラムに対する前回の外部評価後、NIFS では、計算機・情報ネットワークセンターと理論・シミュレーション研究センターが統合された。改組は非常に満足の行く成果につながったと言える。また、理論・シミュレーションと実験グループが LHD プログラムにおいて協力し合い、トロイダルプラズマ物理の理解に高く秀でていることは、特筆に値する。今後、各研究系間またはグループ間の研究グループ構成で、各種専門的な課題について、理論・シミュレーション、実験分野で協力し合い、物理理解の一層の向上を目指して行くことが強く望まれる。さらに、理論・シミュレーショングループに関しては、共同研究により、トカマク物理領域にも貢献してきたと言える。取り分け、トカマク・ヘリカルシステム実験及び理論の比較研究は信頼できるものであり、過去の成果に位置づけられている。これらの研究を用い、両システムの共通性または相違点は、トロイダル物理の理解をより高めて行くことだろう。

- (3) 計測機器の開発は、ITER にも適用可能な先進計測機器も視野に入れ、所内外の研究者と連携してチャレンジできたか。**

ITER の短波長レーザー計測に関する記録が残されており、また、ITER と同様の環境下における反射計の光学的性質を改良する研究が行われている。LHD グループの技術と経験を生かしたこれらの試みは、ITER 計測準備を大いに支援するものである。これまで以上の成果を求め、更なる躍進が期待される。ITER 極内機関との協力も非常に有意義であろう。

Peer Review Report on Large Helical Device (LHD) Research

Reviewer: James W. Van Dam

1. Was world-leading research performed that advanced the scientific understanding of fusion plasma behavior?

A few preliminary comments:

NIFS has a clearly articulated three-point mission statement. The LHD program is carefully focused on seven primary subjects. Thus, the research objectives are well organized.

In recent years, the program, plans, and performance of NIFS and the LHD Project have been thoroughly described in a variety of documents (e.g., Mid-Term Goals document, Mid-Term Plan document, Annual Plans, and Annual Achievement Reports) and have also been critically scrutinized by a variety of review bodies (e.g., annual External Peer Review Committee meetings and annual reviews by MEXT evaluation committee). Such documentation and reviews ensure that the NIFS program, plans, and performance are openly published for the sake of transparency and accountability.

I appreciated that the LHD presentation to the Peer Review Committee was organized so as to provide information concerning the questions that the Peer Review Committee is being asked to consider.

- **Was plasma performance enhanced?**

During the experimental campaigns of recent years, very impressive progress has been achieved in pushing forward on plasma performance in LHD. Plasma parameters such as the ion temperature and density, electron temperature, volume-averaged beta, and pulse length have all been increased to new record values. For example, average plasma beta values of > 4.5% have been achieved during plasma discharges that exceed 100 times the energy confinement time. The stored energy in LHD (maximum 1.4 MJ so far) is now comparable to that in large tokamaks. The potential to attain steady-state operation is being demonstrated.

- **Was scientific research performed that advanced the understanding of toroidal plasma behavior for the purpose of making fusion a reality?**

One of the outstanding recent experimental highlights on LHD was the discovery of the internal diffusion barrier. This has led to a breakthrough in super-high density performance. The results have been sufficiently encouraging to warrant studies of a helical fusion reactor based on this concept.

Other recent LHD experimental highlights have been the discovery of an impurity hole in the center of the plasma and the observation of strong toroidal rotation (coincident with high ion temperature). The impurity hole is very favorable for helical devices, in marked contrast to what occurs in a tokamak, where impurities tend to accumulate centrally as confinement improves.

Important theoretical and experimental work (with international collaboration) on understanding turbulent transport with zonal flows was carried out in LHD. A NIFS scientist presented a very good review talk on this subject at the 2006 APS-DPP Meeting (coincidentally the first-ever review talk at this annual meeting by a scientist from Japan).

It's interesting that even though MHD instabilities are observable during the LHD discharges, they affect the plasma performance very little. This is evidence of the good behavior of helical systems.

Informative summaries of LHD research results are presented on the NIFS web site, which is kept up to date.

2. Research support:

- **Maintenance and improvements in hardware, such as auxiliary heating systems, diagnostics, and facility upgrades?**

External heating power for LHD has been significantly increased, especially via neutral beam injection (now totaling 21 MW). The major heating increase came from the addition of neutral beam line #4 in JFY 2005 (40 keV, perpendicular injection). Injected power doubled with the addition of this beam line (7 MW). As a result, the central ion temperature and plasma beta value attained new record values in LHD (5.2 keV and 5%, respectively).

Sub-cooling of the helical coils has allowed higher magnetic field strength on axis and, consequently, the achievement of higher electron temperature on axis (10 keV). This is helpful for the electron cyclotron heating, which is effective in producing the internal diffusive barrier for high-density operation.

Improvements to the charge exchange recombination spectroscopy diagnostic system have resulted in much better time- and space-resolved measurements of the ion temperature in LHD.

The hardware upgrades to LHD in recent years have definitely paid off in terms of enhanced machine performance.

- **Use of bilateral collaborations to promote the research program?**

The NIFS program of collaborative research is organized into three sub-programs: General Collaborations, LHD Collaborations, and Bilateral Collaborations. Each sub-program has its own budget and has a distinct focus. The number of subjects and of collaborators for the NIFS Bilateral Collaboration program has been increasing each year for the past four years. Especially noteworthy is the increased number in JFY 2007 (compared to JFY 2006); part of this increase may be attributed to recent NIFS involvement in preparing for the new spherical torus facility at Kyushu University.

By comparing the data on pages 10 and 11 of the LHD presentation, I find that NIFS Bilateral Collaborations involve 62 institutions, out of a total of 157 universities and institutes in Japan that are engaged in fusion activities. This is quite inclusive.

Some important LHD research projects are being carried out through Bilateral Collaborations. A good example is the development and construction of gyrotrons in collaboration with Tsukuba University.

3. Did NIFS promote inter-university collaborations that contributed to university research programs?

The NIFS inter-university collaborations are paying off in terms of fruitful contributions to the success of the LHD project. One such example is the investigation of the key role of the edge radial electric field in improved confinement, in collaboration with Tsukuba University and Kyoto University.

Access to LHD experimental data, regular video-conference meetings, and remote participation by means of the SINET3 network all contribute to the smooth operation of these collaborations.

Of the ten experimental research theme areas on LHD, it is notable that non-NIFS scientists serve as the leaders for six of the areas. (However, none of the co-leaders are from outside NIFS.)

4. Did LHD successfully function as a Center of Excellence for fusion science (including international collaborations)?

NIFS is the unquestioned center of excellence for helical/stellarator research in the world. Here are facts that support this statement:

- LHD is the biggest and best helical experimental facility in the world, and it is producing excellent results.
- LHD has an excellent publication record: 327 papers in 2004, 203 in 2005, 287 in 2006, and 129 so far for 2007.
- LHD results have been consistently selected for presentation as high-profile invited talks at major international meetings during the past several years (e.g., the IAEA Fusion Energy Conference in 2004 and in 2006, etc.).
- IN recent years, LHD was featured as cover illustrations on three issues of the journal *Nuclear Fusion*.

As for international collaborations, I note the following items:

- NIFS took the initiative to set up fusion research agreements with a number of international institutions during the past four years, in addition to the inter-governmental fusion agreements. NIFS has set up 8 new scientific agreements with foreign institutions during the past four years (including 3 during 2007). The newest of the inter-governmental fusion agreements is the IEA Implementing Agreement on Spherical Tori.
- NIFS has been very active in hosting international conferences (e.g., the annual International Toki Conference, various IAEA Technical Committee Meetings, the PET

conference, the LAPD diagnostics meeting), as well as a number of US-Japan workshops.

- NIFS is a leader of the International Stellarator/Heliotron Working Group. In this connection, NIFS is the joint host (along with the Max-Planck IPP) for a helical systems confinement database, and NIFS leads an initiative to develop an integrated transport code.
- As an example of an international collaboration, NIFS participated in a project to compare results for neoclassical transport analysis of electron temperature profiles for core electron-root confinement from four helical machine (LHD, CHS, Wendelstein, and the Spanish stellarator).

Incidentally, I applaud the establishment of the Fusion Science Archives at NIFS (January 2005). This is another way in which NIFS functions as a national and international center of excellence for the field of fusion science.

I also applaud the Open House that NIFS organizes for the benefit of the public community.

5. Did LHD successfully perform interdisciplinary research? [FY2004-2009 Mid-Year Plan]

NIFS has been involved with the International Strategy Board/International Cooperation Office and the Research Cooperation and Liaison Board/Office of the National Institutes for Natural Science in the NINS activities to establish a basis for international and interdisciplinary research. It would be of interest to learn more about the LHD International Mutual Experiment project (LIME).

6. Did LHD contribute to the development of human resources?

Through the Graduate University for Advanced Studies, the Department for the LHD Project graduated 14 PhD experimental students over the past four years. Of these, six were international students. I recommend keeping a record of when the Ph.D. students graduated and where they became employed after graduation.

It would be of interest to have information about changes in the LHD staff (e.g., who retired, who was hired, etc.).

The number of student researchers at NIFS from associated universities has declined slightly in the most recent twelve months. The plans of NIFS for enhancing student mobility by increasing the number of affiliated universities (including foreign universities) are commendable.

7. Is the LHD plan for future research appropriate, taking into account the NIFS mid-term institutional plans?

Future experimental plans call for (1) facility upgrades to LHD, including additional heating power, and (2) deuterium experiments. Both directions are appropriate in view of the impressive results achieved in LHD so far.

It is hoped that the hardware upgrades to the LHD facility could be funded without adverse reduction of operational availability for experimental research.

Future plans also include a focus on preparatory studies for a helical fusion reactor. Projecting the generation of electric power from fusion by 2035 is aggressive, but commendably ambitious. I find it interesting and novel that the FFHR helical reactor—being based on super-dense core plasma operation—would have its ignition point on the thermally unstable side of the self-ignition curve, with control to be provided by pellet fueling. The LHD reactor studies would be compatible with the Fast Track Approach being promoted in Europe.

8. Have the issues pointed out by the 2004 Peer Review Committee and the 2005 Organization Review Committee been appropriately addressed? In particular:

- **Were the topics and activities for the research program appropriately selected, with input from NIFS scientific staff and collaborative researchers, and with clearly defined contributions to ITER?**

The topics and activities for the LHD research program have been appropriate and productive. It would be interesting to see a run-time allocation among the various research projects on LHD.

Several specific contributions to ITER were mentioned. A NIFS researcher performed power load analysis for the ITER limiter configuration during the start-up phase. A new two-color far-infrared interferometer was developed for use on LHD (and possibly on ITER). In collaboration with Kyushu University, NIFS has proposed a polarimeter system for ITER.

The LHD experience with sub-cooling of superconducting coils to raise the magnetic field strength might be of interest to ITER, which is now considering a similar option. Also the LHD experience with handling large data amounts per shot would be relevant to ITER remote participation.

NIFS scientists participate actively in ITPA international Topical Group meetings. Also, NIFS hosts meetings about the Japanese contributions to ITPA activities. In addition, LHD contributes data to several ITPA databases. LHD contributions to ITPA are important because it is very useful to compare tokamak and helical/stellarator results.

The number of participants from NIFS who have been involved in ITPA activities increased remarkably in 2004, although since then there has been a steady decrease every year.

As another ITER contribution, please remember that a scientist from NIFS puts in quite a bit of effort serving as a member of the Science and Technology Advisory Committee of the ITER Council.

- **Did the theory and data analysis division strengthen its collaboration with the theory and simulation department and also its collaboration with tokamak research?**

The collaboration efforts of the Theory and Data Analysis Division with the Department of Simulation Science, with the LHD experimental program, and with tokamak research have all been enhanced during the past four years.

In the organization chart of the three simulation projects of the Department of Simulation Science, scientists from the Theory and Data Analysis Division are integrated throughout this framework.

The establishment last year of the LHD and Magnetic Confinement Simulation Project as one of the divisions within the Department of Simulation Science has definitely served to strengthen theory connections with the LHD experimental program.

It is of interest to note that three of the six leaders for the LHD experimental research theme areas are actually theorists. One of them presented an excellent invited talk about LHD experimental results and their theoretical interpretation at the recent APS Division of Plasma Physics Annual Meeting (November 2007, Orlando).

The theory/simulation research on, for example, anomalous confinement, energetic particle physics, and edge physics definitely overlap with tokamak research. The work on comparing the physical mechanisms for turbulent heat transport in tokamaks and helical systems is quite interesting.

Also, I think that the bilateral collaboration with Tsukuba University that compares ExB sheared flow and internal barrier formation in linear and toroidal confinement devices is quite interesting.

According to the organization chart for the Department of the LHD Project, each of the divisions within this Department has both a director and a deputy director—except the Theory and Data Analysis Division. For the sake of efficient operation of this division and the planning of its research program, I would recommend the appointment of a deputy director.

- **Were new diagnostics developed, including those applicable to ITER, through NIFS efforts and also through outside collaborations?**

To repeat:

- A new two-color far-infrared interferometer was developed for use on LHD (and possibly on ITER).
- In collaboration with Kyushu University, NIFS has proposed a polarimeter system for ITER.

大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価

評価者：ジェームズ W. ヴァンダム

1. 核融合プラズマの科学的理解を促進する世界をリードする研究が行われたか。

評価に先立って：

NIFS は3件のミッション説明を明確に提示した。LHD プログラムはいくつかの主要課題に注意深く着目しており、よって研究目的は的確に整備されている。

近年において、NIFS 及び LHD プロジェクトのプログラム・計画・実施は様々な文書（例：中期目標、中期計画、年度計画、及び年度実績報告書等）の中で詳細に記述され、様々な評価機関（年度外部評価委員会や文部科学省評価委員会による年次評価）がこれらを精査してきた。これらの文書及び評価は、NIFS のプログラム・計画・実施能力が透明性と説明責任に則って、一般に公開されていることを確約するものである。

外部評価委員に対する LHD 発表が、委員に提出された質問に関する情報を提供する形で構成されていたことに感謝したい。

・ プラズマ性能は向上したか。

近年の実験サイクル期間中、非常に目覚しい進歩が見られ、LHD におけるプラズマ性能は大きく飛躍した。イオン温度や密度、電子温度、体積平均ベータ、また、放電時間といったプラズマパラメータも、全て過去の記録を塗り替えるレベルまで更新された。例えば、4.5%以上の平均プラズマベータ値がプラズマ放電中に達成され、エネルギー閉じ込め時間の100倍を超えた。LHD の貯蔵エネルギー（これまでの最高は1.4MJ）も、現在は、大型トカマクのそれに匹敵する。定常運転実現への可能性が実証されている。

・ 核融合実現に向けたトロイダルプラズマの理解を促がす学術研究が行われたか。

近年 LHD 実験で達成された重要項目の一つに、内部拡散障壁の発見がある。これにより、超高密度プラズマ生成への突破口が開かれた。同概念に基づくヘリカル核融合炉研究を正当化する大変有望な成果を生み出した。

他に、最近の LHD 実験ハイライトとして、プラズマ中心に存在する不純物ホールの発見とトロイダル回転の観察（高イオン温度と一致）が挙げられる。不純物ホールは、ヘリカル装置にとって非常に好ましいものであり、不純物は閉じ込め性能の上昇に連れて、中心に集まる傾向があるトカマクに生じるものとは対照的である。

(国際共同研究の一環として) 帯状流を伴う乱流輸送の理解に関する貴重な理論・実験研究が LHD で行われた。NIFS 研究者は、2006 年 APS-DPP 会議の席で、本課題について素晴らしいレビュー(概要)講義を行った(偶然にも同会議で日本人研究者として初のレビュー講義でもあった)。

LHD 放電期間中に MHD 不安定性が観察されているにも関わらず、プラズマ性能にはほぼ何の影響も与えておらず、非常に興味深い。これは、ヘリカルシステムの優良さを証明するものである。

LHD 研究成果の説明概要は、NIFS ウェブサイトに掲載されており、随時更新される。

2. 研究支援：

・ 加熱システム、計測、及び設備アップグレードといったハードウェアの維持・改良

LHD の外部加熱電力は、飛躍的に上昇し、特に中性粒子ビーム入射(現在は全 21MW)の成果は目覚ましい。主な加熱向上は、2005 年度に追加投入された NBI4 号機(40keV、垂直入射)によって実現した。本装置は増強により入射電力が倍増した(7MW)。結果、中心イオン温度及びプラズマベータ値は、LHD で新記録を更新した(それぞれ 5.2keV ; 5%)。

ヘリカルコイルのサブ冷却によって、軸上の磁場強度も向上し、その結果、軸上の電子温度上昇にもつながった(10keV)。これは、高密度運転時の内部拡散障壁を発生させるのに効果的な電子サイクロトロン加熱にとっても有益である。

荷電交換分光装置計測システムの改良は、LHD イオン温度の時間・空間分解計測の向上をもたらした。

近年実施された LHD のハードウェアアップグレードに関しては、マシン性能増強という観点から、利益をもたらしたことは間違いない。

・ 研究プログラムを推進するための双方向型共同研究の実施

NIFS の共同研究プログラムは、3つのサブプログラムから構成されている。一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究である。サブプログラムごとに予算が配分され、明確な焦点が定められている。双方向型共同研究に関するテーマと研究数は、過去 4 年間で毎年増加しており、2007 年度の増加は、ことさらに注目に値する(2006 年度と比較した場合)。NIFS は、近年九州大学の新環状トラス設備準備に携わっており、これも増加要因の一つであると考えられる。

LHD 発表の 10～11 ページにあるデータを比較してみたところ、NIFS の双方向型共同研究には、日本国内で核融合研究活動に従事する全 157 大学・研究機関のうち、62 大学・機関が参加していることに気付かされる。非常に包括的である。

双方向型共同研究には、重要な LHD 研究プロジェクトも何件か含まれている。一例を挙げると、筑波大学との共同研究によるジャイロトロン開発と構築が挙げられる。

3. NIFS は、大学の研究プログラムに貢献する大学間共同研究を推進したか。

NIFS 大学共同利用研究は、LHD プロジェクト成功への有益な貢献という観点で効果を上げている。一例を挙げてみると、改良閉じ込めにおけるエッジ径方向電場の重要な役割に関する調査研究があり、筑波大学、京都大学と共同で行われている。

LHD 実験データへのアクセス、定期的なビデオ会議、そして SINET3 を駆使した遠隔参加など、これら全てが上記共同研究の円滑運営に役立っている。

LHD 実験研究テーマ分野 10 件のうち、6 件の分野で所外研究者が実験リーダーを務めていることは注目に値する。（しかしながら、サブリーダーに所外研究者はいない。）

4. （国際共同研究を含め）LHD は、核融合科学の COE として効果的に機能していたか。

NIFS が世界のヘリカル・ステラレータ研究において、COE であることは疑う余地もない。本見解は、以下のとおり裏付けられる。

- LHD は、世界最大・最良のヘリカル実験施設であり、傑出した成果を上げている。
- LHD は、素晴らしい出版記録を誇っている：2004 年は 327 件の論文、2005 年は 203 件、2006 年は 287 件、2007 年は現在までのところ 129 件。
- LHD の成果は、過去 7 年間に開催された主要国際会議において、常に注目招待講演としての発表に選ばれてきた。（例：2004 年、2006 年の IAEA 核融合エネルギー会議、他）
- 近年では、LHD は専門誌 *Nuclear Fusion* 3 号分で表紙画像に使用された。

国際協力研究について、以下のことに注目したい：

- NIFS は、過去 4 年間で政府間核融合協定に加え、自ら率先して様々な国際研究機関と核融合研究協定を結んだ。過去 4 年で新たに結ばれた海外研究機関との科学協定は、8 件にのぼる（2007 年の 3 件を含む）。最新の政府間核融合協定は環状プラズマに関する IEA 実施協定である。
- NIFS は、一連の日米ワークショップ他、国際会議主催に非常に積極的である（国際土岐コンファレンス、各種 IAEA 技術会議、PET 会議、LAPD 計測会議、他）。

- NIFS は、国際ステラレータ／ヘリオトロン作業部会のリーダーである。その関連でヘリカルシステム閉じ込めデータベースに関しても（マックスプランクプラズマ物理研究所とともに）共同主催を勤めており、統合輸送コードの開発に率先して乗り出している。
- 国際共同研究の例として、NIFS は4つのヘリカル装置（LHD、CHS、ヴェルデンスタイン、スペインのステラレータ）において、コア電子ルート閉じ込めに関する電子温度プロファイルの新古典輸送解析結果を比較するというプロジェクトに参加した。

上記の他、個人的に核融合アーカイブ室（2005年1月）の設立を評価したい。このような一面でも、NIFS は核融合科学分野で国内外 COE としての役割を果たしている。

また、広い交流を目的としたオープンハウスについても高く評価したい。

5. LHD は、学際的研究を上手く実施したか。（2004～2009 年度中期計画）

NIFS は、国際的・学際的研究の基盤構築のため、自然科学研究機構の活動内で国際戦略本部会議／国際連携室、及び研究連携委員会／研究連携室に参加してきた。LHD 国際共同実験計画（LIME）について、もう少し伺ってみたい。

6. LHD は、人材育成に寄与してきたか。

大型ヘリカル研究部は、総合研究大学院大学を通じて、過去4年間のうち、14人の博士号実習生を輩出した。うち6人は、外国人学生であった。博士号取得者の卒業年度、及び卒業後の就業先について、記録しておくことをお勧めしたい。

LHD スタッフの変遷（例：退職者、就業者等）に関する情報があれば望ましい。

NIFS で学ぶ提携大学の学生研究者数は、ここ12ヶ月で若干ではあるが減少した。提携大学（外国の大学も含め）を増やす事により、学生の移動性を高めるというNIFS の計画は賞賛できる。

7. NIFS 中期計画を考慮した上で、今後の研究に関する LHD 計画は適切か。

今後の実験計画には、（1）加熱パワー増加を含む LHD の設備アップグレード、及び（2）重水素実験が掲げられている。これまで LHD で達成された目覚ましい結果を考慮すれば、双方とも適切である。

LHD 設備のハードウェアアップグレードに際し、実験研究の運転性を不用意に削減することなく、同アップグレードが資金的に支援されることを願う。

将来計画にはまた、ヘリカル核融合炉の準備研究への注目も含まれる。核融合発電の実現を 2035 年に据えるのは、大変挑戦的ではあるが、その情熱は賞賛に値する。FFHR ヘリカル炉—超高密度炉心プラズマ運転に基づく核融合炉—が、ペレット燃料によって制御可能となり、自己発火カーブの熱的に不安定な側に発火点を持つということは、非常に興味深く、また斬新である。LHD 炉の研究はヨーロッパで進められている Fast Track Approach と似通っている。

8. 2004 年度外部評価委員会及び 2005 年度組織検討委員会で指摘された問題には、適切に取り組めたか。特に：

- ・ **実験に関しては、所員及び共同研究者の意見を聞き、ITER への寄与が明確なテーマを選択したか。**

これまでの LHD 研究プログラムテーマ及び活動は適切で、また、生産的である。LHD 上の各種研究プロジェクト間でマシンタイム割り当てを見てみたい。

ITER に特化した貢献も言及された。NIFS 研究者は、スタートアップフェイズの ITER リミッタへのパワーロードを解析した。LHD（及び可能であれば ITER）で利用するため、新たな 2 色赤外干渉計が開発された。九州大学との共同研究により、NIFS は ITER 用偏光計システムを提案した。

磁場強度向上のための超伝導コイルサブ冷却を経験した LHD は、現在同様のオプションを検討している ITER にとっても、興味深いところだろう。また、LHD でショットごとに大量のデータを取り扱った経験も、ITER 遠隔参加に関連性があると思われる。

NIFS 研究者は、積極的に ITPA 国際トピカルグループ会議に参加している。また、NIFS は ITPA 活動へ日本から貢献するものとして、各種会議を主催している。加えて、LHD はいくつかの ITPA データベースにもデータを提供している。LHD の ITPA への貢献は、トカマクとヘリカル／ステラレータ成果を比較するのに非常に有益であることから、重要なものである。

ITPA に参加した NIFS 研究者数は、以後減少し続けているものの、2004 年に大きく増加した。

その他 ITER 関連の貢献について、NIFS 研究者が ITER 科学技術諮問委員会の委員として少なからず尽力していることをご記憶願いたい。

- ・ **理論・データ解析研究系は、理論・シミュレーションとの連携を強め、トカマクとの連携を強化したか。**

理論データ解析研究系のシミュレーション科学研究部、LHD 実験グループ、及びトカマク研究との連携活動は、過去 4 年間でどれも強化された。

シミュレーション科学研究部の3大シミュレーションプロジェクトに関する組織図には、理論・データ解析研究系の研究者が同体制の至る場所に組み入れられている。

シミュレーション科学研究部内の研究系として、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系が昨年設立され、LHD 実験グループとの理論連携を強化するのに大いに役立った。

LHD 実験研究テーマグループについて、6人のリーダー中3人が現実的に理論研究者であることを言及しておきたい。彼らのうち1人は、近年のアメリカ物理学会プラズマ物理分科会（APS-DPP）年会（2007年11月、米国オーランド）の場で、LHD 実験成果及びその理論的解釈について、素晴らしい招待講演を発表した。

例えば、異常閉じ込め、高エネルギー粒子物理、境界物理に関する理論・シミュレーション研究は、明らかにトカマク研究と重複している。乱流熱輸送のトカマクとヘリカルシステムにおける物理メカニズム比較研究は、非常に興味深い。

また、線形・トロイダル閉じ込め装置における $E \times B$ せん断流及び内部拡散障壁形成を比較する筑波大学との双方向型共同研究も非常に面白い。

大型ヘリカル研究部の組織図によれば、理論・データ解析研究系を除き、部内の各研究系には、研究主幹及び副研究主幹が配置されている。理論・データ解析研究系に関しても、効率的な運営及び研究プログラムの計画という点から、副研究主幹の任命をお薦めしたい。

- ・ **ITERに適用可能なものを含め、所内外の共同研究を通して、新たな計測装置は開発されたか。**

繰り返しになるが、

- ・ LHD（及び可能であればITER）で利用するため、新たな2色赤外干渉計が開発された。
- ・ 九州大学との共同研究により、NIFS は ITER 用偏光計システムを提案した。

Peer Review Report on Large Helical Device (LHD) Research

Reviewer: Thomas Klinger

The following perspectives consist of factors inevitable to make reviews for the LHD research that was addressed in the Mid-term Plan determined by the National Institutes of Natural Sciences, the Inter-University Research Institute for which the National Institute for Fusion Science, the National Institutes of Natural Sciences are responsible. They are formulated in accordance with the achievement reviews and reviews for the research standard.

The perspectives [1] to [4] refers to the articles addressed in the Mid-Term Plan, and [5] and [6] are those relative to the plan.

[1] By achieving things written below, did we succeed in a academic systematization and also produce outstanding results that led the world in the field of nuclear fusion science as well as in the fields like plasma physics and fusion engineering that are the basis of nuclear fusion science to actualize the fusion energy?

Yes. NIFS could stabilize its position as one of the leading research institutions for nuclear fusion sciences and the related physics and engineering disciplines.

(1) Did we succeed in enhancing the plasma performance to see through the nuclear fusion core plasmas?

Yes. The heating power of LHD was recently much increased (see below). The plasma performance parameters thus achieved during the 10th experimental campaign are quite impressive:

$T_i=5.2\text{keV}$ (in the improved mode of reduced ion transport)
 $T_e=10\text{keV}$ (at relatively low densities of $n_e=3\cdot 10^{18}\text{m}^{-3}$)
 $n_e=1\cdot 10^{21}\text{m}^{-3}$ (with pellet fueling, local island divertor and internal diffusion barrier)
 $\beta\sim 5\%$ (quasi steady-state; at reduced field 0.425T)
 $P_{\text{heat}}=1\text{MW}$ for $\sim 500\text{s}$ long pulse discharges (900kW ICRH)
 $P_{\text{heat}}=600\text{kW}$ for $\sim 55\text{min}$ long pulse discharges (377kW ICRH and 110kW ECRH)

These are several world record values for stellarators and (partly) for fusion devices in general. This makes LHD being one of the leading fusion devices world-wide. Up to now, however, peak performance is achieved only in distinctively different discharge scenarios.

Recommendation: The further development of the device and the scientific program should try to integrate the different scenarios associated with the above peak performance values. Only an integrated high-performance discharge scenario will be able to pave the way to fusion power.

(2) Did we properly carry out the academic scientific research for the comprehensive understanding of torus plasmas and the actualization of nuclear fusion core plasmas?

Yes. Remarkable progress has been made in the understanding of the above mentioned discharge scenarios. Most important work is done on zonal flows in plasma turbulence, a key topic in current plasma research. Here significant progress in the understanding of the physical mechanism determining the turbulent transport in the presence of zonal flows was made. Valuable work is also done on plasma-wall interaction and neoclassical transport analysis.

[2] To carry out the perspective [1], did we perform the following?

(1) Did we properly carry out the maintenance and intensification of heating devices as well as diagnostic devices and the improvement of devices?

Yes: After the recent upgrade of the 12.3MW tangential NBI injector system with a 40keV 7MW perpendicular injector, the total heating power of LHD could be increased to more than 20MW (including ECRH and ICRH). In addition, the ICRH antennas were improved and an important sub-cooling system (inlet temperature decreased from 4.4K to 3.2K) was installed, allowing for higher magnetic field. On the diagnostics side, a much improved charge exchange recombination spectroscopy (CXRS) was installed.

Recommendation: Much time and efforts were invested in the heavy ion beam probe for LHD. It seems the diagnostic is basically in operation but has not yet the status of a routine tool. This should be one element in the further development of LHD diagnostics. Furthermore, the necessary detailed design work for a closed helical divertor should be in the focus of device enhancement, since a (non-local) divertor solution with acceptable heat load is absolutely inevitable for a future fusion power plant based on the stellarator principle.

(2) Did we properly carry out the research to elucidate the physical organization necessary to improve the plasma performance as a bilateral collaborative research by organically utilizing devices and equipments of various research institutes, universities, university research institutes, and research centers?

Partly yes: It is not at all straightforward to define topics of relevance for LHD that can be directly addressed on other devices in universities and other research institutions. A good example is the H-mode research done on Heliotron-J at Kyoto-university. Perhaps more could be done in the area of turbulence research, e.g. with linear laboratory devices like the one in Kyushu-university, where already collaborative work on plasma-wall interaction is done. Another positive example is the gyrotron development at Tsukuba university, which allows the Japanese academia to maintain and to expand the know-how in this field. In any case, LHD greatly benefits from the broad and healthy academic environment provided by the Japanese universities involved in LHD operation.

Recommendation: The collaborative research with other research institutes, especially with the Japanese universities should be extended wherever promising fields of common interest can be identified. In particular, jointly supervised Ph.D. projects could form the backbone of collaborative research, taking into account the limited university resources in professional staff. This would be healthy also for the promotion of young researchers (see below).

[3] Did we properly carry out the inter-operation and collaborative research by obtaining more active participation from various research fields including the participation of those researchers who study subjects other than nuclear fusion? Accordingly, did we successfully prepare the environment? Also, did we successfully contribute to the research development of universities?

This is difficult to say: It is evident that a dense network of universities (bilateral collaboration) and other large-scale research institutions (NINS) has formed. This should be a good breeding ground for joint activities. A very positive example is the development of cryo-targets for ICF done by the NIFS cryo group, where the know-how obtained with pellets could be used. Also in the diagnostics area, there are first joint activities with ILE Osaka, which seem to be very promising.

[4] Did we successfully play a role as COE? Moreover, did we also play a role as COE in a global sense through international collaborative research and contributions?

Yes: Taking into account the 100-200 ISI-listed publications per year, taking into account the high visibility of LHD as a research device, taking into account the remarkable presence on international conferences, NIFS clearly has established as a COE. The LHD is well embedded into the international network of fusion research, NIFS clearly plays a role as a COE on the international level.

Recommendation: The international visitor's program of NIFS seems to be quite successful but could also be extended, taking into account the scientific capacity of LHD.

[5] Did we successfully function as an origin for the academic scientific transmission that can also transmit to the research fields other than nuclear fusion?

Partly yes: It is extremely difficult to make a concise assessment of 'spill overs' from nuclear fusion research. It is clearly a high-technology area that fosters the development of new solutions in many related fields, both engineering and science. To pin down exactly the areas where other research fields take a benefit from nuclear fusion research is not at all simple. (NB: A study on spill-overs from nuclear fusion research is conducted by the EPFL CRPP Lausanne in the framework of a Ph.D. thesis.) Obvious areas are materials sciences, optics, cryogenics, data processing.

[6] Did we successfully contribute to the fostering of human resources who would play an active part in an international situation?

Yes: The LIME fund and its successor have contributed to a great deal to the exchange of researchers between the fusion laboratories world wide. There is a certain tendency of having/sending fewer persons but for a longer period, which is probably the right move since the relatively complex devices require a significant overhead time until scientifically meaningful results can be obtained. In the area of promotion of young scientists, the number of Ph.D. students could be higher (30-40 would be a good number).

Recommendation: The international exchange of professional staff should be continued or even intensified. NIFS should consider to conduct more Ph.D. projects jointly with university groups, for example by awarding “NIFS Ph.D. fellowships”. A useful tool would be to organize dedicated (international) graduate research schools with a well-defined curriculum: The Max-Planck Society has now established about 40 “International Max-Planck Research Schools” with a very positive outcome. Also an internationally visible post-doc fellowship program could be helpful.

[7] Is our future research plan proper? Especially, is the perspective of the mid-/long-term plan that was drafted toward the actualization of a desired target value properly taken into consideration?

Yes: Significant steps were made to improve the performance of LHD and to keep its role as one of the major fusion research devices in the world (LHD is the leading stellarator device anyhow). Especially the NBI heating power capacity is now adequate. It is planned to operate with Deuterium in future, which is a sensible step taking into account the better heating efficiency and the better confinement properties (“isotope effect”).

Recommendation: The final design and development of the closed helical divertor should be started as soon as possible. It is not necessary to wait with the installation of a closed helical divertor until the clearance for Deuterium operation has been obtained. A closed, heavily pumped helical divertor will be in general of great benefit for LHD operation and performance, as the (pumped) local island divertor has impressively demonstrated already. More ECRH/ICRH heating power would be useful, too, especially for the necessary development of high-power steady-state operation. Finally, as already mentioned above, the different discharge scenarios should be integrated in order to achieve the different figures of merit simultaneously in the same plasma.

[8] Besides the above described perspectives, did we properly resolve the issues pointed out in the 2004 Peer Review?

As I’m a member of the peer review committee since 2006 only, this question cannot be properly answered.

I have, however, a few comments: Diagnostics development, the physics of three-dimensional toroidal systems, research on turbulence and transport; these research and development areas of NIFS will make a contribution to the international ITER project. In particular LHD can explore new regions of the parameter space being not limited by the Greenwald criterion (i.e. very high densities) and having a lot of flexibility in the magnetic configuration. The NIFS staff is extensively trained on LHD and will be ready to play an important role in the later exploitation of ITER. However, it must be noted that stellarators form a viable alternative to the tokamak concept; ITER is still an experiment and high-technology research needs concept varieties. In that sense, the stellarator has an important meaning on its own. LHD is currently the flagship of world-wide stellarator research.

大型ヘリカル装置（LHD）研究に関する評価

評価者：トーマス クリッガー

下記外部評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が責任を有する LHD 研究の評価に必要不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

〔1〕～〔4〕は、中期計画に記載されている事項で、〔5〕〔6〕は、関連したものとなっている。

- 〔1〕 核融合エネルギーの実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、下記事項を達成することなどにより、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることができたか。

はい。NIFS は、核融合科学及び関連物理・工学分野の代表的研究機関として、その地位を確立したと言える。

- （1） 核融合炉心プラズマを見通すことを目指して、プラズマの高性能化を図ることができたか。

はい。LHD の加熱電力は、近年非常に向上した（下記参照）。よって、第 10 サイクル実験期間中に達成したプラズマ性能パラメータも大変素晴らしい。

$T_i=5.2\text{keV}$ (イオン輸送の改良モード)

$T_e=10\text{keV}$ ($n_e=3\cdot 10^{18}\text{m}^{-3}$ という比較的低密度状態で)

$n_e=1\cdot 10^{21}\text{m}^{-3}$ (ペレット燃料、ローカルアイランドダイバータ、及び内部拡散障壁)

$\beta\sim 5\%$ (擬似定常；弱磁場 0.425T)

$P_{\text{heat}}=1\text{MW}$ ～500 秒 長時間放電 (900kW ICRH)

$P_{\text{heat}}=600\text{kW}$ ～55 分 長時間放電 (377kW ICRH 及び 110kW ECRH)

これらの中には、ステラレータ及び一般的な核融合装置の一部において、世界記録レベルの数値となるものもあり、結果、LHD も世界トップの核融合装置に認識されている。しかしながら、現時点まで、ピーク性能はそれぞれ異なった放電環境においてのみ達成されている。

推奨：装置及び科学的プログラムの今後の開発にあたり、上記ピーク性能値に関連した複数シナリオの統合を心掛けたい。統合された高性能放電環境でしか核融合電力への道は開かれない。

- （2） 環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を進めることができたか。

はい。前述の放電シナリオ理解において、目覚しい進歩がみられた。最も貴重な功績は、プラズマ乱流中の帯状流の研究でなされており、現代プラズマ研究のキー課題である。ここにおいて、帯状流の存在する環境下における乱流輸送を決定する物理メカニズム理解について、目を見張る進展があった。また PWI 及び新古典輸送解析においても価値ある功績がみられる。

〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

（1） 加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進めることができたか。

はい。12.3MW 接線 NBI 入射システムに 40keV/7MW 垂直インジェクタが追加され、LHD の全加熱電力は（ECRH/ICRH を含め）20MW 以上に増大した。加えて、ICRH アンテナが改良され、重要な過冷却システム（入口温度が 4.4K から 3.2K に降下）もインストールされたことにより、より高い磁場が可能になった。計測サイドでは、大幅に改良された荷電交換分光装置(CXRS)がインストールされた。

推奨：重イオンビームプローブに多くの時間と労力が投入された。計測は基本的に稼動していると思われるが、まだ常駐ツールの域には達していない。これは今後の LHD 計測発展における一要素であろう。さらに処理可能な熱負荷をもつ（非局所的）ダイバータは、ステラレータ原理に基づいた将来の核融合発電炉において絶対的必須であるから、閉ヘリカルダイバータの適切な詳細設計作業も装置向上の焦点に含まれるべきである。

（2） プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明などを、研究所や大学・附属研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進めることができたか。

部分的にできている。大学や他研究機関の装置に直接適用できる LHD 関連トピックを見つけることは非常に難しい。良い例としては京都大学の Heliotron-J で実施された H-モード研究である。例えば、PWI に関して共同研究が進められている九州大学のような線形実験装置を用い、乱流研究の分野において、おそらくは更に多くを達成できるだろう。他の例を挙げるとすれば、日本の大学がこの分野のノウハウ維持・発展させるであろう筑波大学のジャイロトロン開発が挙げられる。何れにせよ、LHD は LHD 運転に参加する日本の大学が提供する広域で健全な学究環境から、大いに恩恵を受けている。

推奨：どの注目分野に共通関心を見出すにせよ、他研究機関、特に日本の大学との共同研究は拡大されるべきだろう。その中でも、共同で博士教育を行う制度があれば、大学側の限られた専門職員人材を考慮すれば、共同研究の中軸を形成し得ると思われる。これは若手研究者育成という面からも有益になるだろう。（下記〔6〕参照）

〔3〕 核融合分野以外の研究者をも含めた幅広い分野からのより一層の参画を得て共同利用・共同研究を適切に進められたか。そのために環境を整備することができたか、また、大学の研究発展にも寄与できたか。

これは判断が難しい。大学（双方向型共同研究）及び他の大規模研究機関（自然科学研究機構）との密接なネットワークが形成されたのは明白である。これは、共同活動の発展に最適な環境だと思われる。格好の一例に NIFS 低温グループによる ICF 低温ターゲット開発があり、ペレット使用から得たノウハウが生かされている。また、計測分野では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターとの初共同研究が始められ、この先の展開が待ち望まれる。

〔4〕 COE としての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にも COE としての役割を果たすことができたか。

はい。毎年 ISI で紹介される 100～200 件の論文、LHD の研究装置としての高い可視性、及び国際会議への非常に活発な参加などを踏まえ、NIFS は、COE としての地位を確立したと言える。LHD は核融合研究の国際ネットワークにも深く浸透しており、NIFS は国際レベルで COE としての役割を果たしている。

推奨：NIFS の海外訪問者プログラムは、大変素晴らしいものだと思うのだが、LHD の科学面での規模を考えると拡大の余地もある。

〔5〕 他分野へも発信できる学術発信拠点となりえたか。

部分的にはできている。核融合研究からの『スピルオーバー（波及）』を簡潔に評価するのは大変難しいのだが、数多くの関連工学・科学分野で新たな解決手法の開発を促す高度技術分野であることは間違いない。核融合研究から恩恵を受ける他の研究分野をはっきり特定するのは容易でない。（NB：核融合研究からの波及に関する研究は、ローザンヌ高等工科大学プラズマ物理研究センターにおいて博士論文の枠組みの中で行われている。）明白な分野としては、物質科学、光学、低温学、及びデータ処理などが挙げられる。

〔6〕 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

はい。LIME 基金及びその後継は、世界各国の核融合実験所間で研究者の交流に大いに貢献してきた。長期間派遣（受け入れ）される人員が少ないように思われるが、複雑な装置は科学的に有意義な成果が導き出されるまで相当な準備期間を必要とすることから、これは妥当な動きだと思われる。若手科学者の育成分野では、博士課程の学生数が若干多くてもいいように思われる。（30～40 人が妥当だろう。）

推奨：専門家の国際交流は、継続、できるなら強化が望ましい。NIFS は、例えば「NIFS 博士号奨学金」を設けるなどして、大学グループと共同で更なる博

士教育プロジェクトの遂行を考慮すべきだと思われる。有益な方法として、明瞭なカリキュラムに沿った専門（国際）大学院研究スクールの組織などが挙げられるだろう。Max-Planck ソサエティーは現在 40 校におよぶ Max-Planck 研究スクールの設立し、非常に建設的な実績を築いている。また、国際的に明瞭なポストドクトラルプログラムも有効だろう。

〔7〕 今後の研究計画は適切か。特に、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えたものとなっているか。

はい。LHD 性能の向上、及び同装置の世界の主要核融合研究装置としての役割維持（LHD は主要ステラレータ装置である）のため、目覚しい前進が見られた。特に LHD 加熱電力容量は、現在十分な需要を満たしている。LHD は将来的に重水素での運転を視野に入れており、より高い加熱効率及び閉じ込め性能（「アイソトープ効果」）を考慮した聡明な措置である。

推奨：閉ヘリカルダイバータの最終設計及び開発にできる限り早く着手されたい。重水素運転の許可が得られるまで、閉ヘリカルダイバータの導入を待つ必要はない。強力な排気性能を持った閉ヘリカルダイバータは、ローカルアイランドダイバータが既に印象的に実証したとおり、一般的に LHD 運転及び性能に大きな恩恵をもたらすものと思われる。更なる ECRH/ICRH 加熱電力向上も、求められるハイパワー一定常運転開発にあたって、取り分け役に立つだろう。最後に前述にもあるとおり、同じプラズマで同時に異なるフィギュアオブメリットを達成するために、複数の放電シナリオは統合すべきである。

〔8〕 上記観点に挙げられているものを除き、平成 16 年度の外部評価で指摘された事項について適切に対応したか。

私は 2006 年以降の外部評価委員であるため、この質問には的確に答えられない。

しかしながら、多少意見を述べさせていただきたい。計測開発・3 次元トロイダルシステム・乱流と輸送の研究、NIFS に於けるこれらの研究・開発分野は、国際 ITER プロジェクトに寄与するだろう。取り分け LHD は、グリーンワールド制限が無く（つまり超高密度運転可能）、また、磁場構成に十分な柔軟性をもつパラメータスペースの新領域を開拓できる。NIFS 職員は、LHD に関して幅広く指導されており、後の ITER 実施においても重要な役割を担える状態にある。しかしながら、ステラレータがトカマク概念に対して実行可能な代替案となり得ることを強調しておきたい。ITER は、未だ実験段階であり、高度技術研究には概念の多様性が求められる。つまり、ステラレータはそれ自体重要な意義を持っていることになる。LHD は、現在世界のステラレータ研究において、頂点に位置づけられている。

Peer Review Report on Simulation Research

Reviewer: James W. Van Dam

1. Was world-leading research performed that advanced the scientific understanding of fusion plasma behavior?

The Department of Simulation Science at the National Institute for Fusion Science is the largest group in Japan—and one of the largest in the world—that performs simulation and theoretical research to understand the behavior of high-temperature fusion plasmas. When the research activity of the Theory and Data Analysis Division, organizationally situated within the Department of Large Helical Device at NIFS, is additionally taken into account, it may indeed be said that NIFS has the largest concentration of theory/simulation scientists among all international fusion institutions.

The research being done by the Department of Simulation Science is of very high quality. My own institute at the University of Texas highly appreciates its fruitful collaborations with NIFS simulation scientists.

In the area of magnetic confinement, several examples of excellent work are gyrokinetic-Vlasov simulations of turbulent transport, nonlinear simulations of energetic particle physics, pellet ablation studies, two-fluid macro-instability simulations with incorporation of micro-turbulence effects, development of a very high-resolution MHD code, and edge plasma simulations. In my opinion, the first two of these research efforts are definitely world-class work, and the others are of high quality.

In the area of frontier simulations, the work on fast ignition simulations for laser fusion and the work on collisionless reconnection are of high quality. In addition, there are smaller research efforts on plasma-material interaction simulations and blob transport simulations. Also, NIFS is a leader in virtual reality simulations by default since I am unaware of any other fusion laboratory in the world that has a program in this area.

The considerable progress that has been made in simulation science at NIFS in recent years is evident when I look back at the presentations and the report for the External Peer Review Committee Meeting held in 2004, when the simulation program was previously reviewed. One indication of this progress is the list of publications during the past four years, showing that 233 papers were published, which is excellent. Also noticeable during the past four years is the continued increase in the direct application of simulations to understand and explain experimental results, which is commendable. The simulation studies of super-dense core plasmas and internal diffusive barrier are very relevant for LHD. I also applaud the simulations that are specifically done for understanding the physics of burning plasmas. Compared to four years ago, I am glad to see a number of recent publications related to the NIFS virtual reality system.

The research, organization, and facilities of the Department of Simulation Science are well described on its web site, which is being kept up to date.

2. Institutional structure: Did the organizational changes enhance research and operation?

Several significant changes in the NIFS organizational structure have occurred in recent years. The effect of these changes has been positive.

Most significantly, the former Theory and Computer Simulation Center and the former Computer and Information Network Center were unified into one entity, the new Department of Simulation Science, on April 1, 2007. I congratulate NIFS on the establishment of this new Department. A special event, called “A Commemorative Symposium on Simulation Science,” was held September 6-7, 2007, at the Ceratopia Conference Center in Toki in order to mark the occasion of the founding of this new Department. (I attended this special symposium and enjoyed it very much.)

Moreover, the Department of Simulation Science has a detailed internal structure. It is organized into two divisions and a center. The two divisions are for magnetic confinement research and frontier fusion studies, respectively, and each of these two divisions is further organized into projects and sub-projects. The center is off-site, being located at Rokkasho in Aomori. In addition to its internal structure according to two divisions and a center, the Department also has set up two facility-related working groups, one on computers and another on networks.

Also, NIFS re-organized the Department of Administration in 2006. The new Visitors Office now handles all visitors—those from other Japanese institutions, those from private industry, and those from international institutions. This new office centralizes services and makes it easier for visitors to receive whatever assistance is needed. Also, within the Department of Administration new divisions were established to handle institutional planning and reviews (of which there have been many in recent years).

In addition, NIFS established a new Fusion Engineering Research Laboratory for collaborative research in July 2007. (This building formerly housed the Fusion Heating Laboratory.) The Fusion Engineering Research Laboratory carries out studies on blanket materials, technology innovations, and particle beam engineering.

All of these organizational changes have served to emphasize and enhance simulation research, fusion engineering studies, and administrative operations.

3. Did NIFS promote inter-university research collaborations that contributed to the advance of large-scale plasma simulations?

NIFS has a well-structured framework of three types of inter-university research collaborations: namely, General Collaboration Research, LHD Collaboration Research, and Bilateral Collaboration Research. The NIFS collaborations in simulation science primarily fall into the first of these categories, which is the largest in terms of research projects (331) albeit the smallest in terms of funding (presumably since the other two categories involve expensive experimental hardware). Some of the LHD-specific and magnetic confinement simulation collaboration projects are supported through the LHD Collaboration Research category.

The Department of Simulation Science actively participates in the Japanese modular integrated code development project called TASK. This is an excellent example of inter-university research collaboration with a national scope.

Another good example is the research collaboration on integrated simulations of implosion dynamics, laser-plasma interactions, fast electron transport, and core heating in laser fusion. This effort at NIFS is carried out through a Bilateral Collaboration with Osaka University.

The inter-university collaborative nature of the three main simulation projects at NIFS is clearly evident from the organization chart for these projects, which shows that scientists from the Department of Simulation Science work hand-in-hand with simulation scientists from the LHD Theory and Data Analysis Division and with simulation scientists from outside universities and laboratories (both in Japan and elsewhere).

4. Did NIFS successfully function as a Center of Excellence for simulation science (including international collaborations)?

Yes, in my opinion, NIFS has been functioning successfully as a Center of Excellence for simulation science. Let me offer some detailed comments, first concerning “center” and then concerning “excellence.”

NIFS functions as a **center** for simulation science, as evidenced by the following:

- The Department of Simulation Science has a “critical mass” (21 professional scientists), and its size allows it to tackle a broad range of inter-related research projects.
- The Department of Simulation Science addresses research projects in a synergistic manner. In other words, there is clear evidence of collaborative work among the scientists in the Department, and the Department addresses difficult problems that require a team effort.
- NIFS research efforts in simulation science are central to inter-university collaborations that extend throughout Japan.
- NIFS simulation research is also centrally engaged in collaborations that extend around the world. NIFS has an active personal exchange program, both in hosting guest professors and researchers at NIFS and in sending NIFS scientists abroad.
- The NIFS computational facilities provide super-computer cycles for simulations performed by researchers at other laboratories and universities.
- NIFS is the largest user of the SINET3 high-speed network that comprises a virtual laboratory for fusion research in Japan.
- NIFS has played a central role in organizing and hosting a large number of national and international conferences related to simulation science (15 during the past four years). For example, NIFS organized the 19th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (July 2005).

The **excellence** of the NIFS simulation research is evidenced by the following:

- NIFS simulation scientists have been selected for numerous invited talks at prestigious international conferences (e.g., three oral invited talks at the 2004 IAEA Fusion Energy Conference in Portugal and one invited talk at the 2006 IAEA Fusion Energy Conference in China). Another outstanding example is the invited review talk on zonal

flow physics at the 2006 APS Division of Plasma Physics Annual Meeting (the first review talk ever given by a scientist from Japan at this meeting).

- NIFS simulation scientists have an excellent publication record: 37 papers in 2004, 35 in 2005, 87 in 2006, and 74 so far for 2007. Note that the number of publications has been double in each of the last two years compared to what it was before that.
- The computational facilities for simulation research at NIFS are excellent. The LHD Numerical Analysis System was updated two years ago, and the Plasma Simulator will be replaced in 2009.

I think that the recent reorganization into the Department of Simulation Science has served to enhance the NIFS role as a Center of Excellence for simulation science.

5. Through its interactions with the NINS, did NIFS successfully perform interdisciplinary research?

Two examples were cited of interdisciplinary research (via the National Institutes for Natural Science): one is the study of gravitational many-body system, and the other is the study of non-equilibrium plasma/matter physics (e.g., temperature-gradient quantum Nernst effect). Both of these investigations are presumably still in their initial stages.

Additionally, two examples were given of interdisciplinary research with industry: viz., 3D particle-in cell simulations of an argon plasma-processing device, and molecular dynamics simulations of sputtering. I recall from the 2006 Peer Review Committee Meeting that industrially relevant applied simulations are also being carried out in another department here at NIFS (Research Coordination Center).

The virtual reality system at NIFS is now communicating with other VR systems via network connections, thus comprising an extended virtual environment space for interdisciplinary projects.

It is significant that NIFS is providing leadership in organizing the International Symposium on Hierarchy and Holism (Feb 2008) through the National Institutes for Natural Science. This will provide an important opportunity for the initiation and enhancement of interdisciplinary research projects.

6. Did NIFS contribute to the development of human resources?

NIFS has an active education and training program for graduate students and young researchers. Within the Graduate University for Advanced Studies, it functions as the Department of Fusion Science and teaches its own graduate students. Also, through cooperative degree programs with other universities, it offers courses and degree programs to students. In addition, graduate students from other universities carry out thesis-related research at NIFS through collaborative research projects.

Through the Graduate University for Advanced Studies, NIFS graduated eight Ph.D. students during the period 2004-2006. Three of them were international students. I recommend keeping a record of where the NIFS simulation science Ph.D. students become employed after graduation.

It would be unfortunate if the mobility of university graduate students to do research at national laboratories (such as NIFS) were to be hampered as a result of the new status of Japanese national universities. These are excellent opportunities for students to acquire broadened experience and exposure. Hence the NIFS plans for enhancing student mobility by increasing the number of affiliated universities (including foreign universities) are commendable.

NIFS operates an annual Asian Winter school (Toki Lectures on Simulation Science) through the Graduate University for Advanced Studies. It also runs the Summer School for Young Students.

NIFS has a postdoctoral program. During 2004-2007, three young scientists who had been postdoctoral fellows in the Department of Simulation Science (one supported as a COE researcher and another as a JSPS Fellow) were hired onto the regular staff.

In terms of human resources, I also wish to take special note of the retirement of several excellent theory/simulation scientists at NIFS during the past four years: M. Okamoto (Theory and Computer Simulation Center, director); T. Watanabe, J. Todoroki, and T. Hatori (Theory and Data Analysis Division); and T. Kamimura (Computer Center, director). These scientists had outstanding scientific careers.

7. Is the DSS plan for future research appropriate, taking into account the NIFS mid- and long-term institutional plans?

For future research directions, the Department of Simulation Science will continue to pursue existing successful research projects. In addition, it will focus on some new initiatives, such as simulations for LHD deuterium experiments and also simulations for a proposed helical fusion reactor. The latter simulation project is referred to as the LHD Numerical Test Reactor. Both of these new initiatives are appropriate and should provide critical information to the NIFS experimental program for its strategic planning and future operations. One suggestion is that the fusion test reactor studies should involve not only plasma physics simulations, but also fusion engineering simulations.

The planning for a new Plasma Simulator super-computer and for upgraded networks is being led by the two working groups within the Department. I would also encourage consideration of the use of computer clusters, which are highly efficient for certain types of simulation problems and for code benchmarking, and which are relatively inexpensive.

The two purposes of simulation research at NIFS are to contribute to the understanding of plasma behavior and to promote simulation science as a new interdisciplinary field. For the latter purpose, it would be useful to establish contacts with specialists in computer science at other universities and laboratories. Such contacts can be helpful for the development of advanced algorithms for plasma simulations. The SciDAC fusion simulation projects in the US stress the usefulness of such contacts.

8. Have the issues pointed out by the 2004 Peer Review Committee and the 2005 Organization Review Committee been appropriately addressed? In particular:

- **Were the topics and activities appropriately selected for magnetic confinement (LHD) research, laser-plasma research, and plasma science research?**

The internal structure of the Department of Simulation Science mirrors its selection of research topics and activities, namely, LHD and magnetic confinement simulations, laser fusion simulations, and complex plasma simulations. The choice of sub-projects within these three main simulation projects has been appropriate. The increased emphasis on simulations for the LHD experiment has been especially commendable during the past four years.

A few observations:

- The reconnection studies have achieved impressive resolution of underlying physics. Now these studies should also develop more contact with experimental results (e.g., to validate the theoretical models against observations of reconnection and substorms in the Earth's magnetotail, coronal mass ejection, and magnetic reconnection in laboratory experiments).
- The work on integrated laser-target simulations with PIC, Fokker-Planck, and fluid codes has likewise been impressive. It would be interesting if these integrated simulations could provide positive feedback to the integrated simulations for magnetic confinement, and vice versa.
- The various "hierarchy" terminologies are still somewhat cryptic. I suspect that nomenclature such as hierarchy-renormalized, hierarchy-extended, hierarchy-integrated, multi-hierarchy, micro-hierarchy, macro-hierarchy, mono-hierarchy, and cross-hierarchy are not well understood by many international scientists. Clear, succinct definitions should be provided for each of these names, along with mapping to alternative terminology (e.g., kinetic/fluid, micro/macro, core/edge, small/large spatial scales, small/large time scales, time-dependent simulations, integrated simulations...). The terminology of "holism", which is frequently used in connection with "hierarchy" to describe the NIFS simulation program, does have a scientific meaning (cf. the Wikipedia article on Holism), although in modern society it is primarily used in a philosophical or cultural context. Perhaps the imminent International Symposium on Hierarchy and Holism (February 2008) will help clarify this situation.

- **Were the research topics appropriately selected for contributing to ITER and the Broader Approach?**

Again, the internal structure of the new Department of Simulation Science has served to increase the emphasis on research for ITER and Broader Approach. The most obvious new development here has been the recent establishment of the off-site Rokkasho Research Center, which allows NIFS to now have a physical presence on location where the Fusion Energy Research Center for the Broader Approach will be constructed in Aomori. At the moment this Center is still small (two professional staff) and its research purview limited (to network enhancements), but the Center should undoubtedly grow as the Broader Approach activities get under way. Therefore the creation of this Center is strategically laudable.

Moreover, within the magnetic confinement division of the Department of Simulation Science, the work on gyrokinetic simulations for ITG and ETG turbulent plasma transport (some of which was performed on the Earth Simulator computer) and the work on energetic particle

simulations for burning plasmas are clearly relevant to ITER. These two codes have developed techniques for parallelization, so they could eventually be run on the forthcoming Broader Approach computer. Also, the research on simulations of pellet injection should be of relevance for ITER fueling.

Programmatically, the Department of Simulation Science is involved in a number of ITER-related collaborations, which it promotes through an ITER Collaboration Committee, an ITER Research Coordinating Group, and an IFERC Project Committee. Also, NIFS simulation scientists participate in ITPA Topical Group meetings and helped write the “Progress in the ITER Physics Basis” (a massive document that was recently published in the Nuclear Fusion journal). NIFS simulation scientists participated in the first ITER Summer School (France, 2007) and will also certainly participate in the second such summer school (to be held in Japan in 2008).

Within the NIFS Department of Administration, a new ITER Liaison Office has been established.

A few observations:

- The molecular-dynamics simulations of sputtering of graphite tiles are interesting. If these studies could now be extended to more than a single hydrogen atom and then also performed for tungsten and beryllium, the results could have ITER relevance.
- The Rokkasho Research Center was able to participate remotely via internet video conferencing in the 6th IAEA Technical Committee Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation (2007). However, it is not connected to the SINET3 network. Presumably, the situation will soon change, especially when the new supercomputer for the Broader Approach and the new supercomputer in Kobe come on line.
- The Rokkasho Research Center studies on future high-speed information networks will be of interest to ITER and its international partners. The ITER Organization had set up a special CODAC working group. Perhaps the Center could plug into this effort.
- For the sake of international exposure and public relations in the Rokkasho/Aomori area, NIFS might consider holding a conference or workshop there sometime. This could coincide with the development of a more fleshed-out plan and timetable for research at the Rokkasho Research Center.

シミュレーション研究に関する評価

評価者：ジェームズ W. ヴァンダム

1. 核融合プラズマの科学的理解を促進する世界をリードする研究が行われたか。

NIFS のシミュレーション科学研究部は、高温核融合プラズマの振る舞いの理解に向けたシミュレーション及び理論研究を進める日本で最大の研究グループであり、世界でも有数の規模を誇っている。大型ヘリカル研究部に属する理論データ解析研究系の研究活動も考慮に入れた場合、NIFS は、正に世界各国にある核融合研究所の中で、最大規模の理論シミュレーション研究者を擁していると言える。

シミュレーション科学研究部は、非常に質の高い研究を行っている。私が所属するテキサス大学 IFS 研究所も NIFS シミュレーション研究者との実りある共同研究を大いに評価している。

磁場閉じ込め分野においては、素晴らしい研究成果の数々が報告されており、これらには、乱流輸送のジャイロ運動論-ヴラゾフシミュレーション、高エネルギー粒子物理の非線形シミュレーション、ペレット溶発研究、微視的乱流効果を取り入れた二流体巨視的不安定性シミュレーション、超高解像度 MHD コードの開発、及び境界プラズマシミュレーション等が挙げられる。個人的な見解を述べておくと、最初の二件は、明らかに世界規模の研究であり、残りに関しても非常に質の高いものと言える。

新領域シミュレーション分野においては、レーザー核融合のための高速点火シミュレーション研究、及び無衝突磁気再結合に関する研究が高い質を示している。加えて、プラズマ物質相互作用シミュレーション及びブロップ輸送シミュレーションに関しても、中規模の研究が行われている。また、NIFS は、バーチャルリアリティシミュレーション分野における先導者だと言える。と言うのも、本分野のプログラムを有する核融合研究所は、私の知る限り、世界中で NIFS をおいて他に存在しないからである。

近年 NIFS のシミュレーション科学研究が目覚ましい発展を遂げたことは、前回シミュレーションプログラムが対象になった、2004 年の外部評価報告会でのレポート及び発表を振り返って見れば明白である。具体的な一例として、過去 4 年間に出版された論文リストが挙げられる。233 本の論文が出版されており、素晴らしいことと言える。また、実験結果の理解や解釈にシミュレーションが直接適用される機会も増え続け、注目に値するとともに高く評価できる。超高密度コアプラズマ及び内部拡散障壁のシミュレーション研究は、LHD に深く関与している。更に、燃焼プラズマ物理の理解に特化して行われたシミュレーション研究を高く評価したい。4 年前に比べ近年は、NIFS のバーチャルリアリティシステムに関連した多くの発表が見られることは喜ばしい。

シミュレーション科学研究部の研究、組織、及び設備は、ウェブサイト詳しく掲載されており、常時更新されている。

2. 組織構造：改組は、研究及び運営を向上させたか。

ここ数年 NIFS では、重要な改組が何件か見られた。これらは、非常に前向きな結果につながっている。

もっとも重要なものとして、2007 年 4 月 1 日、かつての理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターが統合され、シミュレーション科学研究部が新たに設立された。新研究部の設立について、心から祝辞を述べさせていただきたい。2007 年 9 月 6～7 日には、新設研究部の門出を祝して、「シミュレーション科学記念シンポジウム」が土岐市セラトピア土岐にて開催された。（私も同シンポジウムに参列させていただき、非常に楽しませていただいた。）

更に、シミュレーション科学研究部は、各専門分野に分かれ、二研究系と一センターから構成されている。二つの研究系は、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系と新領域シミュレーション研究系であり、それぞれにおいて、専門プロジェクトやサブプロジェクトが設置されている。センターは、NIFS 外にあり、青森県六ヶ所村に建設された。これら二研究系及び一センターに加え、同研究部は、設備関連の二つの作業班（コンピュータ及びネットワーク）を新に始動させた。

また、NIFS は、2006 年に管理部を改組した。新設されたユーザズオフィスが一括して訪問者―国内機関、企業、或いは外国の研究所からの訪問者―に対応している。同オフィスが来客受付を一括したことで、訪問者が必要なサポートを受けやすい環境が整えられた。また、管理部内に新たな部署が設立され、研究所の経営企画や評価（近年多数の実績が見られる）に関する事務を取り扱っている。

それらに加え、2007 年 1 月には、共同研究のための総合工学実験棟が設置された（同実験棟は、かつての加熱実験棟に当たる）。総合工学実験棟では、ブランケット材料、技術革新、粒子ビーム工学に関する研究が進められている。

これらの組織変更は、シミュレーション研究、核融合炉工学研究、及び管理業務の強化・向上に貢献している。

3. NIFS は、大規模プラズマシミュレーションの発展に貢献する大学共同利用共同研究の推進に努めたか。

NIFS には、一般共同研究、LHD 計画共同研究、及び双方向型共同研究という 3 カテゴリーの大学共同利用共同研究体制が整っている。シミュレーション科学で行われる共同研究は、主に最初のカテゴリーに分類される。一般共同研究は、最大数の研究プロジェクトを擁している（331 件）ものの、予算的には最少額の配分となる（恐らくは、他の二つのカテゴリーが高額の実験機器を必要としているからだと思われる）。LHD に特化している、または、磁場閉じ込めシミュレーション共同研究

プロジェクトの中には、LHD 計画共同研究のカテゴリーから予算配分されているものもある。

シミュレーション科学研究部は、TASK と呼ばれる国内のモジュラー統合コード開発プロジェクトに積極的に参加している。これは、国内規模の大学共同利用研究の素晴らしい一例である。

他の好例として、爆縮ダイナミクス、レーザープラズマ相互作用、高速電子輸送、及びレーザー核融合における炉心加熱の統合シミュレーション研究が挙げられる。同研究は、大阪大学との双方向型共同研究を通して行われている。

NIFS における 3 件の主要シミュレーション研究プロジェクトの大学共同利用共同研究としての性質は、これらのプロジェクトに関する組織表の中で明白に表されている。つまり、シミュレーション科学研究部に所属する研究者は、大型ヘリカル研究部理論データ解析研究系の研究者、及び国内外問わず他の大学、研究機関のシミュレーション研究者と歩調を合わせ、共に研究を進めている。

4. NIFS は、シミュレーション科学の分野で、COE としての役割を十分に果たすことができたか。（国際連携を含む）

個人的には NIFS は、シミュレーション科学において、立派に COE として機能してきたと思う。以下にまず、「センター (Center)」について、その後「素晴らしさ (Excellence)」について、幾つかの詳細なコメントをさせていただきたい。

NIFS は、以下に見られるとおり、シミュレーション科学の「センター (Center)」として機能している。

- ・ シミュレーション科学研究部は“クリティカルマス”（専門研究者 21 名）を擁しており、幅広い関連研究プロジェクトに着手できる
- ・ シミュレーション科学研究部は、協調的な方法で研究プロジェクトに取り組んでいる。言い換えると、部内研究者による協力姿勢が明白に示されており、同研究部は共同作業を必要とする難題に取り組んでいる。
- ・ シミュレーション科学における NIFS の研究取り組みは、日本全国に広がる大学共同研究の中心となっている
- ・ NIFS のシミュレーション研究はまた、世界規模の共同研究を中心に進めている。客員教授や他機関に所属する研究者の招聘、或いは、NIFS 研究者の海外派遣など、活発な人材交流プログラムを推進している。
- ・ NIFS のコンピュータ施設に関しては、他の研究所や大学の研究者が行うシミュレーションのために定期的に更新されるスーパーコンピュータを提供している。
- ・ NIFS は、国内の核融合研究のためのバーチャル研究所を構成可能な SINET3 高速ネットワークの最大ユーザである。
- ・ NIFS は、シミュレーション科学に関わる多数の国内・国際会議を組織・開催する上で、中心的役割を担ってきた（過去 4 年で 15 回）。例えば、2005 年 7 月、第 19 回プラズマ数値シミュレーション国際会議を組織した。

NIFS シミュレーション研究の「素晴らしさ (Excellence)」は、以下により明らかである。

- ・ NIFS シミュレーション研究者は、数々の有名国際会議において invited talk (招待講演) に選ばれた (2004 年 IAEA 核融合エネルギー会議 (ポルトガル) で 3 件の口頭招待講演、及び 2006 年 IAEA 核融合エネルギー会議 (中国) で 1 件の口頭招待講演)。他の傑出した事例として、2006 年アメリカ物理学会プラズマ物理分科会年会での、帯状流物理に関する招待報告発表が挙げられる (同会議の歴史上、日本人科学者として初めての招待講演である)。
- ・ NIFS シミュレーション研究者は、特筆すべき出版功績を残している: 2004 年に 37 本、2005 年に 35 本、2006 年に 87 本、2007 年現時点で 74 本。過去 2 年は、それ以前を比べた場合、論文の出版数がそれぞれ倍増していることに注目していただきたい。
- ・ NIFS シミュレーション研究用コンピュータ施設は、非常に素晴らしい。LHD 数値解析システムは、2 年間に更新され、プラズマシミュレータは 2009 年に更新される。

シミュレーション科学研究部への最近の改組は、NIFS がシミュレーション科学分野で果たすべき COE としての役割に大きく寄与したものと評価できる。

5. NIFS は、NINS との連携を通して、学際研究を十分に行えたか。

自然科学研究機構を通して、学際研究として二例挙げられており、重力多体系の研究と、非平衡プラズマ/ 物性物理研究 (例: 温度勾配量子ネルンスト効果) である。両研究とも、現時点では、まだ初期段階にあると思われる。

また、企業との学際研究として更に二例が紹介された。アルゴン・プラズマプロセス装置に関する 3 次元粒子シミュレーション、そして、スパッタリングの分子動力学シミュレーションである。2006 年度外部評価委員会において、企業関係の応用シミュレーション研究が、NIFS の他研究部 (連携研究推進センター) でも行われていることが報告されたことを覚えている。

NIFS バーチャルリアリティシステムは、現在ネットワーク経由で、他の VR システムと通信しあっており、学際的プロジェクト用に拡張仮想環境空間を構成している。

NIFS が自然科学研究機構を通して、国際シンポジウム「階層と全体」(2008 年 2 月開催) の組織においてリーダーシップを発揮していることは、非常に意義深いことである。これは、学際的研究プロジェクトの始動及び拡大を促がす重要な機会となるだろう。

6. NIFS は、人材開発に貢献したか。

NIFS は大学院生や若手研究者のための教育や研修プログラムを積極的に開講している。総合研究大学院大学においては、核融合科学専攻を担当しており、独自に大学院生を指導している。また、他大学との学位提携プログラムを利用して、大学院生たちに専門コース及び学位を授与している。加えて他大学の大学院生も、共同研究プログラムを通して NIFS で学位論文に関わる研究に従事している。

NIFS のシミュレーション関連では、総合研究大学院大学において、2004～2006 年の間で 8 名の博士課程修了者を輩出した。うち 3 名は、外国人留学生である。今後、NIFS でシミュレーション科学博士課程を修了した者が卒業後、どこで採用されたのか、記録を残しておくことをお勧めしたい。

日本の国立大学を取り巻く新しい状況の結果として、大学の大学院生が NIFS のような国立研究所で研究を行えるような可動性が阻害されているのだとすれば、非常に嘆かわしいことである。これらは、学生にとって幅広い経験と発見を習得できる願っても無い機会であり、それ故、海外を含む提携大学の数を増やすことで、学生の可動性を向上させようとする NIFS の計画は、大変望ましいものと思われる。

NIFS は、総合研究大学院大学を通して、毎冬「アジア冬の学校（シミュレーション科学に関する土岐講座）」を実施している。又、初学者のための夏の学校も実施している。

NIFS には、博士号取得者（ポスドク）向けのプログラムも整備されている。2004～2007 年間で、シミュレーション科学研究部のポスドクフェロー3 名（1 名は NIFS の COE 研究員として、もう 1 名は JSPS フェローとして支援されていた）が、正規職員として採用された。

人材の件に関しては、この場を借りて過去 4 年以内に退職された理論・シミュレーション研究者に改めて敬意を表したい。岡本先生（理論・シミュレーション研究センター長）、渡辺先生、轟先生（理論・データ解析研究系）、上村先生（計算機センター長）は、皆、素晴らしい研究キャリアをお持ちであった。

7. NIFS の中期・長期計画を踏まえ、シミュレーション科学研究部の今後の研究計画は適当か。

今後の研究方針に関しては、シミュレーション科学研究部は、現在の素晴らしい研究プロジェクトを引き続き追求して行くだらう。加えて、同研究部は、LHD 重水素実験シミュレーションやヘリカル核融合炉提案に関するシミュレーションといった、新たなプロジェクトの動きにも焦点を合わせて行くであろう。後者のシミュレーションプロジェクトは、LHD 数値試験炉と呼ばれている。両新規プロジェクトは適切であり、NIFS の実験プログラムの戦略的計画や今後の運営に関して、大変重要な情報を提供することだらう。一つ提案させていただくとすれば、核融合試験炉に関しては、プラズマ物理シミュレーションのみならず、炉工学シミュレーションも含めてはいかがであろうか。

プラズマシミュレータと呼ばれるスーパーコンピュータの更新計画、及びネットワーク更新計画は、同研究部内に設けられた二つの作業班の主導のもとに行われている。ある種のシミュレーション問題及びコードのベンチマーク試験に対して、大変効率的で、且つ比較的安価なコンピュータクラスターの使用についても、是非ご一考いただきたい。

NIFS シミュレーション研究には、プラズマの振る舞いの理解への貢献と新たな学際的分野としてのシミュレーション科学の推進という二つの目的がある。後者について、他大学や研究所のコンピュータサイエンスの専門家との関係樹立が有益になるだろう。このような関係は、プラズマシミュレーションの高度なアルゴリズムを開発する上で、役立つものと思われる。米国の SciDAC 核融合シミュレーションプロジェクトは、その様な関係の有用性を強調している。

8. 2004 年度外部評価委員会及び 2005 年度組織検討委員会により指摘された問題は適切に反映されてきたか。特に：

- ・ **磁場閉じ込め（LHD）研究、レーザープラズマ研究、及びプラズマ科学研究の研究トピックや活動は適切に選択されたか。**

シミュレーション科学研究部の内部構造は、具体的には、1) LHD・磁場閉じ込めシミュレーション、2) レーザー核融合シミュレーション、及び 3) 複雑性プラズマシミュレーションといった、研究トピック及び研究活動の選択を反映している。これら 3 つの主要シミュレーションプロジェクト内におけるサブプロジェクトの選択は適切であった。過去 4 年間で LHD 実験のためのシミュレーションをより一層重要視してきたことは、ことさら賞賛に値する。

二、三の所見：

- ・ 磁気再結合研究により、基礎物理が見事に解決された。今後これらの研究は、（例えば、地球磁気圏尾部の磁気再結合とサブストーム、コロナの質量放出、ラボ実験における磁場再結合等の観測に対して理論モデルを検証するため）各種実験結果との接点をより広げて行くべきである。
- ・ 同じく、PIC、Fokker-Planck、及び流体コードを使った統合レーザーターゲットシミュレーション研究も大変素晴らしい。これらの統合シミュレーションが磁場閉じ込めに関する統合シミュレーションに、または後者が前者に、建設的な影響を及ぼすのだとすれば非常に興味深い。
- ・ 各種「階層 (hierarchy)」関係の用語には、今もって多少曖昧さが残る。階層繰り込み (hierarchy-renormalized)、階層拡張 (hierarchy-extended)、階層統合 (hierarchy-integrated)、多階層 (multi-hierarchy)、微視的階層 (micro-hierarchy)、巨視的階層 (macro-hierarchy)、単一階層 (mono-hierarchy)、及び階層相互間 (cross-hierarchy) と言った専門用語は、多くの外国人研究者には今ひとつ明確に認識されていない。各名称について明瞭簡潔な定義付けを行うとともに、代替用語（例：kinetic/fluid, micro/macro, core/edge, small/large spatial scales, small/large time scales, time-dependent simulations, integrated simulations...）との関係も併せて提示されたい。また、NIFS シミュレーションプログラムの説明

にしばしば「階層 (hierarchy)」と関連して用いられる「全体 (holism)」には、ウィキペディア内の記事に見られるとおり、実際科学的な意味合いが含まれる。しかしながら、現代社会では、主に哲学的、文化的な文脈で使用されている。おそらく、目前に迫った国際シンポジウム「自然科学における階層と全体」（2008 年 2 月）がこの状況を明確化するのに役立つだろう。

・ **ITER 及び BA に貢献する研究トピックが適切に選ばれたか。**

繰り返しになるが、新設されたシミュレーション科学研究部の内部構造は、ITER 及び BA における研究への比重を高めることに役立っている。最も明確で新しい展開としては、六ヶ所研究センターの新設が挙げられる。青森の BA の核融合エネルギー研究センター建設予定地に、NIFS が実体としてのプレゼンスを確保したことになる。当面は小規模で（2 名の専門職員）、研究範囲もネットワーク向上に限られているが、同センターが今後、BA 活動の本格的始動に合わせ、拡大、成長していくことは、間違いない。それ故、センターの創設は、戦略的に素晴らしい。

さらに、シミュレーション科学研究部、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系において、ITG 及び ETG 乱流プラズマ輸送に関するジャイロ運動論シミュレーション研究（地球シミュレータで実行されたこともあった）や燃焼プラズマに関する高エネルギー粒子シミュレーション研究などは、明らかに ITER と関連している。これらの 2 コードは、並列化 (parallelization) 技術を開発し、何れは来たるべき BA コンピュータで使用されることだろう。また、ペレット入射シミュレーション研究に関しては、ITER の燃料供給に関連性を持つものである。

プログラム面では、シミュレーション科学研究部は、多数の ITER 関連共同研究に携わっており、ITER 連携委員会、ITER 連携グループ、及び IFEFC プロジェクト委員会を通して ITER 関連共同研究を推進している。また、NIFS シミュレーション研究者は、ITPA トピカルグループ会議に参加しており、“Progress in the ITER Physics Basis”（最近 Nuclear Fusion 誌で発表された分厚い資料）の執筆にも関与した。NIFS シミュレーション研究者は、第 1 回 ITER サマースクール（2007 年フランス）に参加し、第 2 回（2008 年日本）にも当然ながら参加すると思われる。

管理部において、ITER 関連の事務を行っている。

二、三の所見：

- ・ グラファイトタイルのスパッタリングに関する分子動力学シミュレーションは、興味深い。仮に、これらの研究が単体水素原子以外に拡張され、タンダステンやベリリウムに対して行われるとすれば、その結果は ITER と関連するものとなる。
- ・ 六ヶ所研究センターは、ビデオ会議システムを利用してインターネット経由で第 6 回 IAEA 技術会議（the 6th IAEA Technical Committee Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation—2007 年 6 月）に遠隔参加した。しかしながら、六ヶ所研究センターは SINET3 ネットワークとはつなが

っていない。恐らく BA 及び神戸の新規スーパーコンピュータがオンラインになれば、この状況も間もなく変化するだろうと思われる。

- 将来の高速情報ネットワークに関する六ヶ所研究センターの研究は、ITER 及び各国際パートナーの関心を呼ぶだろう。ITER 機構は、特別 CODAC ワーキンググループを設立した。六ヶ所研究センターが同グループに関わる可能性もある。
- 青森・六ヶ所地区の国際的展開や広報を考慮して、NIFS は、同地区で会議やワークショップの開催を検討してもいいだろう。これにより、六ヶ所研究センターでの研究を進める上で、より具体的な計画及びタイムテーブルを描くことにつながるだろう。

Peer Review Report on Simulation Research

Reviewer: Michael Tendler

The following perspectives consist of factors inevitable to make reviews for the simulation research that was addressed in the Mid-term Plan determined by the National Institutes of Natural Sciences, the Inter-University Research Institute for which the National Institute for Fusion Science, the National Institutes of Natural Sciences are responsible. They are formulated in accordance with the achievement reviews and reviews for the research standard.

The perspectives [1] to [4] refers to the articles addressed in the Mid-Term Plan, and [5] and [6] are those relative to the plan.

[1] By carrying out the simulation research, did we successfully elucidate and systematize the physical mechanism of a nuclear fusion plasma confinement? Besides, did we make such academic scientific achievements that foreran the world in the search for complex science as a basic research that supports nuclear fusion research?

LHD is the masterpiece of the art of engineering science. Therefore, its operation has greatly contributed towards many shifts in paradigms governing the fusion research for many years. To this end, simulation research has a very beneficial ground to contribute to the understanding and developing the research aimed at harnessing the fusion energy. Hence, recent measures undertaken by NIFS leadership in focusing and enhancing the simulation center are very timely. The development is bound to make an impact on the simulation activities. The academic record of the simulation center is very good. This is born out by numerous achievements on the international arena. To name a few, numerous references in summary on major theoretical achievements at the recent IAEA conference held in Chengdu in 2006, invited talks at many important international meetings etc. etc. Given these major achievements, now the policy encouraging the clarification of novel scenarios discovered recently at NIFS has to be pursued rigorously and aggressively. This should also contribute to the so called fast track approach in the pursuit of fusion energy. The extension of it to the helical configuration appears timely and very topical.

[2] To carry out the perspective [1], did we perform the following?

(1) Through the organizational change, did we properly arrange the research platform that is capable of generating intensive research results and also capable of flexible as well as organic operation?

According to the report of Organization Examination Committee, by unifying the Theory and Computer Simulation Center with the Computer and Network Information Center, the Department of Simulation Science has been established on 1 April, 2007, which consists of LHD and Magnetic Confinement Simulation Division, Fusion Frontiers Simulation Division, and Rokkasho Research Center.

The organizational change has strengthened the ties with the experimental work carried out at the LHD device. To this end, the role of the deputy director of NIFS is crucial. This is bound to bear on the mutual support of both theoretical and experimental teams. To this end,

joint seminars and cross-disciplinary publications will lead to a better understanding of results and full exploiting of NIFS excellent infrastructure. Three simulation projects, namely, LHD and magnetic confinement simulation project, Laser fusion simulation project, and Complex plasma simulation project have been started, and also the direction of research has been clarified. The purposes of three projects are to understand and systematize the physics mechanism of magnetic confinement fusion plasma, to perform the leading simulation of FIREX project, and to perform basic research supporting goals of fusion, respectively. By developing predictive hierarchy-renormalized simulation codes, each purpose will be achieved in future, which leads to the establishment of the simulation science in a new interdisciplinary capacity.

[3] As an inter-university research institute, did we actively promote the collaborative research and research collaboration with universities that utilizes an analysis device for the large-scale simulation research (a plasma simulator) and the like? Also, did we contribute to the development of the simulation research?

In general, the simulation research center has carried out high quality work. By adopting the Super SINET, a fast network operated by National Institute of Information is very instrumental in providing both the machine sharing time and the CPU at large. LHD remote operation stations exist in Sendai, Tokyo, Nagoya, Kyoto, Hiroshima and Kyushu. Multi-Protocol label switching and Virtual Reality Network are fully operational. The board governing large simulation projects is charged with duties of allocating CPU time according to the LHD and NIFS priorities. Yet, there is some room for improvements and further investment in order to upgrade and refine already existing computers and their infrastructure. This is the subject of the highly desirable increase in funding of NIFS and its activities. This should be possible bearing in mind the importance of full exploration of the excellent hardware of NIFS. Finally, it is important to emphasize that the researches from different universities are strongly encouraged to join large simulation projects. This facilitates the open nature of the works on simulations.

[4] Did we successfully play a role as COE? Moreover, did we also play a role as COE in a global sense through international collaborative research and contributions?

NIFS is the best known Japanese centre in fusion studies abroad. Therefore, there is a lot of interest in the world to visit NIFS and to contribute to its excellent facilities. There are many international meetings held at NIFS where scientists can come to NIFS and make a first hand experience of the activities. This is the reason why NIFS has very many inputs from abroad. These proposals are well scrutinized by the home team and the useful part gets accepted and financed. To this end, the department of administration provides excellent support in terms of housing, travel and instructions. Seminars and less formal discussions are held quite frequently. There are also many sports and leisure activities organized by NIFS to make their stay more productive and pleasant. Furthermore, many prominent scientists employed by NIFS have stayed abroad for varying periods of time. Hence, there are many contacts on personal level helping to recruit contributions from abroad. Also, the experience from different computational centers is fully exploited at NIFS due to its international nature. One can think of further improvement in terms of increasing the budget in order to enhance the input from abroad. Activities of guest researchers graduated

from different programs such as SOKENDAI and young scientists are very impressive as well.

[5] Through the interdisciplinary collaboration within the National Institutes of Natural Sciences, did we successfully function as an origin for the academic scientific transmission that can also transmit to the research fields other than nuclear fusion?

Complex plasma simulation projects have been started. Consequently, the direction of interdisciplinary research at NIFS has been clarified. Furthermore, the promotion of inter-institute (NINS) collaborations will be materialized in a program named “Hierarchy and Holism in nature” in envisaged collaboration project aimed at a development of new fields. Also, the project on “Development of non-equilibrium quantum physics” has been initiated. These are important first steps enhancing the impact of fusion research on other fields of research pursuit by NINS. Also, the recent work coauthored by the Director General on the amplification of the Earth magnetic field is along these lines and has to be commended.

[6] Did we successfully contribute to the fostering of human resources who would play an active part in an international situation?

NIFS is determined to support a young researcher on top of its ability. Excellent facilities such as Plasma Simulator, Virtual Reality systems, LHD numerical analysis system are at full disposal of a young scientist technically supported by NIFS permanent stuff. Service programs available for them include preparation and improvement of collaboration environment consisting of information networks, main computer systems, supporting servers, mathematical and graphic libraries etc. Information service is provided at website including system manuals, methods to access and utilize computer systems, computer service information and consultation via e mail system. Furthermore, a lot of know-how is disseminated at the simulation science symposium, large scale computer simulation meeting, lectures on high performance Fortran HPF, consultations on parallelization and HPF, “Toki Lectures on Simulation Science” and Asian Winter School, Sokendai summer school etc. To name one outstanding example, Dr. A. Ishizawa, who was a COE of NIFS, is now a staff of the LHD and magnetic confinement simulation division. In his COE’s period, he has found the gyro-viscous cancellation in the magnetic reconnection near neutral sheet and shown the reconnection layer is governed not by the ion skin depth, but by the ion Larmor radius. This result has been published in PRL vol.95 (2005) 045003. Moreover, his presentation as the staff of the 21-th IAEA Fusion Energy Conference has been highly evaluated by Prof. S.I. Krasheninnikov, so that his results and figures have been presented in the Summary and Nucl.Fusion vol.47 No.10 (2007).

[7] Is our future research plan proper? Especially, is the perspective of the mid-/long-term plan properly taken in consideration?

Right now it is appropriate to advance the high-quality analysis for LHD experiments, the predictive simulation for D-D experiments planned for LHD, the development of hierarchy-renormalized simulation methods by using the Plasma Simulator. The simulation research groups at NIFS will engage in developing the LHD Numerical Test Reactor

(LHD-NTR) toward the concept of helical magnetic confinement fusion reactor as priority for the steady operation proved at NIFS, as a demonstration reactor after ITER. LHD-NTR is a three-dimensional magnetic confinement simulation code and will basically recover the two-dimensional ITER study. To this end, NIFS is upgrading the multi-node Plasma Simulator significantly from the current one in the first quarter of FY2009, while the computer for ITER-BA will start operation in 2012. Furthermore, NIFS has high-speed internet connection with major universities through 1Gbps SINET3 network and its further upgrade is expected. As mentioned at the general meeting of the peer review regarding the long term objectives, all members of DSS including the members of the LHD and magnetic confinement simulation project and the members of other projects contribute to the LHD Numerical Test Reactor (LHD-NTR), although their contributions are in different degrees, like the study of basic physics or the development of hierarchy-renormalization methods.

Finally, in a long run the complex plasma simulation project attempts to apply their research to fusion research and will contribute to LHD-NTR gradually. Yet, this process cannot be too slow. The challenge toward the establishment of simulation science as a new academic field as well as for the development of LHD-NTR will be reflected in the next mid-term plan starting in FY2010.

[8] Besides the above described perspectives, did we properly resolve the issues pointed out in the 2004 Peer Review and the 2005 Organization Review Committee?

(1) Were the selection of research themes and procedures by a respective project for the LHD/magnetic field confinement plasmas, laser nuclear fusion plasmas, and complex plasmas proper?

Purposes of research themes are to understand and systematize the physics mechanism of magnetic confinement fusion plasma, to perform the leading simulation of FIREX project, and to perform fundamental research supporting fusion goals in general, respectively. To this end, the issues pointed out in the 2004 Peer Review and the 2005 Organization Review Committee were taken into account properly enhancing activities in all three seemingly diverging fields quite significantly.

(2) Did we select such research themes that clearly define the contribution to ITER and BA and prepare the appropriate environment?

The governmental decision on priority in 2003 defines clearly that the role of JAEA is to research for the development of fusion reactors mainly using ITER and the NIFS role is to advance related academic research. Another important research objective of DSS at NIFS is to develop LHD-NTR, a three-dimensional magnetic confinement simulation code, which includes the research of Tokamaks like ITER as a special case. Thus, studies of LHD-NTR and ITER are inseparably related from a scientific point of view. Moreover, the structure of the LHD and magnetic confinement simulation project, hierarchy-integrated and hierarchy-extended simulation approaches, and selected physics targets themselves properly correspond to the necessary framework in order to contribute to ITER and ITER-BA. The Rokkasho Center will be utilized under the policies mentioned above and considerations with regard to time sequences of operation schedules of the available super computers.

(3) While considering the development of research and computer environment as well as the perspective of inter-operation, did we work on the constitution of an analysis device for the large-scale simulation research? Then, did we make plans for its operation?

Simulation collaborations are actively promoted by developing open MHD source, benchmark suite project for fusion-related simulations, and organization of working groups on computer and network infrastructures. By developing predictive hierarchy-renormalized simulation codes, many goals will be achieved in future. The practical research environment of the simulation center at NIFS has been reconciled with a new center in order to advance the simulation research further. Thereafter, firm plans have to be established by considering also the convenience for collaborators at universities, once the specifications of the ITER-BA computer and other research facilities become clear. The Rokkasho Center will be utilized under the policies to be worked out in future and considerations regarding super computers available at the time.

(4) Did we disclose and transmit the research result for the visualization and virtual reality system to widely spread research results and promote research collaboration?

The researches on Virtual Reality (VR) are extended from stand alone VR system to a VR system communicating with other VR systems, leading to wider applications in various fields. This has to be judged as a major achievement by all international standards.

シミュレーション研究に関する評価

評価者：マイケル テンドラー

下記外部評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核融合科学研究所が推進するシミュレーション研究の評価に必要不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

〔1〕～〔4〕は、中期計画に記載されている事項で、〔5〕〔6〕は、関連したものとなっている。

- 〔1〕 シミュレーション研究を進めることによって、核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化、更に核融合研究を支える基礎研究としての複雑性の科学の探求等において、世界に先駆けた学術的進展があったか。

LHD は、エンジニアリング科学の粋を集めた傑作である。それ故、これまで長きに渡り、LHD 運転は核融合研究を規定するパラダイムのシフトに大きく寄与してきた。これに対して、シミュレーション研究は、実に有益な領域で、核融合エネルギー利用に向けた研究の理解・発展に貢献している。よって、近年 NIFS 始動で着手されたシミュレーションセンターの重点化・強化における方策は、極めて時宜にかなっている。この発展は、必ずやシミュレーション活動に影響を与えるだろう。シミュレーションの旧センター及び現研究部の学術研究実績は、非常に高い。国際舞台での数々の功績に裏付けられているといえる。2006 年成都で開催された IAEA 会議における主要理論実績に関するサマリーにおける数多くの参照、多くの重要な国際会議での招待講演などが一例に挙げられる。これらの主な功績を受けて、ここ最近 NIFS で発見された斬新なシナリオの解明を勧めるという方針は、今後、より厳格かつ積極的に追求されるべきだろう。これはまた、核融合エネルギーの追及におけるファーストトラック（迅速な）アプローチにも貢献するに違いない。また、それらをヘリカル配位に展開させることは、大変時宜にかなっている。

- 〔2〕 〔1〕を遂行するにあたり、下記事項を実施することができたか。

- （1） 組織改編により、集約的研究成果を生み出し柔軟かつ有機的な運営が可能な研究基盤が整備されたか。

組織検討委員会からの報告によれば、理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターの統合により、2007 年 4 月 1 日、シミュレーション科学研究部が設立された。同研究部は LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、新領域シミュレーション研究系、及び六ヶ所研究センターで構成されている。

組織変更により、LHD 装置を用いて行われている実験研究との連携が深めら

れた。この点で NIFS 副所長の役割は非常に重要である。これには、理論、実験チーム双方の相互支援が関係していると思われる。よって、合同セミナーや相互的な学際的出版物などは、研究成果の理解や、NIFS の素晴らしい構造基盤の存分な活用につながるだろう。三つのシミュレーションプロジェクト、具体的には、1) LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト、2) レーザー核融合シミュレーションプロジェクト、3) 複雑性プラズマシミュレーションが開始され、また、研究の方向性が明確にされた。これら3プロジェクトの目的は、それぞれ 1) 磁場閉じ込め核融合プラズマの物理機構の解明と体系化、2) TIREX プロジェクトに関して先導的なシミュレーションを展開すること、3) 核融合の目標を支援する基礎研究の遂行、である。予測性を有する階層繰り込みシミュレーションコードの開発により、それぞれの目的はいずれ達せられるだろう。そしてこのことは、新たな学際的可能性をもったシミュレーション科学の確立につながるであろう。

[3] 大学共同利用機関法人として、大型シミュレーション研究用解析装置（プラズマシミュレータ）等を活用した大学等との共同研究及び連携を積極的に推進し、シミュレーション研究の展開に貢献できたか。

概して、シミュレーションの旧研究センター及び現研究部は、高いレベルの研究を行ってきた。Super SINET の採用により、国立情報学研究所が運営する高速ネットワークは、マシン・シェアリング・タイム及び CPU の大幅な提供に大いに役立っている。LHD 遠隔運転ステーションは、仙台、東京、名古屋、京都、広島、九州に設けられている。マルチプロトコル・ラベル・スイッチング及びバーチャルリアリティネットワークは、最大限に稼働中である。大規模シミュレーションプロジェクトを指揮する委員会は、LHD 及び NIFS の優先順位に応じた CPU タイム配分を責任持って担っている。しかしながら、既存のコンピュータやそれらの構造基盤を更新、及び洗練するために、改良点や更なる投資が望まれる点も見られる。これは、NIFS 及び NIFS 研究活動の中で、望ましい資金増額の対象である。NIFS が誇る素晴らしいハードウェアを最大限活用することの重要性を留意した上で、実現されるべきである。最後に、他大学研究者の大規模シミュレーションプロジェクトへの参加が積極的に進められていることを忘れずに強調しておきたい。このことは、シミュレーション研究のオープン化を助長するものである。

[4] COEとしての役割を果たすことができたか、さらに、国際的な連携研究・貢献などにより、国際的にもCOEとしての役割を果たすことができたか。

NIFS は、海外の核融合研究社会の間で最も名の知れた日本のセンターである。よって、世界各国が NIFS に関心を寄せており、NIFS を訪問し、傑出した施設に寄与することを望んでいる。NIFS では、数多くの国際会議が催され、研究者は NIFS を訪れて第一線の研究活動を体験できる。NIFS が海外から有数の情報や提案を得られる理由は、この点にあると思われる。出された提案は、ホーム

チームによって精査され、有益だと判断されれば受け入れられ、助成される。このため、管理部は、住居、交通手段、各種手引きについて素晴らしいサポートを提供している。セミナーやインフォーマルな会合が頻繁に催される。また、NIFS が組織するスポーツやレクレーション活動も数多く見られ、訪問者に有意義でかつ快適な滞在時間を提供している。さらに NIFS には、一定期間を海外で過ごした著名研究者も多く見られる。よって、個人レベルでの交流も多く存在し、海外からの貢献の募集に役立っている。また、異なるコンピュータセンターでの経験も、国際的な環境のお陰で、NIFS で最大限に活用されている。海外からの参加を活発化させるため、予算増加の点で、更なる改善が必要かもしれない。総研大のような他プログラム出身の客員研究者や若手研究者の活動にも、目を見張るものがある。

〔5〕 自然科学研究機構内分野間連携等を通し、他分野へ発信できる学術発信拠点となり得たか。

複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトが開始された。結論から言って、NIFS の学際的研究に関する方向性は明確化された。さらに、自然科学研究機構（NINS）との研究連携推進に関しても、新分野の開発を目指して予定されている連携プロジェクトのなかで、「自然科学における階層と全体」と名づけられたプログラムで具現化されるだろう。また、「非平衡量子物理開発」に関するプロジェクトも開始された。これらは、NINS が追求する他の研究領域に対する核融合研究のインパクトを強める重要な第一歩である。また、近年所長が共著出版した地球磁場増幅についての研究もこれらの路線上にあり、賞賛に値する。

〔6〕 国際的に活躍できる人材の養成を行えたか。

NIFS は、若手研究者の能力を最大限に引き出すために彼らを支援している。プラズマシミュレータ、バーチャルリアリティシステム、LHD 数値解析システムなどの素晴らしい設備に関しても、NIFS 正規職員に技術的に支援されて若手研究者の思い通りに利用可能となっている。彼らに用意されたサービスには、情報ネットワーク、メインコンピュータシステム、サポートサーバ、数値及び図形処理ライブラリ等で構成された共同研究環境の準備や改善が含まれる。システムマニュアル、コンピュータシステムへのアクセス及び利用方法、E-mail を介したコンピュータサービス情報及び問い合わせなどを含め、情報サービスはウェブサイト上で提供される。さらに、様々なノウハウがシミュレーション科学シンポジウム、大規模コンピュータシミュレーション会議、高性能 Fortran HPF の講義、並列化と HPF に関する会議、「シミュレーション科学に関する土岐講演」、アジア冬の大学、総研大サマースクール他、多様な場面で広く伝えられている。傑出した一例を挙げてみると、NIFS で COE を勤めていた石澤博士は、現在 LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系の正規職員として働いている。彼は COE 当時、磁気中性面付近の磁気再結合におけるジャイロビスコス（gyro-viscous）相殺を見出し、磁気再結合層がイオン表皮長ではなく、イオンラーマ半径に支配されていることを示した。本成果は PRL vol.95 (2005)

045003 で発表された。さらに、第 21 回 IAEA 核融合エネルギー会議における彼の発表は、S.I.Krashennnikov 教授に高く評価され、成果及び図式が会議のサマリーや Nucl.Fusion vol.47 No.10 (2007)で紹介された。

[7] 今後の研究計画は適切か。特に、中長期的な展望を見据えたものとなっているか。

今は、LHD実験の高度解析、LHDで計画中の重水素実験に関する予測シミュレーション、及びプラズマシミュレータを用いた階層繰り込みシミュレーション手法の開発を進めるのに相応しい時期である。NIFSシミュレーション研究グループは、NIFSで証明された定常運転への優先事項として、ITER後の実証炉として、ヘリカル磁場閉じ込め核融合炉の概念に向けたLHD数値試験炉

(LHD-NTR)の開発に従事するであろう。LHD-NTRは、3次元磁場閉じ込めシミュレーションコードであり、基本的に2次元ITER研究を復元できるものである。このため、ITER-BA用コンピュータが2012年に運転開始となる一方で、NIFSは2009年の第1四半期中に、現行プラズマシミュレータのマルチノードへの大幅アップグレードを予定している。更にNIFSは、1Gbps SINETネットワークを利用して、主要大学と高速インターネット接続されており、こちらに関しても更なるアップグレードが予測される。長期目標に関する外部評価会議上で示唆されたとおり、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系及び他プロジェクトスタッフを含むDSSの全ての構成員は、基礎物理研究や階層繰り込み手法開発などのように、程度こそ異なるが、LHD数値試験炉(LHD-NTR)に寄与している。

最後に、長期的に見て複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトは核融合研究への適用を目指しており、徐々に LHD-NTR へも貢献して行くだらう。しかしながら、この過程はあまり遅いものであってはならない。LHD-NTR 開発同様、新学術分野としてのシミュレーション科学の確立に向けた挑戦は、2010年度から始まる次期中期計画に反映されるだろう。

[8] 上記観点に上げられているものを除き、平成16年度外部評価及び平成17年度組織検討委員会において指摘された事項について適切に対応したか。

(1) LHD・磁場閉じ込めプラズマ、レーザー核融合プラズマ、複雑性プラズマの各プロジェクトによるテーマ設定、研究の進め方は適切か。

研究テーマの目標はそれぞれ、1) 磁場閉じ込め核融合プラズマの物理機構の解明と体系化、2) FIREX プロジェクトに関する先導的シミュレーションの実行、3) 総合的な核融合目標を支援する基礎研究の実行である。このために 2004 年度外部評価及び 2005 年度組織検討委員で指摘された問題が適切に考慮され、一見相違するこれら三分野の活動は、目覚ましく向上している。

(2) ITER 及び BA への寄与が明確な研究テーマを設定し、体制を準備しているか。

2003 年の優先度に関する政府決定は、JAEA の役割を主に ITER を用いた核融合炉の開発研究であり、NIFS の役割を関連学術研究の前進であると明確に定義した。シミュレーション科学研究部が担う他の重要な研究目的は、特殊な事例として ITER のようなトカマク研究を包含する 3 次元磁場閉じ込めシミュレーションコード LHD-NTR の開発である。従って LHD-NTR 及び ITER 研究は、科学的見地から密接に関わり合っている。更に、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトの構成、階層統合及び階層拡張シミュレーションアプローチ、選定された物理目標そのものは、ITER 及び ITER-BA に貢献するために必要な枠組みに適切に対応している。六ヶ所研究センターは、上記方針、及び有効なスーパーコンピュータ運用スケジュールの時間系列に関する考察の下で利用されることになる。

(3) 研究及び計算機環境の進展を配慮し、共同利用の観点を踏まえつつ、大型シミュレーション研究用解析装置の構成を検討し、運用計画を立案しているか。

シミュレーション共同研究は、オープン MHD ソースの開発、核融合関連シミュレーションのためのベンチマークスイートプロジェクト、及びコンピュータ・ネットワークインフラに関する作業班の組織化により、活発に進められている。予測性を有する階層繰り込みシミュレーションコードの開発により、将来的に様々な目標が達成されるだろう。NIFS シミュレーションセンターの実用的な研究環境は、シミュレーション研究の更なる前進を目指し、新たな研究部に引き継がれた。よって、ITER-BA のコンピュータやその他研究施設の詳細が明らかになった時点で、他大学の共同研究者の利便性なども考慮しながら、堅実な計画を設定する必要がある。六ヶ所研究センターは、将来策定される方針、及びその時点で利用可能なスーパーコンピュータに関する考察の下で活用されるだろう。

(4) 可視化やバーチャルリアリティシステムの成果を公表・発信し、成果の幅広い波及、連携研究に努めているか。

バーチャルリアリティ (VR) 研究は、単独型 VR システムから他の VR システムと通信できる VR システムに拡張され、様々な分野に広く適用可能となった。このことは、世界基準からみて傑出した功績だと判断できる。

核融合科学研究所活動概要

核融合科学研究所

核融合科学研究所活動概要

核融合科学研究所は、「核融合プラズマに関する学理及びその応用の研究」を推進することを目的として 1989 年に大学共同利用機関として設立され、全国の大学等の研究者の積極的な参加を得て研究活動を進めている。我が国独自のアイデアに基づくヘリオトロン磁場を用いた世界最大の超伝導大型ヘリカル装置（LHD）を用いて、将来の炉心プラズマの実現に必要な、1 億度を超える無電流・定常プラズマに関わる物理的、工学的研究課題を解明することを目指した実験・理論研究とスーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーション研究を 2 本の柱とし、さらに炉工学研究や連携研究などを進めてきた。また、国内の大学や機関との共同研究や国際的な共同研究を進めてきた。それらを通じて若手研究者の育成を行っている。総合研究大学院大学核融合科学専攻や他の大学院との連携大学院における教育活動も展開してきた。

2004 年度には大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一員となり、法人内の他の 4 つの大学共同利用機関と協力して学際的、国際的な連携研究拠点形成に向けた活動を一層強化している。

法人化が行われた 2004 年度から 2009 年度までの 6 年間の中期目標、中期計画を定め、そのもとに年度計画を毎年設定し、これに対応した実績報告書を年度ごとに提出している。これは研究活動や業務運営の透明性を確保し、また説明責任を果たすことにもなっている。

核融合科学研究所の研究に関する中期目標は、「エネルギー科学分野、とりわけ核融合科学分野では、我が国における核融合科学研究の中核機関として、大学や研究機関と共に核融合科学及び関連理工学の発展を図る。環境安全性に優れた制御熱核融合の実現に向けて、大型の実験装置や計算機を用いた共同研究から、国際協力による核融合燃焼実験への支援までを含む日本全体の当該研究を推進する。」となっている。

これに対応した中期計画は、「制御熱核融合の実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げる。

- ① 大型ヘリカル実験装置（LHD）の性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。このためにプラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進め、核融合炉心プラズマを見通せる LHD プラズマの高性能化を目指す。
- ② プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明を、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進める。さらなる閉じ込め改善を実現するための先進的な磁場配位を持つ新規実験装置の検討を、コミュニティの共通の課題として推進する。
- ③ 核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化を進めるとともに、それを支

える基礎研究としての複雑性の科学を探究するため、理論・シミュレーション研究を推進する。このため大型シミュレーション研究用解析装置を積極的に活用する。

- ④ 核融合炉を目指した大学の炉工学研究の中核として、炉工学研究の集約と学術的体系化を推進するとともに、関連する幅広い工学研究の進展に寄与する。
 - ⑤ 基礎プラズマ科学や極限的条件下におけるプラズマ研究、原子分子データ等の核融合基礎データの評価・集積、環境や安全性等核融合の社会的受容性に関する研究の一層の推進など、核融合を巡る幅広い分野で共同研究の中心機関として活動する。」
- となっている。

また、研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置として中期計画において、

- ① 集約的研究成果を生み出すために、柔軟かつ有機的な運営が可能な組織を目指し、これまでの研究系やセンターの機能を見直して新たな組織改編を行う。
- ② 大学等との連携協力体制の強化に加え、大学等における研究への支援体制を強化する。
- ③ 超高密度プラズマ等の学術基盤の発展を図るために、慣性核融合研究分野での連携協力を進める。
- ④ 国際共同研究を推進するための研究支援体制を作る。

としている。

これらを遂行するための組織として絶えず見直し・改善を図っており、2007年度にはシミュレーション科学研究部を新たに発足させた。2007年度の核融合科学研究所の組織を図1に示す。管理部においても2006年10月に国内外の共同研究者が手続きしやすいように「ワンストップサービス」を実現するためのユーザーズオフィスを設置した。

2007年度における職員数は研究部・センター131人、技術部46人、管理部43人の計220人（2007年4月1日現在）である。2007年度の運営費交付金は人件費を含んで106億5千7百万円である。

核融合科学研究所が実施している共同研究活動としては次の3つのカテゴリーがあり、2007年度の採択された研究課題数、各課題に参加している共同研究者（大学院生を含む）数及び予算を示す。

- (1) 一般共同研究
331 課題、1,268 人、8 千万円
- (2) LHD 計画共同研究
37 課題、329 人、1 億 7 千百万円
- (3) 双方向型共同研究
59 課題、332 人、6 億 7 千 4 百万円

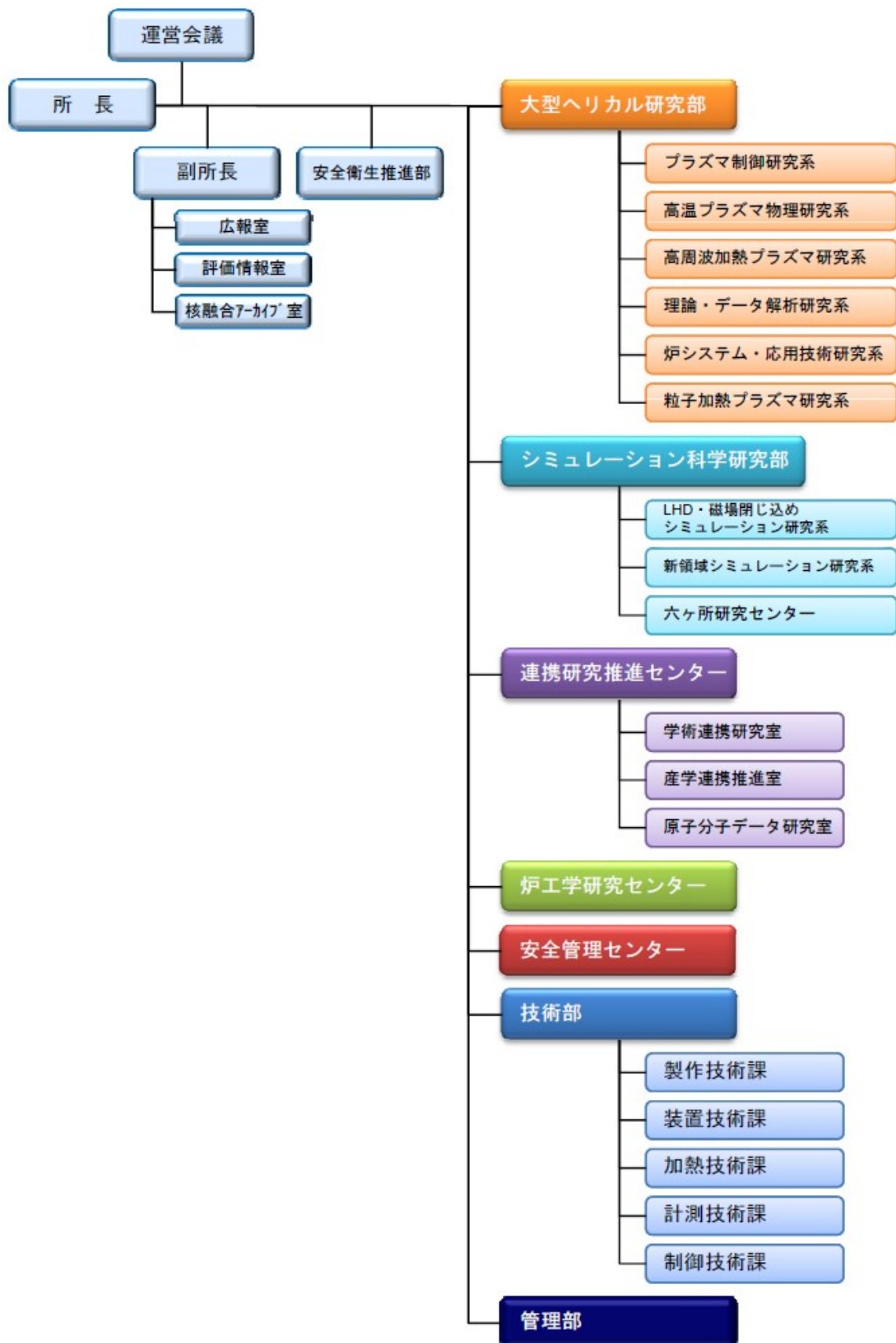


図1 核融合科学研究所の組織

これら共同研究に参画している大学、研究機関の数は 157（2007 年度）となっている。特に、2004 年度に始まった双方向型共同研究ではプラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明等を、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用して進めている。具体的には、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター及び九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターと本研究所の間で双方向型共同研究を推進している。また、双方向型共同研究の一環としてセンターが持つ全国共同利用の機能により、各センターと全国の大学等との共同研究のさらなる活性化を図っている。双方向型共同研究の研究推進基盤をさらに強固にするため、必要な装置の整備等を研究者コミュニティの意見も反映させて進めている。その結果、全日本の ST 装置として TRIAM-QUEST 装置を九州大学において建設中であり、間もなく完成予定である。また、双方向型共同研究についての外部評価を 2007 年から 2008 年にかけて実施する。

国際共同研究も重要であり、既に締結した国際協力協定を表 1 に、研究所間学術協力協定を表 2 に示す。また、国際土岐コンファレンスを研究所主催で毎年開催している。2007 年には国際ステラレータ・ヘリオトロンワークショップとの共催で、「プラズマにおける流れと乱れの物理」をテーマにして実施した。これ以外にも 2007 年にはプラズマ周辺理論（PET）国際会議、核融合研究における制御・データ収集・遠隔実験参加 IAEA 第 6 回技術国際会議、レーザーを用いたプラズマ計測国際会議（LAPD）などを主催した。国際共同研究推進のため、研究者招聘・派遣も積極的に行っている。

表 1 国際協力協定

○多国間協力

締結日	協定名称	参加国等	日本からの参加機関
1992.10.2	IEA ステラレータ協定 (ステラレータの概念の開発に関する協力のための実施協定)	日・米・EU・豪・ロシア・(ウクライナ)	核融合科学研究所、大学等
1978. 4.13	IEA テキサトール実施協定 (技術研究のためのトーラス試験装置 (TEXTOR) におけるプラズマ壁面相互作用に関する研究開発計画のための実施協定)	日・米・トルコ・カナダ・スイス・EU	核融合科学研究所, 原研, 理化学研究所, 大学等
2007. 2.20	IEA 球状トーラス実施協定 (球状トーラスに関する協力のための実施協定)	日・米・EU	核融合科学研究所、大学等

○二国間協力

締結日	協定名称	日本からの参加機関
1979. 5. 2 (実施取決め締結準備中)	日米エネルギー協力協定 (エネルギー及びこれに関連する分野における研究開発のための協力に関する日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定)	核融合科学研究所, 原研, 大学等

2000.10.16	拠点大学方式による学術交流事業 (日本学術振興会と中国科学院との拠点大学方式による学術交流(プラズマ・核融合分野)の実施大綱)	日本側拠点 核融合科学研究所
2004.11.16	韓国技術部と文部科学省との間の核融合関連研究分野における協力に関する実施取決め (科学技術分野における協力に関する大韓民国政府と日本国政府との間の協定(1985.12.20 締結)第 5 条に基づく、核融合関連研究分野における研究開発協力に関する実施取決め)	日本政府(核融合科学研究所, 原研, 大学等)

表 2 研究所間学術協力協定

No.	協定締結機関	締結日
1	(カリフォルニア大学ロサンゼルス校プラズマ核融合研究所)	(1990 年 7 月 3 日) ※ 2006 年 11 月 28 日締結の新協定と入れ替え
2	中国科学院等離子体物理研究所 (ASIPP)	1992 年 6 月 27 日
3	マックスプランクプラズマ物理研究所 (IPP)	1993 年 5 月 11 日
4	ロシア科学センタークルチャトフ研究所 (KI)	1993 年 5 月 15 日
5	ウクライナ科学センターハリコフ物理工学研究所 (KIPT)	1994 年 10 月 7 日
6	オーストラリア国立大学 (ANU)	1995 年 5 月 8 日
7	韓国基礎科学支援研究所 (KBSI)	1996 年 3 月 6 日
8	カールスルーエ研究所 (FZK)	2005 年 10 月 6 日 2007 年 12 月 17 日 (2 年単純延長)
9	プリンストンプラズマ物理研究所 (PPPL)	2006 年 3 月 3 日
10	テキサス大学オースチン校 (IFS)	2006 年 3 月 6 日
11	オークリッジ国立研究所 (ORNL)	2006 年 5 月 25 日
12	カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)	2006 年 11 月 28 日
13	プロヴァンス大学	2007 年 7 月 19 日
14	ロシア科学アカデミー・一般物理研究所(GPI)	2007 年 10 月 15 日
15	磁場核融合研究に関する国際連携研究所 (L I A) 設置協定	2007 年 10 月 22 日

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor : 国際熱核融合実験炉) および ITER-BA (ITER Broader Approach : 日欧間で合意した ITER 幅広いアプローチ) に関する連携は所内に委員会を設置するとともに、連携研究推進センターの学術連携推進室のもとに ITER 連携部門を置いて連携活動を実施できる体制を整えている。ITER 連携部門に ITPA (International Tokamak Physics Activity : 国際トカマク物理活動) 等への参加旅費を予算計上するなど ITPA 等への参加を積極的に行っている。また、シミュレーション科学研究部のもとに六ヶ所研究センターを置いて六ヶ所村での関連する情報交換などが速やかに行える体制を整えた。特に、ITER-BA のための国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) の検討メンバーを出すなどの協力を行っている。

大学院教育・若手研究者育成にも力を入れている。若手研究者育成としては外国人留学生や若手向けの夏の賢島セミナーや学部学生や修士課程の学生向けの夏の体験入学、そしてアジアの学生向けのアジア冬の学校を毎年開催している。2007年にはITER国際サマースクールに若手研究者や大学院生を派遣した。また、総合研究大学院大学や連携大学院における大学院教育を実施している。また、特別共同利用研究員制度でも大学院生を受け入れている。これら大学院教育の状況を表3にまとめた。

表3 大学院教育の状況

	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度 (2007年10月1日現在)
夏季/冬期の活動	賢島セミナー (8/19～21)	賢島セミナー (7/28～30)	賢島セミナー (7/27～29, 7/31～8/2)	賢島セミナー (7/29～8/1)
	夏の体験入学 (8/2～6)	夏の体験入学 (8/18～24)	夏の体験入学 (8/7～11)	夏の体験入学 (8/8～10)
	アジア冬の学校 (12/9～11)	アジア冬の学校 (12/12～16)	アジア冬の学校 (2/27～3/2)	アジア冬の学校 (2/26～29) ITER夏の学校 (7/16～20)
総合研究大学院大学 (総研大)				
学生数 (基準日: 5月1日)	23	25	21	22
博士学位取得者数	6	12	4	3
連携大学院 (学位取得コース)				
名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻	14	11	10	6
名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻	8	7	4	5
北海道大学大学院工学研究科量子理工学専攻	0	1	2	1
連携大学院 (履修コース)				
富山大学大学院理学研究科 エネルギー科学専攻	0	14	20	15
特別共同利用研究員				
国立大学からの学生	27 (北海道大学, 東北大学, 東京学芸大学, 東京大学, お茶の水女子大学, 名古屋大学, 大阪大学, 神戸大学, 九州大学)	22 (東北大学, 東京大学, 東京工業大学, 横浜国立大学, 信州大学, 名古屋大学, 大阪大学, 山口大学, 九州大学, 鹿児島大学)	23 (東北大学, 埼玉大学, 東京大学, 横浜国立大学, 信州大学, 名古屋大学, 山口大学, 九州大学, 鹿児島大学)	14 (東北大学, 東京大学, 信州大学, 横浜国立大学, 名古屋大学, 九州大学, 新潟大学, 福岡大学, 京都大学)
県立、市立大学からの学生	0	0	0	1 (富山県立大学)
私立大学からの学生	4 (東京理科大学)	4 (上智大学, 成蹊大学, 東海大学, 立教大学)	4 (上智大学, 成蹊大学, 東海大学, 藤田保健衛生大学)	4 (上智大学, 成蹊大学, 東海大学, 福岡工業大学)

LHD とシミュレーション科学研究については本年度の評価対象であるので、別に成果報告書が作成されており、ここであらためて取り上げることはしない。概要については各成果報告書のまとめを参照いただきたい。

炉工学研究センターについては今まで実験設備が複数の研究等に分散していたものを、2007年7月に総合工学実験棟を設置し、そこにそれら実験設備を統合した。低放射化材料であるバナジウムの研究、バナジウム合金のコーティングによるLi液体との共存性、Flibeに関する研究等を実施している。

連携研究推進センターでは、大学等との共同研究、本機構内の連携研究、産業界との共同研究等の促進、研究支援体制の強化を図り、今後必要とされる各種の連携研究や産業界との共同研究等に対応し、円滑な運用を目指している。特に、マイクロ波による陶磁器焼

結、セラミック焼結、アスベスト高速無害化処理、酸化鉄粉からの高純度銑鉄生成、低交流損失の磁性体生成、金属ガラスの生成など多岐にわたる分野で成果を挙げている。また、慣性核融合研究分野での連携協力を進めるため、学術連携研究室レーザー連携研究部門を中心に、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターとの双方向型共同研究を推進し、高速点火実験用クライオターゲットの研究開発を行っている。さらに、学術連携研究室国際連携研究部門を中心に国際共同研究支援を行っている。

実験関連の安全・衛生については安全衛生推進部が担当しており、安全管理センターでは放射線安全管理等の業務を行っている。それぞれの役割分担も順調に機能している。

また、核融合アーカイブ室が 2005 年 1 月に発足してから、既に 17,000 件の史料が登録された。アーカイブ室で扱う史料は研究論文以外の委員会記録やオーラルヒストリーなどを含む。その目的は日本の核融合科学の歴史的な評価や社会への説明責任を果たすことにある。アーカイブ室で収集した史料公開基準を検討し、その史料公開を進めて行く予定である。

一方、研究論文の一般への公開は機関リポジトリとして、評価情報室で準備作業を進めている。評価情報室において論文のデータベースの蓄積を進めており、評価等への対応にも役立っているところであるが、研究成果をより広く公開することが世界的な流れとなっている。研究所としても機関リポジトリの必要性を認識し、著作権との整合性に注意しながら公開を進めていく。

広報室では見学者への対応、WEB でのホームページの充実、ホームページの英文化、研究所オープンキャンパスへの協力、全国の科学館やイベントでの広報活動などを積極的に行っている。スーパーサイエンスハイスクール（SSH）やサイエンス・パートナーシップ・プログラム（SPP）などの教育連携への協力も行っている。

また、岐阜県主催の「賢材塾」を当研究所において毎年 2 回程度開催するなど、地域社会への貢献にも努めている。

最後に、核融合科学研究所における多様な評価体制を図 2 に示す。顧問の先生方には随時大所高所からの研究及び研究所の運営に関する改善のご意見を頂いている。また、日米協力事業報告会における各活動についての評価なども行って頂いている。

運営会議においては、必要に応じて組織検討委員会などを設置するとともに、運営会議のもとに外部評価委員会を設置し、年度ごとにテーマを定めて評価を受けている。また同じく、運営会議のもとに置かれた共同研究委員会においては、3 種類の共同研究のカテゴリーごとに委員会を設け、公募、採択、成果報告会・評価を行っている。特に、LHD 計画研究では課題について核融合ネットワークからの推薦を受けている。

研究所内においては、研究・業務計画企画評価委員会を置き、前年度実績の評価や次年度の研究企画や業務計画など各実行予算案に関するヒアリングを行って、次期年度の予算調整を行っている。

自然科学研究機構としては、年度ごとに国立大学法人評価委員会による評価を受けてお

り、さらに、2008 年度は中期目標期間の評価を受けることとなっている。そのうち、研究評価については、独立行政法人 大学評価・学位授与機構が評価を実施する予定である。

その他、大型研究設備を持つ機関として総合科学技術会議による評価や、超伝導・極低温技術について社団法人 低温工学協会による評価を受けるなど、多面的な評価を受けている。

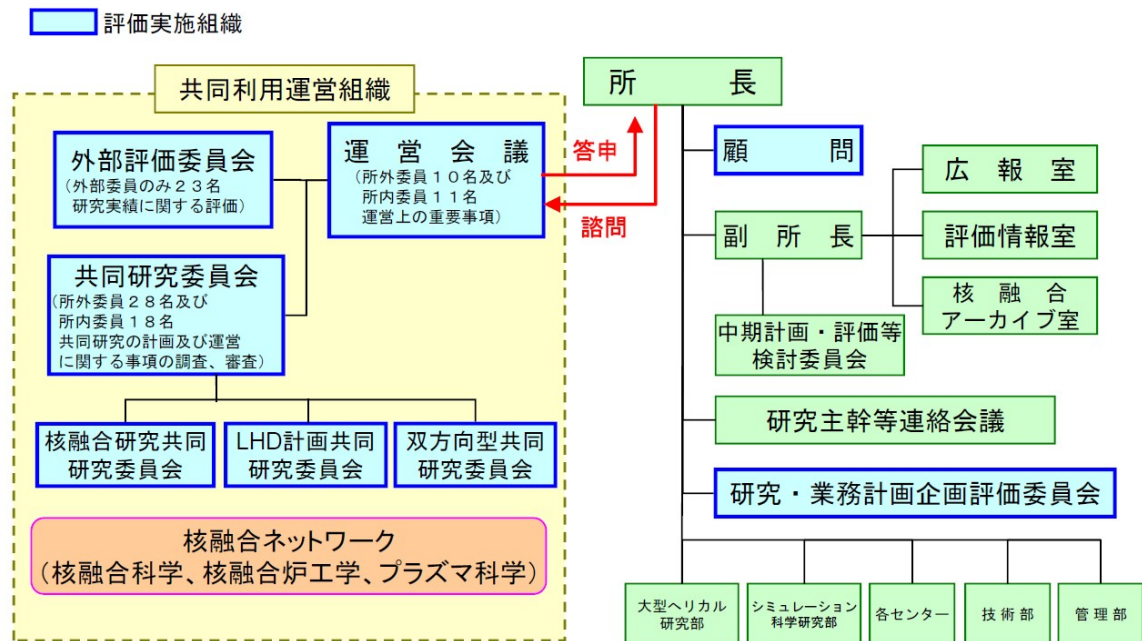


図2 核融合科学研究所における多様な評価体制

「大型ヘリカル装置（LHD）研究」
成果報告書
（平成 16～19 年度）

核融合科学研究所
大型ヘリカル研究部

目 次

1. はじめに	1
1. 1 大学における核融合研究推進環境の変化	1
1. 1. 1 科学技術・学術審議会／核融合ワーキング・グループ および核融合作業部会報告	1
1. 1. 2 法人化と中期目標・中期計画	5
1. 2 大型ヘリカル装置計画における重点研究課題	6
2. 大型ヘリカル装置研究実施体制	9
2. 1 大型ヘリカル研究部の体制	9
2. 2 3つのカテゴリーによる幅広い共同研究の展開	10
1) 一般共同研究	11
2) LHD 計画共同研究	13
3) 双方向型共同研究	13
2. 3 共同研究実施体制	15
1) 大型ヘリカル実験会議	15
2) 実験テーマグループ制	17
3) LHD 実験実施の流れ	18
3. 大型ヘリカル装置の研究成果	21
3. 1 ミッションテーマ実験 — プラズマの高性能化	21
1) 高蓄積エネルギー、高密度、L I Dを用いた閉じ込め改善	21
2) 高ベータ領域の拡大	28
3) 定常プラズマ保持と高性能化	34
4) 高イオン温度領域の拡大	39
5) 高電子温度の実現	45
3. 2 物理テーマ実験 — 炉心プラズマの実現に向けた学術研究	51
1) コアプラズマの熱粒子輸送	51
2) 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用	58
3) MHD平衡と安定性	68
4) 高エネルギー粒子の物理	75
5) 波動加熱物理	81
6) 電場と閉じ込め	87
3. 3 装置工学・機器開発	94
3. 3. 1 LHD 超伝導コイル	94
1) LHD超伝導コイル系の評価	94
2) LHDヘリカルコイルの過冷却（サブクール）改造	102
3. 3. 2 加熱	109
1) 負イオン方式N B I の高性能化	109
2) 低エネルギーN B I の開発	114
3) ジャイロトロンと伝送系の改良	121

4) I C R Fアンテナ改良と定常化	125
3. 3. 3 計測	129
1) トムソン散乱計測器の高性能化	129
2) 炭酸ガスレーザー計測を用いた密度/揺動計測	132
3) 6 M e V H I B Pの開発	136
4) トレーサ内蔵ペレット (TESPEL/TECPEL) の開発	142
5) C X Sの改良	146
6) Super SINET を用いた遠隔計測	152
7) 大容量データ処理システムの構築	156
8) I T E Rを視野に入れた先進計測開発	161
3. 4 理論・データ解析	172
1) 新古典輸送	172
2) プラズマ乱流輸送と帯状流	180
3) 閉じ込め改善	188
4) MHD	194
3. 5 C O EとしてのLHDと学術発信	200
3. 5. 1 大学等の研究との相互依存	200
1) LHD計画共同研究課題	200
2) 双方向型共同研究課題	206
3. 5. 2 他分野との連携研究	209
3. 5. 3 世界の核融合研究推進への貢献	211
1) 各種協定に基づいた連携研究	211
2) I T E R連携	216
3. 6 今後の計画に向けた準備研究	221
1) 重水素実験	221
2) 閉ダイバータ	238
3) ポロイダル磁場実時間制御	251
4. 支援研究 (C H S 実験)	254
5. ヘリカル炉設計研究	266
6. 教育・人材育成活動	272
6. 1 大学院教育	272
6. 2 ポスドク・若手研究者育成	274
7. 将来計画	276
7. 1 第1期中期目標・計画の達成に向けて	276
7. 2 第2期中期目標・計画への展望	278
8. まとめ	281

1. はじめに

大型ヘリカル装置（LHD）計画は、昭和61年の学術審議会答申に基づき、設計部会による概念設計、組織検討部会による推進母体となる新研究所の検討を経て、平成元年の核融合科学研究所創設とともにスタートした。我が国独自のアイデアであるヘリオトロン磁場世界最大の超伝導ヘリカル装置を建設し、定常運転核融合プラズマの閉じ込め方式の研究を行い、付随する物理的、工学的課題を解明することを目的としている。

LHDは、大型研究プロジェクトであるが、その建設時から大学等との共同利用・共同研究を組み込み、全国の核融合研究者の積極的な参加を得て、装置の完成からプラズマ実験研究の遂行を成功裏に進めてきている。これは核融合研究所のみならず日本の核融合研究にとって大きな財産となっている。折しも平成16年度の法人化により核融合科学研究所は大学共同利用機関法人・自然科学研究機構の一員として共同利用・共同研究の推進にいつそうの努力を払うことが求められることになった。法人は6年間の中期目標・中期計画を定めることになっているが、LHDは自然科学研究機構の中核装置としてその任を果たすことが求められている。

このような背景から核融合科学研究所では平成16年度にLHD研究を対象として外部評価を実施し、それまでの研究成果と今後の研究の方向性について評価をいただいた。核融合研はその結果を真摯に受け止め、LHD研究が世界を先導する成果を出し、大学を中心とする日本の核融合研究の進展に貢献すべく努力をしてきた。来年度、中期計画全体の評価を受けるにあたり、この3年間の進展をまとめ、再び評価いただくことは研究所の姿勢を示すものである。

本報告書は、法人発足後の平成16年から現在に至るまでのLHD研究成果をまとめたものである。加えて、LHDが請け負う役割を様々な視点（共同利用・共同研究の中核、国内重点化装置、国際協力、人材育成、など）から捉えて記述した。短い期間でもかかわらず多くの活動がなされ、成果が得られている。今後に向けたLHDの持つ大きな可能性についても併せてご理解いただければ幸いである。

1.1 大学における核融合研究推進環境の変化

1.1.1 科学技術・学術審議会／核融合ワーキング・グループおよび 核融合作業部会報告

人類初の核融合燃焼実験の実施に向けた計画がITER計画として開始されたことに象徴されるように、核融合研究は新たな転換期を迎えている。この転換の本格化に備え、今後を見据えて、平成15年1月に科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特

別委員会核融合研究ワーキンググループから「今後の我が国の核融合研究の在り方について」が報告され、核融合研究計画の重点化、すなわち、トカマク(JT-60U 及びそれに続くトカマク国内重点化装置)、ヘリカル(LHD)、レーザー(激光 XII 号及びそれに続く高速点火レーザー装置)及び炉工学が4つの重点化の柱として設定された。そして、共同利用・共同研究の強化に必要性が合わせて認識され、重点化された3つの装置についてその促進が求められるところとなった。これらの軸となる研究の発展を促すことはもちろんであるが、新たな可能性を目指した研究機会を生み出すためにも共同利用・共同研究の一層の活性化が必要となることが指摘された。特に核融合科学研究所にあっては、「我が国の核融合分野における学術研究に資する役割の強化が一層求められている現状に鑑み、大学共同利用研究の中核機関として大学との強い連携・双方向性の強化等が必要であり、運営体制や研究の対象範囲等の見直しを行い、研究計画の一層の活性化を可能とする制度設計の充実を図る必要がある」とされた。LHD については「今後も、炉心プラズマに外挿できるパラメータ下における環状プラズマの総合的理解、ITER への寄与、新しい閉じ込め配位研究のための装置との連携等を目標に、LHD を用いた学術研究を継続し進めることが必要である。」とされ、LHD の学術基礎研究としてのアプローチが改めて意義付けられたことを受けて所期の目標に向かって共同研究の活性化を持って当たってきた。

さらにITER計画の本格化や幅広いアプローチの始動などにより、国内計画の推進と連携にどう取り組んでいくのか、また、平成15年1月の報告書以来の重点化による研究の進捗状況を確認した上で、今後の進め方について検討する必要性が生じた。このため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力分野の研究開発に関する委員会核融合作業部会が設置され、今後の推進方策について検討が行われた。検討結果は、「ITER計画、幅広いアプローチをはじめとする我が国の核融合研究の推進方策について」(平成19年6月27日)として報告書にまとめられた。そこでは、ITER計画の本格化や幅広いアプローチに対する我が国の開発研究体制の構築と同時に、学術研究推進の重要性が再確認された。核融合作業部会では、重点化課題に関わるチェック・アンド・レビューを実施し、LHDについては以下の表1. 1. 1-1に示す評価結果が出された。

表 1. 1. 1-1 LHDに対する科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力分野の研究開発に関する委員会核融合作業部会によるLHDに対するチェック・アンド・レビュー結果
(「ITER計画、幅広いアプローチをはじめとする我が国の核融合研究の推進方策について」
(平成19年6月27日)より抜粋)

観点	意見	留意点など
重点化後の研究の進展	●重点化後、優れた成果をあげ、着実に研究が進展している。パラメータ数値の向上のみならず、今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。	
	・すぐれた成果をあげ、研究の進展があった。プラズマ物理としての学術的側面、トロイダルシステムの理解、ひいてはトカマク物理への貢献等の面で今後研究を発展させていくことが望まれる。 ・各大学がオープンに実験データを利用できる体制が構築されている。 ・LHD実験は、着実に成果をあげており、環状プラズマの総合的な理解に大きく貢献している。	・今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。 ・学術データベースの量と質の拡充を目指したパラメータの向上と、学術体系化への努力をバランスよく進めること。 ・ITER及びBAが展開される状況において、LHD独自の課題と共にトカマク装置との関連についても明確にすることが必要ではないか。
共同利用・共同研究の強化	●重点化後、双方向型共同研究の実施等により、大学共同利用機関としての共同利用・共同研究の役割が強化されている。 共同利用・共同研究を通じた大学の核融合研究が、我が国の核融合エネルギー開発に貢献することを期待する。 双方向型共同研究において、参加機関の自由な発想及び学術的評価の確保に留意すること。	
	・双方向型共同研究の実施や、実験データ共有にネットワーク利用を図ったオープンな体制を構築する等、重点化後の成果は期待通りあがっていると評価できる。 ・大学共同利用機関として、LHD実験を大学等の研究者との共同利用・共同研究として推進すると共に、双方向型共同研究により大学における施設の相互利用を含めた共同研究が開始されるなど強化されている。	・双方向型共同研究はセンターへの予算をNIFSが関わることで確保されているが、センターの自由な発想と学術的に厳しい評価とを担保するよう努力していくことが大切である。 ・双方向共同研究、LHD共同研究を初めとする共同研究により大学の核融合研究が進んでいることは理解されるが、我が国の核融合エネルギー開発にどこまで貢献しているのかの検討も必要ではないか。
重点化	●総合研究大学院大学の大学院生の受け入れや、共同研究を通じた全国の学	

後の人材育成	生の教育等、我が国の核融合分野の人材育成に重要な役割を果たしている。若手研究者の自由な発想による企画を促す研究環境の確保が望まれる。	
	・総合研究大学院大学の学生のみならず、全国の大学からの学生の教育、共同研究参加の学生の教育、独自のセミナーの企画等、日本の当分野の人材育成で重要な役割を果たしている。	・若手が自由な発想で研究企画ができる自由度が確保されているか。学問的にブロードな視点の積極的育成が学術としての価値を高める方向に寄与するので、格段の努力が望まれる。
国際的視点からの寄与	●数多くの国際共同研究が推進されている。引き続き国際的に重要な役割を大学等と連携して果たすことが期待される。	
	・数多くの国際共同研究がなされている。海外の主要な装置との共同研究をさらに進めること、それを大学等と連携で計画して行く等が期待される。 ・政府間協定や研究所間協定に基づく国際協力や国際共同研究が展開されており、国際的にも重要な役割を果たしている。	・最近学術的に高く評価されたのはCHSで発見されたZonal Flow 関連の研究である。CHSはシャットダウンしたため、これを凌駕する世界レベルの学術的成果がLHDから生まれることを期待する。
社会的視点からの寄与	●核融合研究に対する理解を深めるための活動が積極的に行われている。また、他分野との連携のための努力が認められる。今後は、核融合エネルギーの実現に向け、ITERや原子力機構との関係をさらに分かりやすく説明することが望まれる。	
	・社会への説明、特に地元への説明が積極的に行われている。 ・様々な広報活動や見学受け入れを通じて、核融合研究に対する理解を深める活動を精力的に行っている。また、研究途上で生まれた成果を社会に還元する努力を意識的に行っていることも評価できる。	・学術他分野への発信・連携に関しては自然科学研究機構の中で拠点形成などの努力がなされているが、なおいっそうの努力が期待される。 ・核融合エネルギーの実現に対して、ITER、原子力機構での研究開発との関係を明確にした説明が社会に対して必要。
その他	・ITERとの関連における学術研究への取り組みを積極的に行うためJAEAとの調整が望まれる。	

総評は「研究成果は着実に進展し、大学共同利用機関としての共同利用・共同研究の役割がより強化されており、実験データをオープンに利用できる体制の構築等、重点化後の成果は期待通りあがっていると評価できる。今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。」とある。

報告書では「より魅力的な核融合エネルギーの実現には、開発現場からの課題設定と学術基盤からの新たな知見の両方が相互作用しつつ研究開発が進められる必要がある。」ことが指摘されており、特に、学術研究から開発研究までのネットワークによる「双方向な知の循環」の形成が必要であり、LHDもその中でプロジェクト研究としての学術的な波及や学際性に留意して枢要なハブの役割を果たすことが求められている。

1. 1. 2 法人化と中期目標・中期計画

平成16年4月1日の国立大学法人化は、各法人における自主性・自律性を大きく拡大し、弾力的な運営をその法人の責任において行うことを可能としたものである。大学共同利用機関法人においても、国立大学と同じく、各法人の理念に沿って文部科学大臣が定めた6年間の中期目標に基づいて中期計画を設定している。

自然科学研究機構の基本的な目標として「大学共同利用機関法人である自然科学研究機構は、天文学、物質科学、エネルギー科学、生命科学等、自然科学分野の拠点的研究機関として、先端的・学際的領域の学術研究を行い、大学共同利用機関としての責任を果たすとともに、自然科学分野における学術研究成果の世界への発信拠点としての機能を果たす。」ことを掲げている。この自然科学研究機構が設置する核融合科学研究所では、「エネルギー科学分野、とりわけ核融合科学分野では、我が国における核融合科学研究の中核機関として、大学や研究機関と共に核融合科学及び関連理工学の発展を図る。環境安全性に優れた制御熱核融合の実現に向けて、大型の実験装置や計算機を用いた共同研究から、国際協力による核融合燃焼実験への支援までを含む日本全体の当該研究を推進する。」ことが中期目標の骨子であり、これらの研究水準の向上、共同利用体制の構築と強化、そして教育・人材育成への貢献という観点を柱として、目標達成のための計画を設定してきている。

本評価の対象となっている大型ヘリカル装置（LHD）は、核融合科学研究所の主軸となる大型の共同利用実験装置である。このLHDについては特に、中期計画において①「大型ヘリカル実験装置(LHD)の性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。このためにプラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進め、核融合炉心プラズマを見通せる

LHDプラズマの高性能化を目指す。」

ことが定められた。また、合わせて

②「プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明を、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進める。さらなる閉じ込め改善を実現するための先進的な磁場配位を持つ新規実験装置の検討を、コミュニティの共通の課題として推進する。」

③「大型ヘリカル装置（LHD）などの実験装置を用いた共同利用・共同研究を推進するために、環境を整備する。」

ことが明示された。

1.2 大型ヘリカル装置計画における重点研究課題

LHD計画は、昭和61年の学術審議会答申に基づき、設計部会による概念設計、組織検討部会による推進母体となる新研究所の検討を経て、平成元年の核融合科学研究所創設と共に、始まった。

LHD実験は8年間の建設を成功裏に完了し、予定通り平成10年4月より実験を開始した。今年度をもって10年となる。この間、予想を越えた研究の進展が図られたが、設計時に設定された重点研究課題は、今も成果を評価するに当たって基本とすべきものと考えられる。

ヘリカル方式は閉じ込め磁場を外部コイルで形成するものであり、定常運転に優れた方式である。さらに同じ環状プラズマとしてその類似と異同を同時に有するトカマクと比較して、大きなプラズマ電流がないことから生じる利点、すなわちディスラプションがないこと、高密度運転に適していること、熱や力の負担が軽減されることなど、核融合エネルギー炉に優れた要件を備えている。そこで、LHD実験において、以下に述べる重点研究課題を研究し、必要とされる開発を展開することによって、ヘリカル方式の定常核融合エネルギー炉への展望を明らかにしようとするものである。

(1) 高温・高密度・長時間プラズマを発生し、炉心プラズマに外挿し得る輸送の研究を広範に行う。

(2) 炉心プラズマに必要な平均ベータ値5%以上の高ベータプラズマを実現し、関連する物理を調べる。

(3) ダイバータを設置して、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る。

(4) 高エネルギー粒子のヘリカル磁場中での振舞いを研究し、炉心プラズマの α 粒子を対象としたシミュレーション実験を行う。

(5) トカマクとの相補的研究を行い、トロイダルプラズマの総合的理解を深める。

これらの重点課題に取り組むため、装置パラメータは表 3. 1. 1-1 に示されるように目標が設定された。現在の達成されている緒元を合わせて示す。

表 3.1.1-1 装置パラメータ

装置		達成装置緒元	所期目標
超伝導コイル		2.9T ($R_{ax}=3.6m$ 時)	3.0T ($R_{ax}=3.75m$ 時)
加熱装置	中性粒子入射加熱(NBI)	接線入射 3 機 パワー 14MW エネルギー 180keV 垂直入射 1 機 パワー 7MW エネルギー 40keV	パワー 15MW
	イオンサイクロトロン周波数帯高周波加熱 (ICRF)	6 系統 パワー 2.7 MW 周波数 25-100MHz	パワー 3MW
	電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH)	9 系統 パワー 2.1 MW 周波数 77,82.7, 84, 168GHz	パワー 10MW
排気装置	主排気装置	排気速度 約 30 万リットル/s	3 千リットル/s
	ローカルアイランドダイバータ (LID)	排気速度 約 30 万リットル/s	閉ヘリカルダイバータ化
燃料供給装置	ガスパフ装置	最大流量 400 Pam ³ /s 注入口 5ヶ所	
	ペレット入射装置	2.5mmφ 11Hz 定常 3mmφ 10 発/プラズマ放電	

また、重点課題に応えるために必要とされるプラズマ性能の目標が設定された。この目標を特に平成 16 年から現在までの達成値を表 3. 1. 1-2 に示す。

表 3.1.1-2 プラズマ性能パラメータ

	第 8 サイクル (平成 16 年度)	第 9 サイクル (平成 17 年度)	第 10 サイクル (平成 18 年度)	第 11 サイクル (平成 19 年度)	所期 目標
核融合三重積 (keV10 ¹⁹ m ⁻³ s) (中心イオン温度 (keV))	2.1 (0.7)	4.4 (0.85)	←	←	5-10 (5)

(中心イオン密度 (10^{19}m^{-3})) (エネルギー閉じ込め時間(s)) (維持時間 (s))	(8.0) (0.37) (7.5)	(46) (0.11) (0.1)			(10) (0.1-0.2)
中心電子温度(keV) (線平均密度(10^{19}m^{-3}))	10 (0.5)	←	←	←	10 (2)
中心イオン温度 (keV) (線平均密度(10^{19}m^{-3})) ガスパフ種	13.5 (0.3) Ar	13.5 (0.3) Ar	5.2 (1.2) H	5.2 (1.8) H	10 (2)
β 値 (%) (磁場 (T))	4.3 (0.45)	4.5 (0.425)	5.0 (0.425)	←	5 (1-2)
放電保持時間 (s) (加熱パワー(kW))	3900 (110) 1905 (680)	3268 (500)	←	←	3600 (3000)

2. 大型ヘリカル装置研究実施体制

2.1 大型ヘリカル研究部の体制

大型ヘリカル研究部は、平成元年5月に核融合科学研究所が設立されて以来、これまで、大型ヘリカル装置（LHD）建設のためのR&D、設計、製作、設置、運転、プラズマ実験、ヘリカル炉設計と、研究・タスク内容が大きく変化してきたにも拘わらず、これに柔軟に対応してきている。研究所設立時は、LHDの建設に対応するため、例えば、LHD本体を担当するプラズマ制御研究系、計測を担当するプラズマ計測研究系のように、LHD建設に適した、ハードウェアに応じた研究組織となっていた。

LHD建設時は、研究所の土岐キャンパスへの移転が同時に進行していたこともあり、研究所全体でキャンパス・LHD建設に対応する必要があったことから、大型ヘリカル研究部の研究総主幹を本部長として建設本部が設けられ、研究所全体として調整を図りながら建設が進められた。プラズマ実験開始後は、プラズマ制御研究系主幹を本部長として実験推進本部が設置され、その元に実際に実験を実施するG1、G2の2つのグループが設けられた。G1、G2は研究系を横断して組織されていたことから、ハードウェアに対応した研究系の縦系に対して、横系と称せられ、ハードウェアを運転することが重要であった初期のプラズマ実験において、実験の遂行と実験成果を上げることに大きな力を発揮した。しかし、実験・研究が大きく進展するにつれ、G1はLHDのミッション研究、G2は物理研究と一応の棲み分けはされていたが、研究テーマで区分された研究組織へ改組する必要性が生じてきた。

さらに、平成16年4月の法人化後は、研究所の研究組織が満たすべき要件は、文部科学大臣から提示された中期目標を達成するため、研究所が作成した中期計画を確実に遂行できることとされた。また、平成15年1月8日に報告された、科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合ワーキンググループの「今後の我が国の核融合研究の在り方について（報告）」に対応できる研究組織であることが必要不可欠となった。このため、第63回運営協議員会に設置された、「平成16年4月に設置される自然科学研究機構核融合科学研究所の組織」について検討するための組織検討小委員会では、これらの要件を満たす研究組織について議論が行われ、組織検討小委員会から答申された新組織案が第66回運営協議員会で承認された。これを受け、平成16年4月の法人化にともなって大型ヘリカル研究部の改組が行われ、上述の要件を満たす研究組織が誕生した。

平成16年4月の改組で誕生した大型ヘリカル研究部の研究組織は、具体的には、プラズマ制御研究系、高温プラズマ物理研究系、高周波加熱プラズマ研究系、粒子加

熱プラズマ研究系、炉システム・応用技術研究系、理論・データ解析研究系の6つの研究系からなっている。改組の趣旨に沿って、LHD建設期の担当ハードウェアに応じた構成から、研究テーマに則したものに改組されている。このことは、実験の推進が、後で述べる「実験テーマグループ制」の基で行われていることから明らかである。また、この研究組織では、予算の執行においても、重点化、効率化、透明性がさらに図られ、核融合研究ワーキンググループの報告の精神に則って、LHD計画の効率的推進が行われている。

2.2 3つのカテゴリーによる幅広い共同研究の展開

研究所の全ての研究、研究会等は、共同研究として研究所外から参加者を募って実施ことを前提としており、LHDも例外ではない。実際、共同研究は、LHDの研究を遂行する上で重要な役割を果たしている。このため、本節で共同研究について述べることにする。

研究所では、平成16年度から双方向型共同研究を開始している。双方向型共同研究は、後で詳しく述べるが、大きな核融合実験装置を有する筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターと核融合科学研究所が双方向で行う共同研究、これらのセンター間で各々行う共同研究、及び大学等の研究者がこれらのセンターに出向いて行う共同研究からなっている。これで、共同研究は、一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究の3つのカテゴリーで構成されることになり、より自由に、また、より活発に共同研究を推進する体制が構築された。

LHD計画共同研究の募集は、主に日程上の問題で、平成16年度までは一般共同研究とは別に手続きが行われていた。しかし、平成17年度からは、LHD計画共同研究、一般共同研究、双方向型共同研究の3つのカテゴリーを同一の公募案内で募集している。これにより、共同研究採択のプロセスの透明性をさらに増すことができたと考えている。LHD計画共同研究では、テーマを絞り、一般共同研究より大きな予算を使ってLHD計画の推進に役立つ研究を行っている。LHD計画共同研究の終了後、一般共同研究のカテゴリーに移って、LHDで実験を行うことが本来の趣旨に沿った自然な流れであるが、逆に、一般共同研究で萌芽的な研究が進展したため、将来LHDに適用されることを見込んで規模の大きなLHD計画共同研究に発展したもの等もあり、これまで、一般共同研究とLHD計画共同研究は相補的な役割を果たしてきた。平成16年度からは、これに双方向型共同研究が加わったため、より自由に共同研究が進められるようになり、3つのカテゴリーによる共同研究体制は核融合研究の一層

の進展に役立っている。図 2.2-1 に 3 つの共同研究カテゴリーの機能を示す。

共同利用・共同研究の運用は、共同研究委員会によって行われている。即ち、運営会議のもとに共同研究委員会が設けられており、そのもとに一般共同研究に関する委員会、LHD 計画共同研究に関する委員会、双方向型共同研究に関する委員会の 3 つの専門委員会が作られ、それぞれの幹事長（委員長）にはコミュニティを代表して所外の委員にご就任頂き、審議の透明性を確保して頂きながら、各々研究課題の採択等を行っている。但し、研究課題の採択、予算の配分等の最終的な決定は運営会議で下されている。共同研究は、採択、実施後、必ず報告書を提出して頂き、成果を公表している。また、成果報告会を開催し、LHD 計画共同研究は採択された全ての研究課題、双方向型共同研究は中核となるセンターの研究課題並びに採択時に指定した研究課題、一般共同研究は採択時に指定した研究課題について、発表して頂いている。さらに、次年度の研究課題の審査の参考にするため、研究成果の評価が各委員会で行われる等、共同利用・共同研究の運営に必要な全てのプロセスで透明性を確保するための方策が取られている。

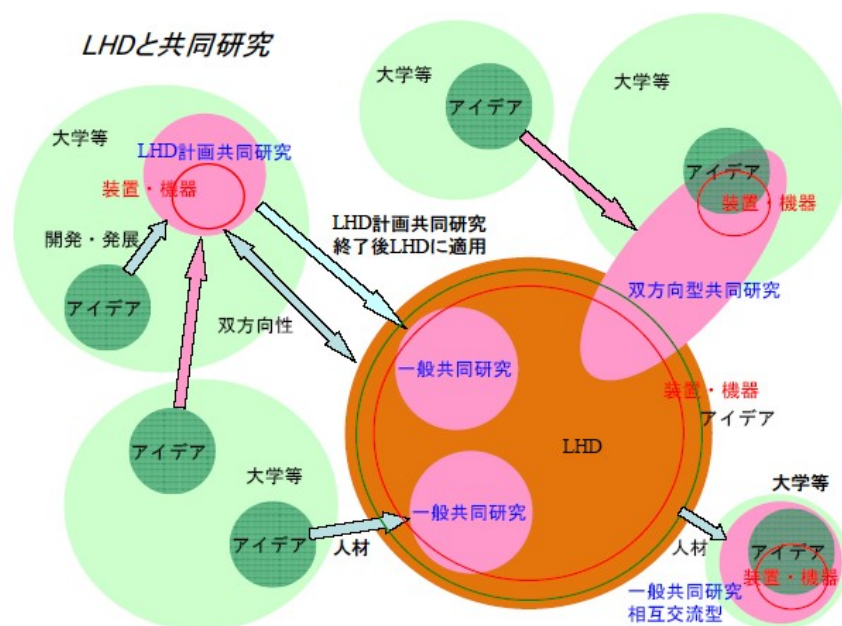


図 2.2-1 3 つの共同研究の役割

1) 一般共同研究

一般共同研究は、研究所設立時から開始された最も歴史のあるもので、大学共同利用機関法人の根幹をなすものである。この共同研究は、大学等の共同研究者に研究所に来て頂き、研究所の装置、予算を使って、共同研究を行って頂く制度であり、他にはない我が国独自のものである。

LHD では、平成 14 年度の第 6 サイクルから、各研究課題を共通するテーマで大

大きく分類し、それにマシンタイムを与えよう、所謂、テーマ制を導入した。大きく分類された研究課題のグループをテーマ枠と呼び、2サイクル毎（2年毎）に見直しをしている。平成16年度からは、責任を持ってLHDのミッションを達成するため、テーマ+ミッション制を採用した。テーマ枠見直しの年度であった平成18年度には、テーマ枠をミッション研究、物理テーマ研究、工学テーマ研究に分類し、平成17年度までのテーマ+ミッション制ではミッションが後から加わったため、テーマ枠の内容が一部重なっていたのを改め、テーマ枠の内容が重複しないようにした。また、テーマ枠の数も10に整理して、実験の合理性、融通性、機動性を増すこととした。テーマ+ミッション制の採用と、これにより合理的な実験の推進が可能となったことから、所外の共同研究者が実験テーマをより明確に把握し、実験への参加がより円滑に行われるようになったと考えている。しかし、計測機器、マシンタイム、実験条件等によっては、提案された研究課題が実行できない場合も考えられる。このため、特に所外研究者が新規に申請される場合、応募前に所内世話人と公募担当者が十分相談に乗れる体制を整えている。また、後で述べる「大型ヘリカル実験会議」では、共同研究委員会での採択の参考となるように、申請書を検討し、実験可能であるか否か等のコメントを事前に記載するようにしている。

LHD 実験に関係した一般共同研究の研究課題は、上記テーマ+ミッション制のテーマ枠を示して公募されている。平成19年度のテーマ枠は、1-(1)-1 高 Wp、高密度、ローカルアイランドダイバータを用いた閉じ込め改善、1-(1)-2 高ベータ領域の拡大、1-(1)-3 定常プラズマ保持と高性能化、1-(1)-4 高イオン温度領域の拡大、1-(1)-5 コアプラズマの熱・粒子輸送、1-(1)-6 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用、1-(1)-7MHD 平衡と安定性、1-(1)-8 高エネルギー粒子の物理、1-(1)-9 波動加熱物理、1-(1)-10 装置工学実験の10個である。さらに、現在のLHD実験には直接関わっていないが、LHD の中期的な課題を達成するための共同研究課題枠として、主に各研究系で実施しているものに 1-(2)-1 本体システム物理・技術、1-(2)-2 超伝導技術、1-(2)-3 高周波加熱技術、1-(2)-4 高エネルギービーム技術、1-(2)-5 計測技術の5つがある。これらに加えて 1-(4)大型ヘリカル装置（LHD）理論共同研究もLHDにとって重要である。また、平成18年度からは、将来の重水素実験に備えて、1-(3)重水素実験計画検討が加えられた。

研究所内では、LHD 実験の提案書を新年度が始まる4月に提出して研究課題を分類し、テーマ枠の研究課題を確定している。その後、LHD の機器の状態、実験日程等を考慮した上で、テーマ枠の研究課題数、研究内容に応じて、マシンタイムをテーマ枠に割り振っている。このため、所外の共同研究者の方にも、研究課題が採択された後、改めてLHD 実験の提案書を4月に提出して頂いていたが、2重手間であることから、共同研究の申し込みがLHD 実験の提案となるよう様式を改め、共同研究の

応募が LHD 実験の提案となるようにした。具体的には、公募の申請時に希望するテーマ枠と共に、LHD 実験の提案書を記載して頂くこととした。これにより、手続きの簡素化が図られるとともに、LHD で提案した実験が可能か否かの判断が、研究課題の採択時に行われることになり、より判断の透明性が確保された。

2) LHD 計画共同研究

LHD 計画共同研究は、大学等で育まれている各種の研究、萌芽的研究、技術等を LHD 実験に適用・集約し、LHD 実験の画期的進展、実験及び装置運転の効率化等を図ることを最終目的にしている。このため、LHD 計画共同研究は、LHD 実験に適用・集約するまでに必要な事前の研究を、先ず大学等で行うための共同研究であり、平成 8 年度から実施している。従って、LHD 計画共同研究の終了後、一般共同研究に移って、LHD 計画共同研究の成果を基に LHD で実験を行う、あるいは LHD に適用することが原則である。

LHD 計画共同研究の研究課題としては、直接 LHD の実験・運転に関わらなくても、LHD 計画の推進に貢献できるものであれば採択されている。例えば、LHD 計画を進める上で、将来 LHD タイプの炉が成立するかどうかの問題は重要であり、推進する必要があることから、このような研究は LHD 計画共同研究の対象とされている。また、LHD 実験に適用・集約可能な各種の研究、技術等を広く掘り起こすには、核融合コミュニティからの意見・推薦が必要であり、このため LHD 計画共同研究の募集には核融合コミュニティの代表として核融合ネットワークに関わって頂いている。平成 17 年度からは、一般共同研究及び双方向型共同研究と同時に募集しているため、応募、採択等のプロセスの透明性がさらに確保されたと考えている。さらに、平成 19 年度からは、研究所が LHD 計画の推進に必要と考えている研究課題について、核融合ネットワークの推薦、LHD 共同研究委員会や運営会議の承認を頂いた上で、公募し、応募のあった中から採択頂くという新しい試みを開始した。

LHD 計画共同研究が一般の共同研究と異なるところは、応募された研究課題の中から件数を絞って採択し、重点的に研究が進められるようにする点である。これにより、効率的に研究が進められ、この成果を基に早期に LHD で実験等が実施されることになる。この点が、多くの研究課題が採択される一般共同研究と異なっている。

3) 双方向型共同研究

核融合研究を発展させるためには、研究所を含め、各大学等の研究をさらに活性化させる必要がある。このための方策として、双方向型共同研究が開始された。即ち、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して、研究の機会を増やすことが研究の活性化の施策になるものと考えられたことから、一般共同研究とは逆の研究者の動き、

即ち、研究所の研究者が大学等へ出向いて共同研究を実施することが両者の研究資源の相乗的な活用のために必要となった。また、双方向型共同研究に参加する大学等が、全国共同利用機関の機能を有するようになることも、全国の核融合研究をさらに活性化する上で重要であると考えられたため、双方向型共同研究で実現されている。

双方向型共同研究を開始するにあたって、これからの核融合研究をさらに発展させるには、研究者の動きに加えて、核融合研究に必要とされる重要課題を整理・集約し、学術的基盤を構成する大学等が研究課題を分担して進める必要があると結論付けられた。即ち、個々に研究の目標を定めるのではなく、研究所が共同利用機関の特徴を生かして共同研究体制を強化し、核融合研究に必要とされる重要課題を集約後、これを自主性・自律性に基づき大学等と分担、連携して進めることが必要とされた。これにより、共同研究の枠組みの中で大学等に必要な研究者を派遣することが可能になる等、全体としてバランス良く研究が進展する仕組みを構築することが可能となった。このような議論に基づいて、平成16年度から新たに「双方向型共同研究」の枠組みが構築され、学術的要素課題を互いに分担する新しい共同研究体制がスタートした。具体的な分担課題は、筑波大学における「電位形成のプラズマ閉じ込めに及ぼす研究」、京都大学における「磁場分布制御による輸送・安定性研究」、大阪大学における「レーザーによる高速点火研究」、九州大学における「定常運転研究」の4つである。この双方向型共同研究により、LHD プラズマの高性能化やトロイダルプラズマの総合的理解等に必要となる物理的、工学的課題を解明するため、研究所や大学附置研究所のセンターの装置・設備を有機的に活用することが可能となった。

双方向型共同研究を核融合コミュニティの中で円滑に推進し、その研究推進基盤の構築を図るため、運営会議共同研究委員会の下に新たに双方向型共同研究委員会が設置された。この委員会は、双方向型共同研究に応募してきた研究課題の採択、研究課題の予算の決定、今後行うべき研究の企画等の実施案を作成する機能を持っており、双方向型共同研究を発展させるのに十分な能力を有している。例えば、企画力に関しては、双方向型共同研究の中心の一つとなっている九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターが TRIAM-1M 計画を終了し、「TRIAM-QUEST」計画を開始した際に、指導的役割を果たしたこと等が上げられる。QUEST は、球状トカマク (ST) 装置で、高ベータ実験が可能であり、同センターは ST を使って定常運転研究の推進を目指すこととなった。

QUEST の実験は、高温プラズマ力学研究センターに設けられた「高温センター実験会議」と「TRIAM-QUEST 実験推進会議」によって推進されることが決定され、運用が開始された。このうち、高温センター実験会議は、学外の共同研究者も加わっているが、九州大学が主導し、QUEST の運転・保守を主に担当している。これに対して、TRIAM-QUEST 実験推進会議は、学外の共同研究者がコーディネータを務め、

マシンタイムの決定を始めとして実験を推進する役割を担っている。これにより、実験推進のための諸決定の透明性が確保されたといえる。この従来にない新しい実験体制が構築されたことにより、QUEST は、九州大学の装置ではあるが、真に日本全国の共同研究者に開かれた装置として位置づけられ、今後、全国の英知を集めて、大きな成果を上げることができるものと期待されている。また、ST 装置に関係した国内外の研究者を含む委員で構成された双方向型共同研究推進専門部会【ST】を双方向型共同研究委員会の元に設置し、QUEST を中心とした ST 研究の活性化を図るものとした。即ち、研究所を中心とした双方向型共同研究の枠組みの下で ST 研究者の密接な連携を図りつつ ST 研究を推進し、我が国の大学・国公立研究機関等における核融合研究の学術基盤の長期的構築に寄与させるものとした。双方向型共同研究は、所謂、ネットワーク型共同研究であるが、その下に別の形式のネットワーク共同研究が構築されたことになり、ネットワークの多層化が図られたといえる。さらに、TRIAM-QUEST 実験推進会議の現在のコーディネータは、双方向型共同研究推進専門部会【ST】の部会長が務めており、双方向型共同研究委員会の意向が、QUEST 実験に反映される形となっている。

2.3 共同研究実施体制

1) 大型ヘリカル実験会議

LHD の実験の実施計画は大型ヘリカル (LHD) 実験会議において策定される。LHD 実験会議は大型ヘリカル研究部研究総主幹 (小森彰夫) が主催し、構成員は、図 2.3-1 に示すように、10 名の実験責任者 [大型ヘリカル研究部の理論・データ解析を除く 5 研究系から主幹および実験を主導する職務上の代理 (以下、主幹代理) が務める]、理論データ・解析研究系主幹、技術部の部長と 5 課長、安全管理センター長、シミュレーション科学研究部の LHD 磁場閉じ込めシミュレーション研究系主幹、共同研究委員会委員長、日米協力委員会委員長、所内の国際交流委員会委員長、真空維持管理委員会委員長、本体棟配置作業会世話人、安全衛生推進部長、そして所外の共同研究者を代表した 6 名の研究者からなっている。この構成は、LHD 実験を遂行する上で必要な全ての情報が得られるように、また、決定ができるように考えて決められており、所外の共同研究者を代表した 6 名の研究者の参加は、大学共同利用機関法人として共同研究の観点から運営の透明性を確保するとともに、他機関の運営、各種情報等を参考にするためである。LHD 実験会議の開催頻度は、LHD の実験中は週に 1 回、メンテナンス期間中は隔週に 1 回であるが、必要に応じて随時開催している。

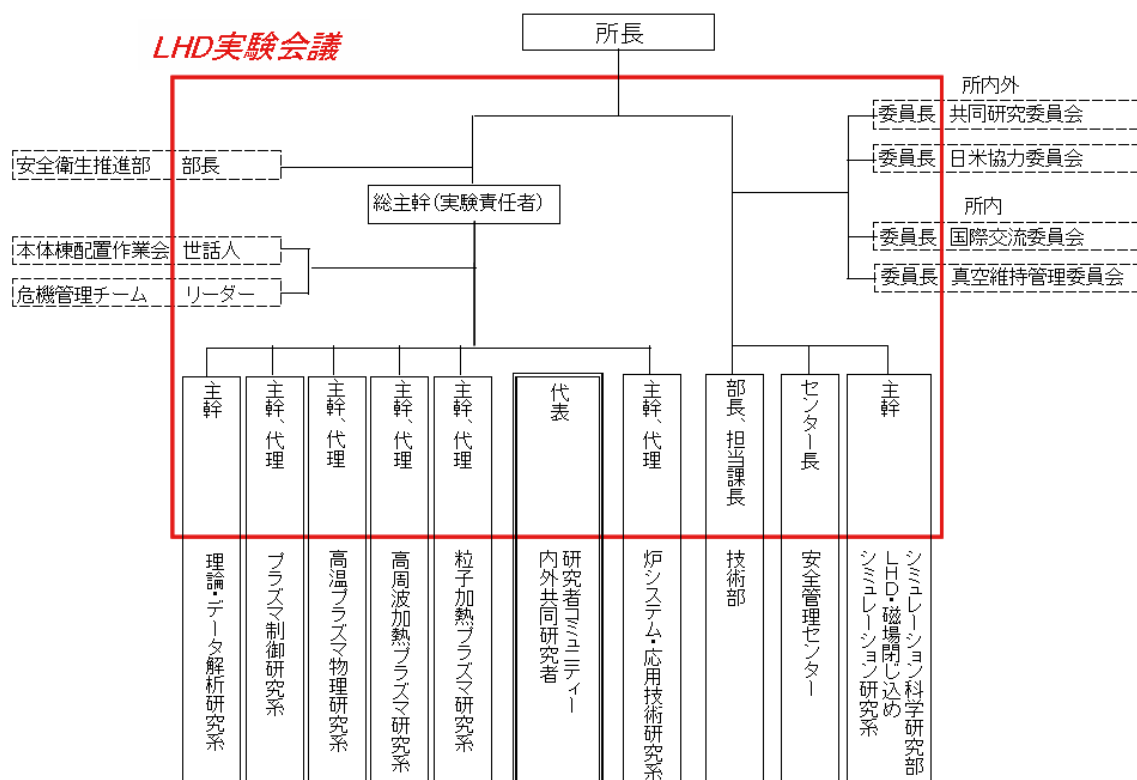


図 2.3-1 LHD 実験会議の構成

LHD 実験会議は、上述のように、LHD 実験を遂行する上で必要な全ての事項を決定している。特に、長期的実験計画の策定、それに伴う機器の整備計画の策定、テーマ枠の設定、テーマリーダーの選出、内外の共同研究者との共同研究の実施、実験スケジュールの立案・実施・変更、装置の運転・保守、予算要求の策定、予算配分の決定、実験の安全確保、共同研究者へのデータ提供、データのセキュリティ確保、各種の情報発信、成果等の公表等は重要な取り扱い事項である。

LHD 実験会議では、共同研究を促進するため、また、市民の方に LHD をご理解頂くため、実験情報を提供することに力を入れている。日々の実験情報については、実験の次の日に（次の日が土曜日の場合は、火曜日までに）ショットサマリーとして、また、一週間を通した実験結果は、週間実験レポートとして、研究所のホームページ上で公開している。サイクルと呼ばれる約5ヶ月に渡る実験期間の実験の大局的な進捗状況については、数回、まとめたものをホームページに掲載するとともに、共同研究者、市民の方へメールでもお知らせしている。さらに、プラズマ実験期間中は、ホームページで、制御室及び LHD 本体の様子をリアルタイムで公開している。特に、共同研究者には、共同研究申請時にメールアドレスを記載して頂いたことから、これを利用して、LHD 実験に参加している全ての研究代表者と分担者に、実験スケジュールと関連する情報などをお伝えしている。具体的には、1 週間の実験スケジュールを前の週の金曜日に、実験前日に翌日の実験スケジュールと前日のショットサマリー

を、また、実験スケジュールの変更の情報や機器状態についても、適時、メールでお知らせしている。これにより、実験スケジュールの変更などで、共同研究が行えなくなる事態を避けるとともに、共同研究を行うタイミングを共同研究者自身を取り易くなったと考えている。

2) 実験テーマグループ制

先に述べたように、LHD では、平成16年度から、テーマ+ミッション制を採用している。テーマ枠見直しの年度であった平成18年度には、テーマ枠をミッション研究、物理テーマ研究、工学テーマ研究に分類し、テーマ枠の数を10に整理した。ミッション研究のテーマ枠は、1-(1)-1 高 Wp、高密度、ローカルアイランドダイバータを用いた閉じ込め改善、1-(1)-2 高ベータ領域の拡大、1-(1)-3 定常プラズマ保持と高性能化、1-(1)-4 高イオン温度領域の拡大となっている。また、平成18年度及び19年度の物理テーマ研究は、1-(1)-5 コアプラズマの熱・粒子輸送、1-(1)-6 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用、1-(1)-7 MHD 平衡と安定性、1-(1)-8 高エネルギー粒子の物理、1-(1)-9 波動加熱物理で、工学テーマ研究は、1-(1)-10 装置工学実験である。平成18年度及び19年度のテーマリーダーは、ミッション研究では大型ヘリカル研究部の者が当たっているが、物理テーマと工学テーマ研究については、全て、所外の共同研究者が務めている。テーマリーダー及びサブリーダーについても、テーマ枠に合わせて2年毎に見直しており、これまでは殆ど全員が見直しで入れ替わっている。

研究系とテーマ枠の関係で言うと、プラズマ制御研究系が 1-(1)-1、1-(1)-5 及び 1-(1)-6 を、高温プラズマ物理研究系が 1-(1)-2 と 1-(1)-7 を、高周波加熱プラズマ研究系が 1-(1)-3 と 1-(1)-9 を、粒子加熱プラズマ研究系が 1-(1)-4 と 1-(1)-8 を、炉システム・応用技術研究系が 1-(1)-10 を担当している。即ち、炉システム・応用技術研究系を除き、各研究系はミッションのテーマ枠1つと物理テーマ枠1～2つを担当している。このように、現在の大型ヘリカル研究部は、研究テーマで区分された研究組織となっている。但し、各テーマ枠への参加については、系の垣根はなく、研究者は組織を横断して自由に参加できる。LHD 実験に採用される研究課題の総数は、毎年200件を超えており、そのうち所外からのものは30~40件である。所内研究者の多くは提案した複数の実験テーマが採用されているため、所外からの参加員数は実質的に全体の30%程度に当たる。(表2. 3-1)

表 2.3-1 平成 19 年度実験テーマ枠とグループ体制

青字は所外研究者。提案数の括弧内は所外からの提案で内数。

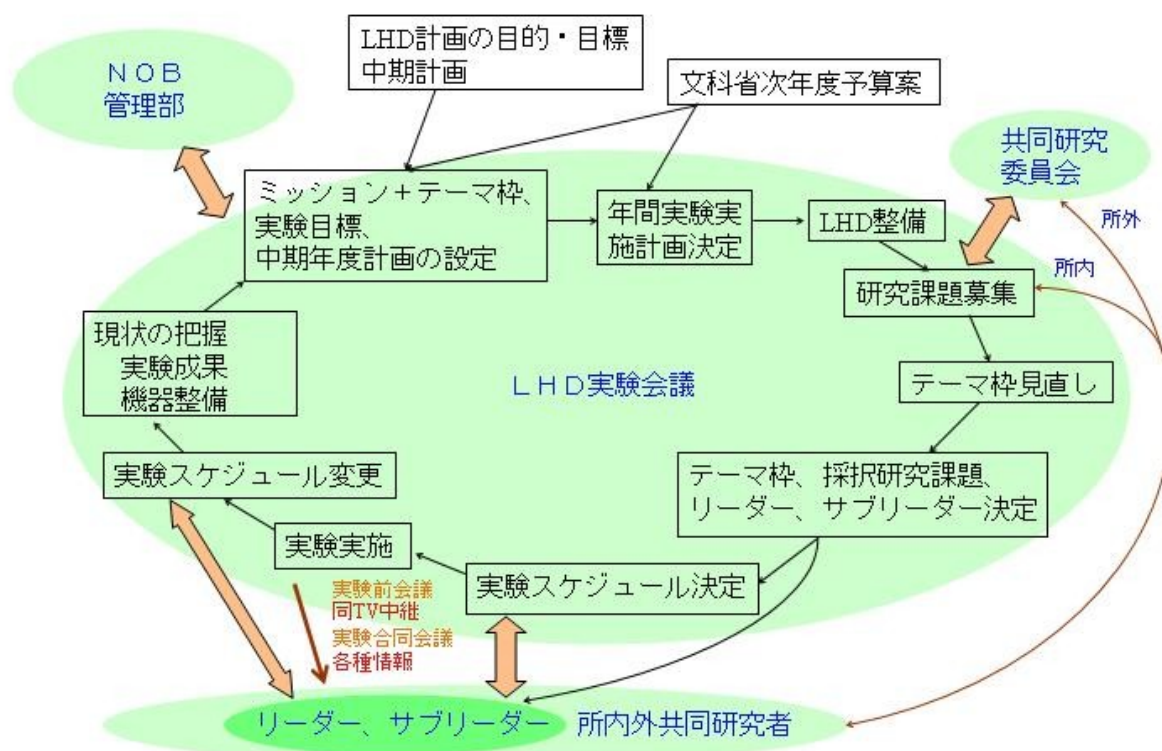
担当研究系	主幹 主幹代理	テーマ枠	リーダー	サブリーダー		提案数
プラズマ 制御	山田弘司 長山好夫	ローカルアイランド ダイバータと 閉じ込め改善	坂本隆一	小林政弘		22 (1)
		周辺プラズマ物理と プラズマ壁相互作用	大野哲靖 (名大)	増崎貴	芦川直子	45 (15)
高温 プラズマ 物理	川端一男 渡辺清政	高 β	大舘暁	榊原悟		11 (1)
		コアプラズマ輸送	福田武司 (阪大)	田村直樹	舟場久芳	37 (5)
		MHD 平衡と安定性	中村祐司 (京大)	成嶋吉朗	渡邊清政	25 (3)
高周波加熱 プラズマ	武藤敬 下妻隆	定常運転	斉藤健二	吉村泰夫		14 (0)
		波動加熱物理	田中仁 (京大)	伊神弘恵	関哲夫	18 (3)
粒子加熱 プラズマ	金子修 居田克巳	高イオン温度	横山雅之	永岡賢一		17 (1)
		高エネルギー粒子 閉じ込め	村上定義 (京大)	徳沢季彦		18 (2)
炉システム 応用技術	今川信作 三戸利行	装置工学実験	岡村哲至 (阪大)	柳長門		9 (2)

3) LHD 実験実施の流れ

実験計画実施の流れを図 2.3-2 に示す。年度初めに、研究所の研究者から、その年度の研究課題を募集し、応募のあった研究課題の中から実施すべき研究課題を採択する。この採択された研究課題と、共同研究として所外から応募し、採択されたものをテーマ枠へ割り振るとともに、テーマリーダー、サブリーダーの決定などを行う。採択された研究課題によっては、次節で述べるテーマ枠の見直しを行う。テーマリーダーは、サブリーダーと協力して、担当しているテーマ枠の研究課題の実験計画を立てる。これらの実験計画を集め、LHD 実験会議で全体的な整合性と合理性を勘案して調整作業を行い、年間の実験スケジュールを策定する。

実験を実施する際には、担当実験責任者（主幹と主幹代理）が当日の安全や緊急の対応に責任を持ち、テーマリーダーとサブリーダーが中心となってプラズマ放電条件の決定などの任に当たることにより、実験を遂行する。通常、担当実験責任者は 9 時から 18 時 45 分までの 1 日の実験を通して担当し、2 つから 3 つのテーマ枠が 1 日のマシンタイムの中で割り当てられる。装置や実験条件の状況によって、前もって決

められた年間スケジュール通りに実験が行われない場合には、LHD 実験会議において、所期の目標に照らしてもっとも成果が生まれるように変更調整を行う。さらに、実験成果および機器整備の状況を判断し、次年度以降の計画に反映を図る。



1

図 2.3-2 実験計画の流れ

共同研究の実施に当たっては、LHD が大きな装置であり、利用者も多いことから、特に真空に関わる計測などの機器の取り付けを希望する場合には、所内外、国内外の研究者に拘わらず、同一の厳しい規定が設けられている。些細なミス一つでも、LHD が長時間止まる可能性があるため、ポートの使用、機器の設置スペース、真空機器の設計・製作・検査、機器設置などについては、必要とするかなり前から、所内世話人に相談するとともに、技術部と技術的な打合せをするように求めている。これらの手順を図 2.3-3 に示す。ポート等の詳細は、「大型ヘリカル装置実験資料集」に記載されており、諸手続きは Web を介して行えるよう整備されている。但し、これらの手続きを所外の共同研究者に代わって所内世話人が行うことは可能であり、通常は、所内世話人によって行われている。

研究所で実際に実験に参加することにより、共同研究を遂行することに加えて、遠隔地からの実験参加を可能とする手立てを順次講じている。スーパーSINET を用い

て制御室と同等のデータへのアクセス環境を実現した拠点が、これまで九州大学、京都大学、名古屋大学、広島大学、東京工業大学、東京大学、東北大学の7ヶ所に設けられた。双方向の環境を整備するために、多地点中継が可能なTV会議システムを導入し、制御室の情報だけではなく、テーマ枠別の研究打合せにも多用している。制御室の音声と画像や実験放電条件・ログなどの情報はインターネットを介しても配信しており、スーパーSINET環境を持たない共同研究者にも一方向ではあるが、実時間の実験情報の提供を行っている。データへのアクセスもワンタイムパスワードとVPNを利用して所外からセキュリティを確保しつつ、登録ユーザーには所内と同じアクセス環境を提供している。

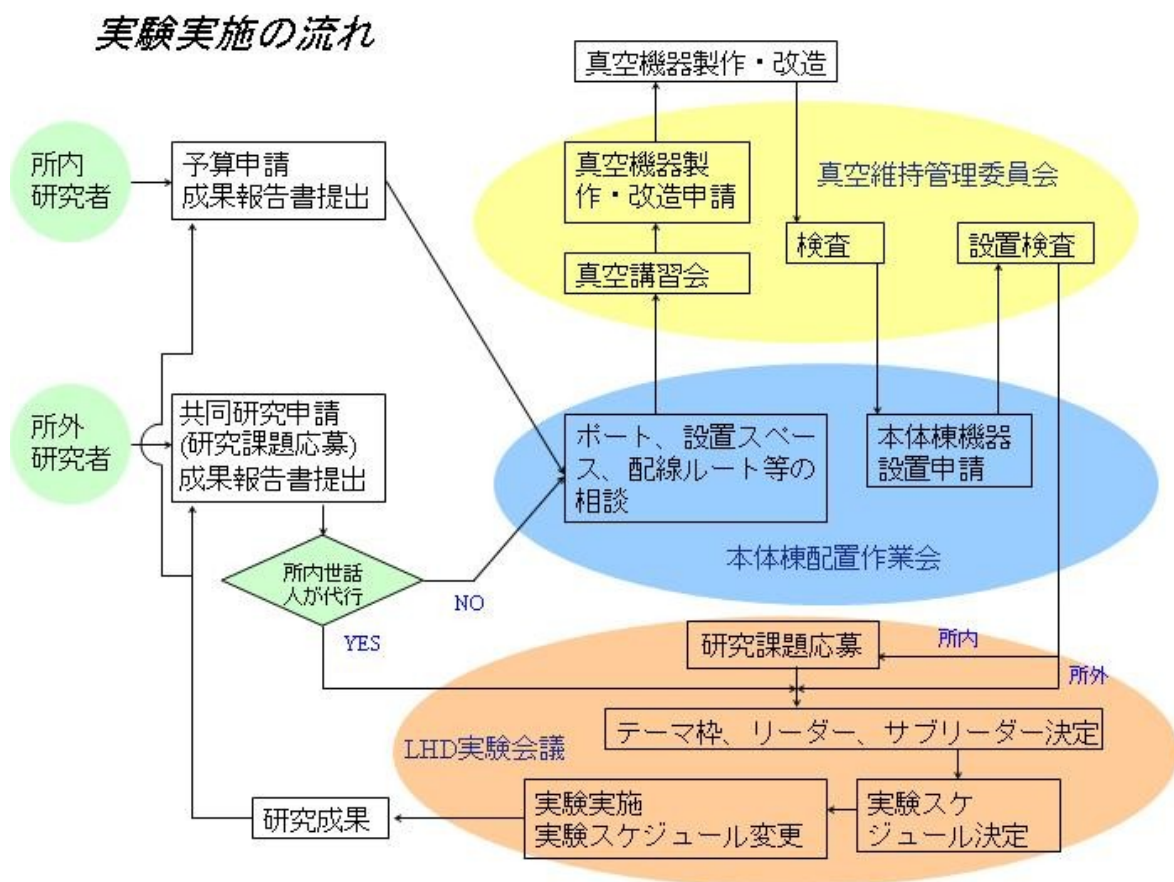


図 2.3-3 実験実施の流れ

3. 大型ヘリカル装置の研究成果

3.1 ミッションテーマ実験 – プラズマの高性能化

1) 高蓄積エネルギー, 高密度, LIDを用いた閉じ込め改善

1.1) 内部拡散障壁形成による運転領域拡張

LHD では能動的な粒子制御によって閉じ込め特性の改善を目指した実験が精力的に行われてきた. その結果, 内部拡散障壁 (I D B : Internal Diffusion Barrier) を生成する為の条件を見だし, 高密度/高圧力のプラズマを安定に閉じ込めることに成功した. 内部拡散障壁の形成に伴い, 最大中心密度は核融合炉で必要となる密度を大きく上回る $1.1 \times 10^{21} / \text{m}^3$ を, 最大中心圧力は大気圧を超える 150 kPa を達成している.

ローカルアイランドダイバータ (L I D : Local Island Divertor) は, 強力な能動排気によって, LHDプラズマの大幅な閉じ込め特性改善を探索する為のツールとして開発, 導入されており, これまでのトーラスプラズマ実験装置の中で最も強力な粒子排気特性 ($\eta_{\text{pump}} \geq 20 \%$) を有している. 固体水素ペレット入射装置は 10 K の極低温で冷却固化した固体水素小粒 (ペレット) を 1000 m/s 以上に加速し, プラズマ中に入射する粒子供給法であり, 高温プラズマ中心部への直接粒子供給が可能である.

2004 年度 (第 8 サイクル) の実験において, 固体水素ペレット入射による中心粒子供給と L I D による周辺能動排気を組み合わせた粒子制御によって, 通常のガスパフ粒子供給では見られなかったプラズマ蓄積エネルギーの急激な上昇と電子密度分布が尖塔化する現象が発見された. 2005 年度 (第 9 サイクル) の実験では, 上記の尖塔化電子密度分布が発現する運転領域を開拓する為に, 磁場配位や固体水素ペレット入射法の最適化を行った. その結果, 磁気軸位置を標準 (3.6 m) よりも外側にシフトさせた 3.75 m の磁場配位にて, 30 ms 以下の短い間隔で固体水素ペレットを入射することによって, 急峻な密度勾配を有する放電が安定して得られることを明らかにした (図 3.1.1-1) [1, 2, 3]. 密度分布には規格化小半径 0.5 付近に密度勾配 ∇n の跳びがあり, 内部拡散障壁 (I D B) と呼べる

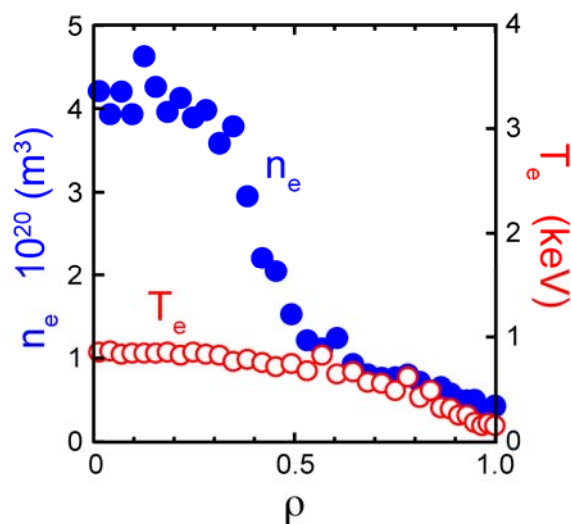


図 3.1.1-1 L I D による能動排気と固体水素ペレットによる中心粒子供給の組み合わせで得られた内部拡散障壁 (I D B) プラズマ.

輸送障壁によってピークした分布が維持されていることが分かる. その中心密度は $4.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ に達する. このときの核融合三重積 ($n_0 T_0 \tau_E$) は $4.4 \times 10^{19} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ となり, これまでの LHD における核融合三重積の達成値を 2 倍に更新した. この様に, 固体水素ペレット入射による中心粒子供給と L I D による能動周辺排気の組み合わせによって, I D B 形成に伴う超高密度・高圧力プラズマが得られることを実証することができた. そして, この結果はヘリカル型核融合炉における高密度・低温度での自己点火シナリオに外挿出来る可能性を秘めている.

2006 年度 (第 10 サイクル) 実験では, I D B プラズマの物理機構理解とその性能向上を目指した実験研究を推進した. 加えて, 将来の核融合炉への適合性を鑑み, 熱負荷の観点から有利なヘリカルダイバータ配位での I D B 形成を主要な目的と位置付け, 磁気軸および磁場強度が異なる様々での固体水素ペレット入射実験を遂行し, I D B の発現領域を探索した. その結果, 開構造のため能動排気機能を有しないヘリカルダイバータ配位においても L I D 配位と同様に I D B が形成されることを明らかにした[4, 5]. I D B は磁気軸が 3.7 m よりも外寄せの磁場配位において, 固体水素ペレットによる粒子供給を行うことによって形成される. 最大到達密度は磁気軸が外寄せになるほど高くなり, 磁気軸が 3.9 m より外側の磁場配位では中心密度が $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ にも達する (図 3.1.1-2).

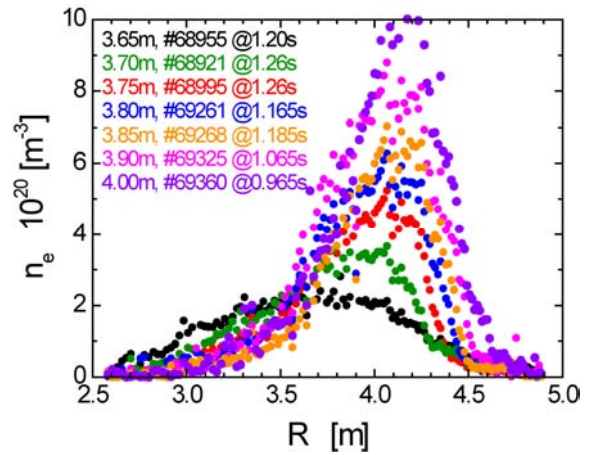


図 3.1.1-2 ヘリカルダイバータ配位において得られた密度分布.

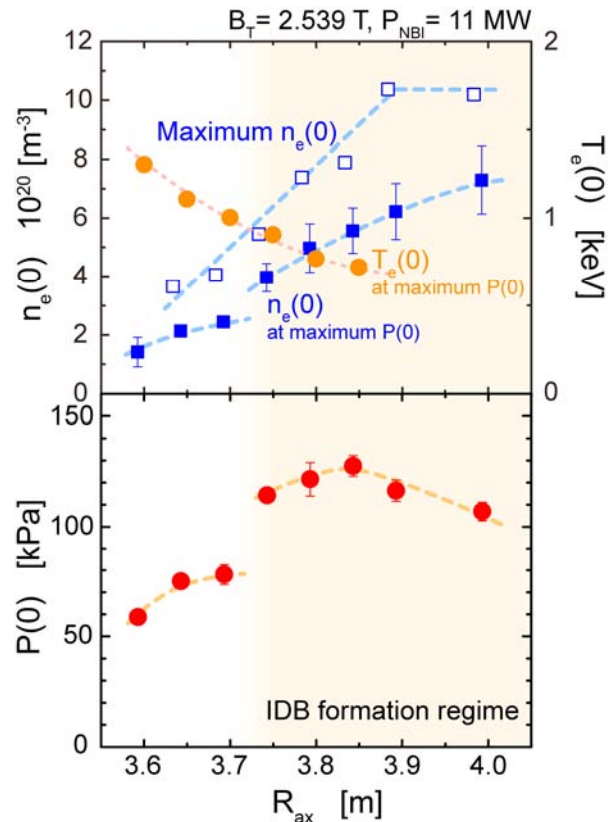


図 3.1.1-3 ヘリカルダイバータ配位において得られた I D B プラズマ中心密度, 中心温度, 中心圧力の設定磁気軸位置依存性.

一方、IDB形成領域の外側の密度は比較的低い密度を維持している．このため、パワーバランスを左右する周辺領域での放射損失が抑制され、従来の密度限界値 ($n_c = 0.25\sqrt{PB/a^2R} \approx 1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) を大幅に越える密度が安定に達成された．また、周辺の低密度領域では大きな温度勾配を得ることができており、それ故に、超高密度プラズマにも関わらず、比較的高い中心温度が期待できる．その結果、中心領域のプラズマ圧力は大気圧を超える 150 kPa (大気圧の 1.5 倍) に達し、その高いプラズマ圧力の為に $a_{\text{eff}}/2$ を超える大きなシャフラノフシフトで特徴付けられる．図 3.1.1-3 にヘリカルダイバータ配位における磁気軸スキャン実験の結果をまとめた．

IDB プラズマの密度分布の時間変化から求められる粒子束と密度勾配の関係から IDB プラズマにおける粒子輸送特性を調べた結果を図 3.1.1-4 に示す．このプロットの傾きは拡散係数を、y 切片は対流速度を示している．IDB 外側の低密度領域 ($\rho = 0.8$) では密度勾配が大きくなると拡散係数が 1 桁程度増加する一方で、IDB 内部 ($\rho \leq 0.5$) のコア領域においては、密度勾配が大きくなっても低い拡散係数を維持しており、IDB 内部の良い閉じ込め特性が示されている．

このような高密度運転においては、新古典拡散の両極性条件から負電場の形成が予測され、不純物蓄積が問題となる可能性がある．しかしながら、 Z_{eff} 計測からは不純物蓄積の兆候は見られておらず、不純物蓄積による閉じ込めの劣化は観測されていない．このことを説明する一つの可能性として、エルゴディック層における外向きプラズマ流のフリクションによって、閉じ込め領域への不純物混入が抑制されることが EMC3-EIRENE コードによるシミュレーションによって示されている．

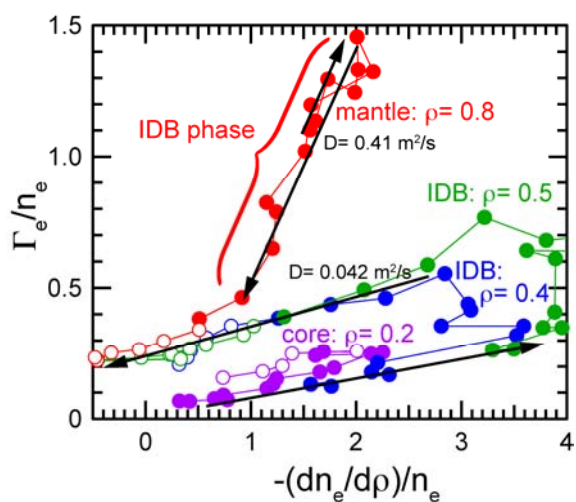


図 3.1.1-4 IDB プラズマの輸送解析結果．コア領域での良い粒子閉じ込め特性が示されている．

現状のヘリカルダイバータは開構造のため、能動排気機能を備えていないにもかかわらず、LIDと同様にIDBを形成することができた．しかしながら、ガスパフで強制的に周辺部への粒子供給を行った実験では、プラズマが放射崩壊を起こすために、放電を持続させることができないことが明らかになっている．このことはIDB形成におよぼす周辺排気の重要性を示唆しており、現在の短パルス実験の範囲では壁排気が有効であるが、将来のIDB放電の長時間実証実験のためにはヘリカルダイバータの閉化による強制排気機能が必須となるであろう．

1.2) 自己保持完全デタッチメント放電（サーペンシモード）

高密度プラズマの密度限界を調べるために、ガスパフ粒子供給による周辺プラズマ制御実験が行われた。その結果、大流量ガスパフによる周辺プラズマの冷却により、プラズマがダイバータ板から離れた状態（完全デタッチメント）を準静的に保持する条件を見いだした[6]。このデタッチメント放電では、ダイバータプラズマが輻射によって冷却されるために、ダイバータ板へ到達するプラズマエネルギーが軽減され（図 3.1.1-5），ダイバータ部への高熱流束流入に伴う除熱問題を軽減できる可能性がある。

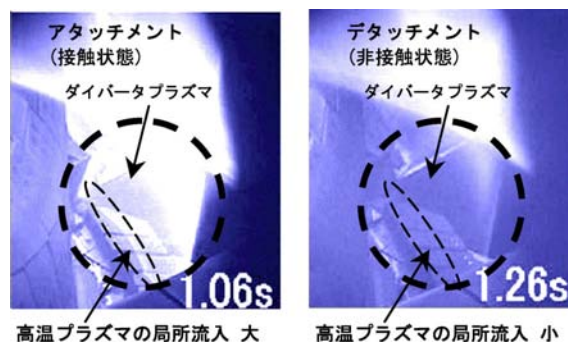


図 3.1.1-5 デタッチメント前後のダイバータプラズマ。

完全デタッチメント放電の典型的な放電波形を図 3.1.1-6 に示す。t = 1s から大流量ガスパフによって、ダイバータ熱流束が通常時の数分の 1 に減少したデタッチメント状態を作り出し、完全デタッチメントが準静的に保持される自己保持完全デタッチメント状態に移移する (t > 1.3s)。その後は NB I が停止するまで、外部からの制御無しで完全デタッチメント状態が維持される。

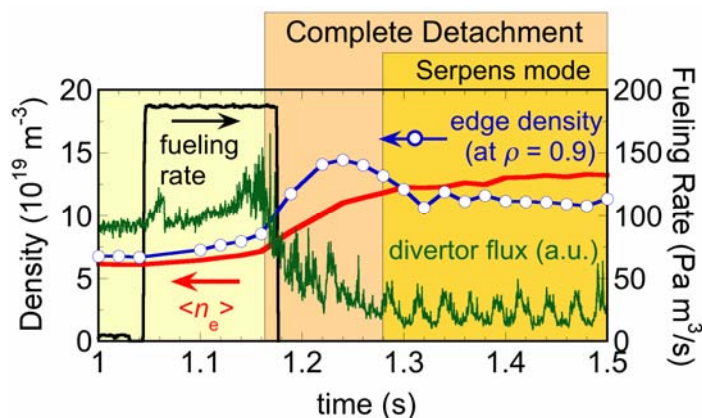


図 3.1.1-6 典型的な完全デタッチメント放電波形

1.3) 高密度プラズマの長時間維持

これまでの実験において、固体水素ペレット入射による粒子供給を行うことにより、エネルギー閉じ込め時間の密度に対する好ましい依存性を維持したまま、高密度にまで運転領域を拡張できることが明らかになっている。しかしながら、これまでの実験では固体水素ペレットの入射数に限りがあるために、過渡的な実験しかできていなかった。本研究では、核融合プラズマへの固体水素ペレット入射による粒子供給法の適合性を調べるために定常射出可能な連続ペレット入射装置を開発し、高密度／高閉じ込め放電の長時間維持実証実験を行った。その結果、連続ペレット粒子供給によって、良好な閉じ込め特性を定常的に維持できていることを明らかにした[7]。

図 3.1.1-7(a)はペレット入射タイミングの線平均電子密度 ($\bar{n}_e$) が一定値 (約 $0.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) になるようにペレット射出間隔を比較制御した場合の放電波形である。 $\bar{n}_e$ が設定値になるまでは 10 Hz でペレットが入射され、その後は射出間隔が広くなり、入射タイミングにおける $\bar{n}_e$ が設定値を超えないように実時間制御されている。ペレット入射による $\bar{n}_e$ 上昇は約 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であり、ベースの $\bar{n}_e$ の 30 % 程度の擾乱を与えている。一方、ローカルな電子密度に着目するとペレットの溶発ピークである $R = 4.1 \text{ m}$ における密度 ; $n_e(0.5)$ はペレット入射によって大きく変動しているが、中心密度 ; $n_e(0)$ はペレット入射時でも変化せず、一定値を維持している。ペレット入射前後の電子密度の空間分布は図 3.1.1-7(b) のようになっており、入射直後はペレット溶発位置に顕著なピークを持つ凹型の密度分布となり、プラズマ中心部の密度上昇は見られない。その後の密度減少フェーズにおいても中心密度は一定値に保たれており、溶発ピーク部からの内向きの拡散によって粒子が供給されていることが粒子輸送解析から明らかにな

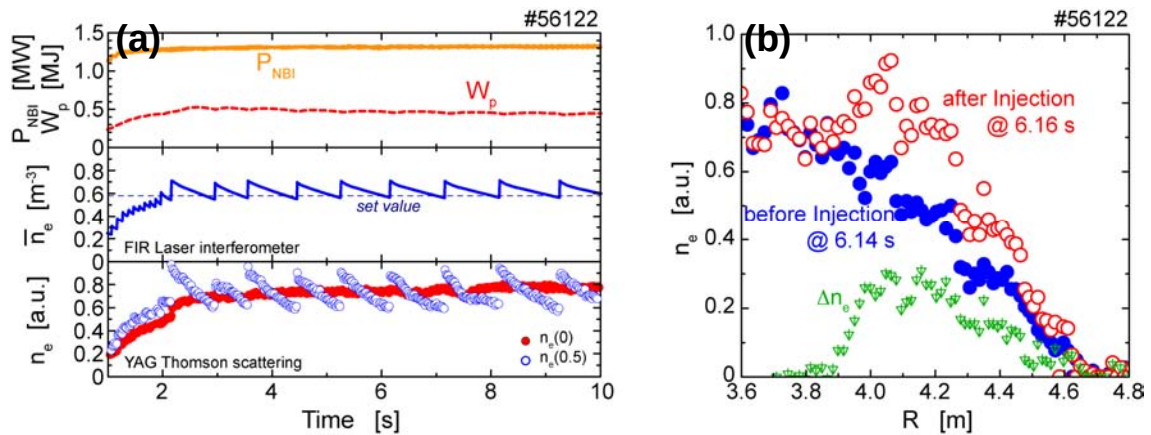


図 3.1.1-7 (a) 連続ペレット入射によって密度を準定常維持した放電波形, (b) ペレット入射前後の密度分布。

っている。このように、ペレットの侵入長をプラズマ半径の半分程度にすることによって、プラズマ中心部への擾乱を抑制しつつ、定常的にプラズマ中心部へ粒子を供給できることが示された。このときの閉じ込め特性に着目すると、ガスパフによる粒子供給では閉じ込め特性が飽和・劣化もしくは放射崩壊するような高密度領域 ($\bar{n}_e > 0.35 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) であるにもかかわらず、良好な閉じ込め特性を定常的に維持できていることが示されている (図 3.1.1-8)。

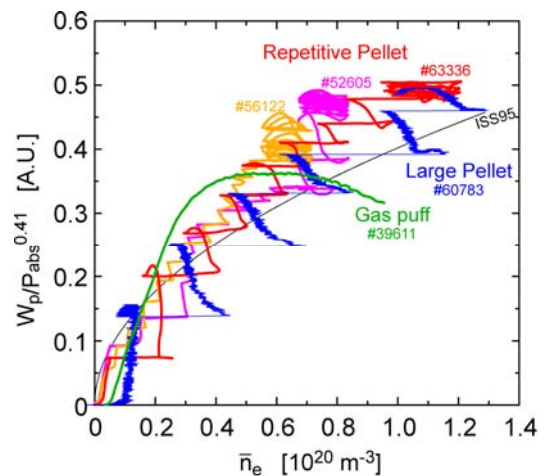


図 3.1.1-8 閉じ込め特性指標

($W_p/P_{\text{abs}}^{0.41}$) の密度に対する依存性。

1.4) 固体水素ペレット溶発現象理解に基づく粒子供給最適化

本研究では、高温プラズマ中における固体水素ペレット溶発現象の理解に基づいて粒子供給シナリオを最適化するために、ペレット溶発プラズモイドの詳細観測と分光学的解析を行っている。

図 3.1.1-9(a)は観測された溶発プラズモイドのスペクトルの例である[8]。水素原子の発光線（バルマー系列）は明らかなシュタルク広がりを呈し、 H_α 、 H_β 、および H_γ のみが単独の発光線として観測されている。これらの線広がり大きさから電子密度 $2.1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ が得られた。スペクトルの連続光成分は輻射再結合過程 (P^R) および輻射付着過程 (P^A) に伴うものが支配的であることが見いだされた。後者は中性原子から負イオンが形成される過程である。連続光強度の絶対値とその波長依存性から、電子温度 1.02 eV, 原子密度 $1.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, さらにプラズマ体積 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ が求められた。これらの結果から、観測されたプラズマが完全局所熱平衡状態に近いことが確認された。 H_α のプロファイルは、再吸収効果の影響を受けており、一次元の輻射輸送計算により、観測視線方向のプラズマの厚さが $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 程度であると見積もられた。この結果は、ペレットクラウドが視線に直行する方向へ非等方的に広がっていることを示唆している。

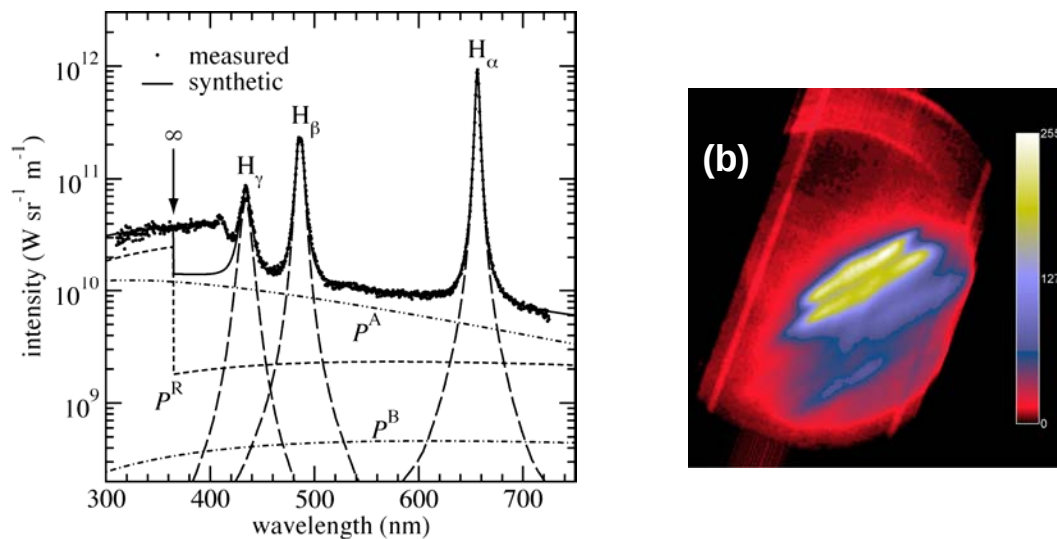


図 3.1.1-9 (a) 固体水素ペレット溶発プラズモイドのスペクトル. (b) 溶発プラズモイドの高速カメラ像

さらに、ステレオ高速カメラを用いた溶発プラズモイドの観測により、溶発プラズモイドは 500 kHz 程度で断続的に分離し、低磁場側へ加速（ドリフト）していることを示唆する観測結果が得られた（図 3.1.1-9(b)）。この結果は、実効的な粒子デポジション位置がペレットの溶発位置とは異なることを明示しており、今後の研究で溶発プ

ラズモイドのドリフトによって運ばれる粒子数を把握し、ペレット粒子供給法の最適化への指針を得たいと考えている。

参考文献

- [1] T. Morisaki et al., “Superdense core mode in the Large Helical Device with an internal diffusion barrier”, *Physics of Plasmas* 14 (2007) 056113.
- [2] N. Ohyaabu et al., “Observation of Stable Superdense Core Plasmas in the Large Helical Device”, *Physical Review Letters* 97 (2006) 055002.
- [3] N. Ohyaabu et al., “Properties of the LHD Plasmas with a Large Island-Superdense Core Plasma and Island Healing”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 48 (2006) B383.
- [4] H. Yamada et al., “Characterization and Operational Regime of High Density Plasmas with Internal Diffusion Barrier Observed in Large Helical Device”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, accepted
- [5] R. Sakamoto et al., “Pellet injection and internal diffusion barrier formation in Large Helical Device”, *Plasma and Fusion Research*, accepted
- [6] J. Miyazawa et al., “Self-sustained detachment in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 46 (2006) 532.
- [7] R. Sakamoto et al., “Repetitive pellet fuelling for high-density/steady-state operation on LHD”, *Nuclear Fusion* 46 (2006) 884.
- [8] M. Goto et al., “Experimental verification of complete LTE plasma formation in hydrogen pellet cloud”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 49 (2007) 1163.

2) 高ベータ領域の拡大

3. 1. 2. 1 高 β 実現の意義

経済的なヘリオトロン型の核融合炉を実現する上でプラズマの高 β 化は必須の課題である。標準的な炉設計によると、経済的な炉として必要な β 値は5%程度とされており、この値はLHDの設計時からの目標であった。図3.1.2-1に年度ごとの達成 β 値を示すが、2003年度より配位の細かな最適化を行ってきたこと、また加熱パワーの上昇もあって、2006-7年の第10サイクルで目標である $\beta=5\%$ を達成し、ヘリオトロン型の磁場配位で炉に外挿しうる高い β 値での運転が可能なることを示すことができた。本節では配位の最適化の詳細と、高 β プラズマの特性について述べる。

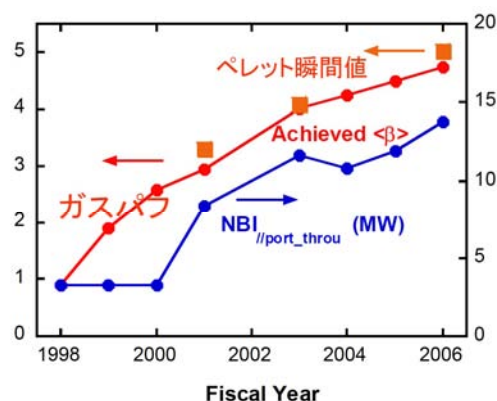


図 3.1.2-1 各年度の NBI 加熱パワーと達成 β 値

3. 1. 2. 2 プラズマの閉じ込め特性の配位依存性

ヘリオトロン型のコイルシステムは自由度が高く多様な磁場配位が得られる。 β 値をあげるために磁場の強度、磁気軸位置、プラズマのアスペクト比を変化させた実験を行い最適な配位を模索してきた。

磁場強度の最適化

ヘリカル系のプラズマの閉じ込め則 (ISS95, ISS04)[1]によれば、プラズマのエネルギー閉じ込め時間 τ_E は、ほぼ $\tau_E \propto P^{-0.6} n_e^{0.5} B_t^{0.8}$ という依存性を持つ。 β について書き直せば $\beta \propto P^{0.4} n_e^{0.5} B_t^{-1.2}$ である。このことから高い β 値を得るためには低磁場での実験が有用であることは明らかである。他方、図3.1.2-2に示すように、低磁場時に最も有効な加熱手段である接線方向の中性粒子ビーム入射装置 (NBI)の加熱効率は、入射粒子のプロンプトロスにより低磁場時に急速に劣化する[2]。このため磁場の大きさにはある最適値が存在するものと考えられる。

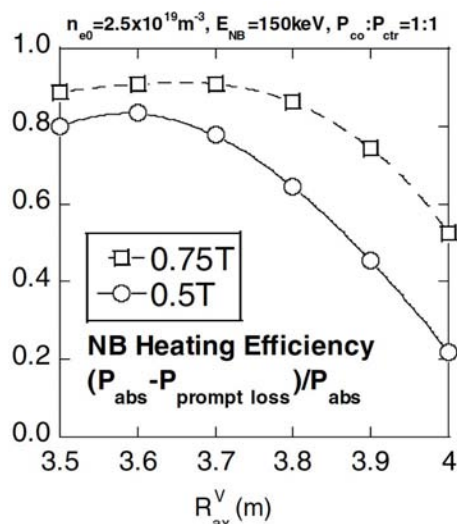


図 3.1.2-2 磁気軸の位置に対する、中性粒子ビーム入射装置(NBI)による加熱効率

磁気軸位置の最適化

磁気軸を内側に寄せた配位では粒子のドリフト軌道が磁気面に良く一致することから高い閉じ込め特性が、外側に寄せた配位ではプラズマのコア部が磁気井戸になるために、MHD 的に安定なプラズマが得られることが期待される。大型ヘリカル装置におけるこれまでの実験では内寄せ配位での閉じ込め特性が良い[1]。これは MHD 不安定な領域で運転した場合でも、不安定性は飽和しプラズマの閉じ込め特性に大きな影響を及ぼさないためと考えられる。

アスペクト比の最適化

接線入射の NBI の加熱効率はその入射大半径が 3.65m-3.70m に固定されていることから、磁気軸の位置が 3.6-3.7m より大きくなると急速に劣化する（図 3.1.2-2）。プラズマのシャフラノフシフトを抑制することができれば、高 β 時の加熱効率の劣化を防ぐことができる。プラズマのアスペクト比 A_p を変えて、回転変換を増加させることでシフト量を抑制できる[3]。

以上の 3 つのパラメータを走査した結果を図 3.1.2-3 に示すが、高 β プラズマを作る最適な放電条件の幅は狭く $B_t=0.425\text{T}$, $R_{ax}=3.6\text{m}$, $A_p=6.6$ ($\gamma=1.20$) 付近に最適値があることがわかる。

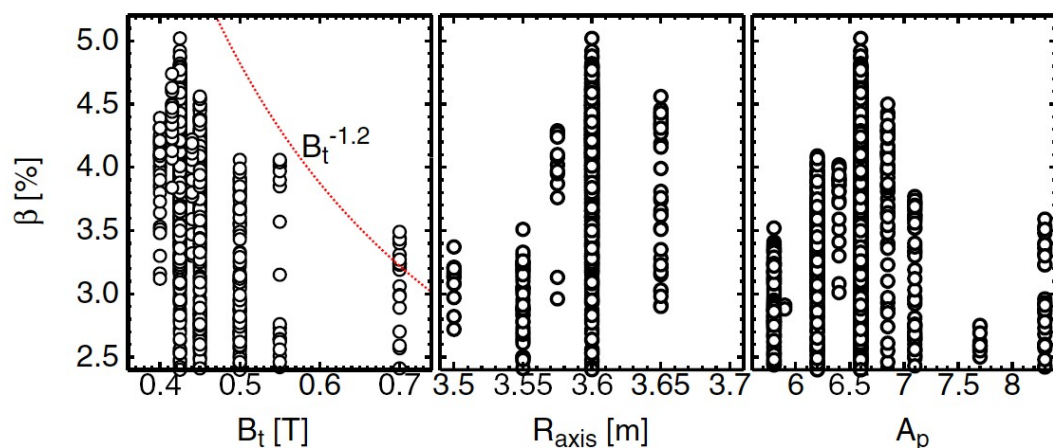


図 3.1.2-3 到達 β 値のプラズマパラメータ（磁場強度、磁気軸位置、アスペクト比）への依存性

図 3.1.2-4 に $\beta=5\%$ に達したショットの放電波形を示す。このショットでは放電中に水素ペレット入射と NBI 入射パワーの切り下げを行い、一時的に磁気軸を 3.6m 付近までもどし、接線入射 NBI に加えて、最近新設された垂直入射の NBI のパワーを活用することで高い β 値を実現した。 β 値が 5% 以上ある時間帯は短いが、4.5% 以上の時間帯はエネルギー閉じ込め時間の 10 倍程度の長さである。また、ガスパフのみの

放電で得られた β の最高値は 4.8% であり、そのとき、4.5% 以上の時間は 0.7s 以上であり、準定常な高 β 放電を行うことができた。

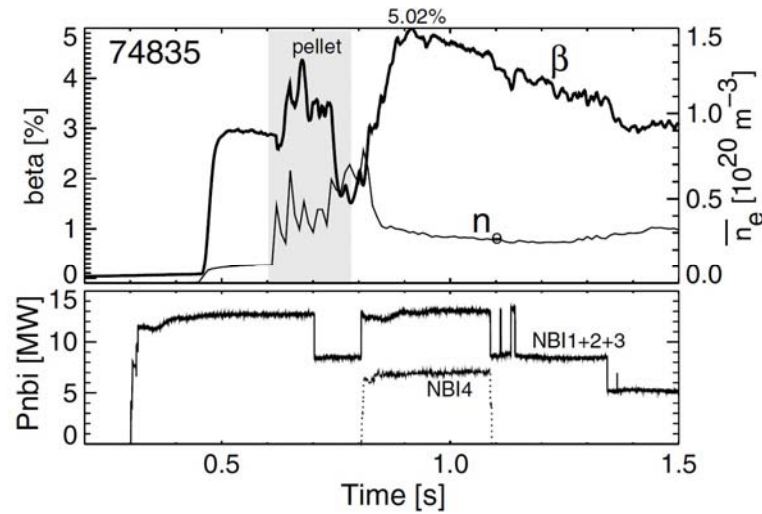


図 3.1.2-4 #74835 の放電波形

3. 1. 2. 3 高 β プラズマで観測される MHD 不安定性

磁場揺動の強度の S 依存性

β 値が 4% を超えるようなプラズマではコア部の有理面に共鳴する MHD モードは観測されておらず、周辺部に共鳴面を持つ ($m/n = 2/3, 1/1$) のモードが主として観測されている。この周辺揺動は磁気レイノルズ数 S に対して強い依存性を持っている (図 3.1.2-5)。揺動強度の S 依存性は、抵抗性交換型モードのモード幅の線形予測と比較的良く一致し ($\tilde{b}_\theta \propto (\beta^{1/6} S^{-1/3})^2$)、高 β 実験で観測されている低モード数の揺動は抵抗性交換型モードである可能性が高い。

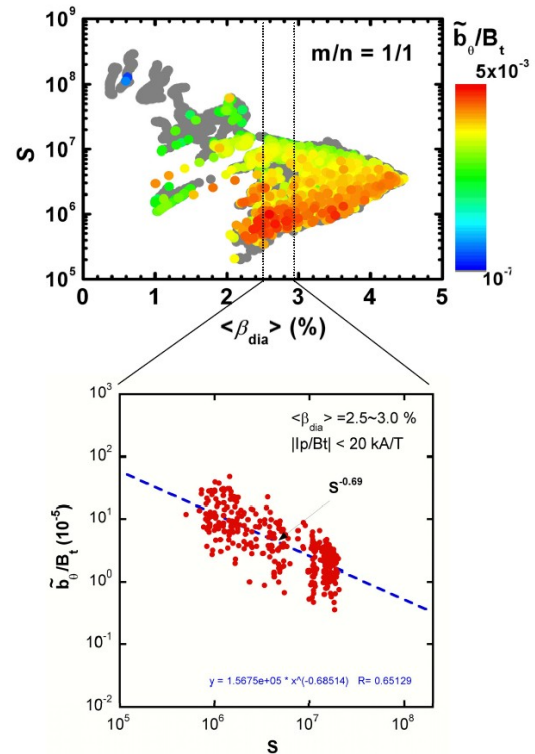


図 3.1.2-5 $m/n = 1/1$ の MHD 揺動振幅の磁気レイノルズ数依存性

磁場揺動と閉じ込め劣化の関連

それでは、観測されている MHD モードは閉じ込めに影響を及ぼさないのでしょうか？ 高 β 放電では ISS04 を基準とす

ると β 値の上昇とともに閉じ込め特性の劣化が観測されている。MHD 揺動が観測されている周辺部の輸送係数の劣化と、FIR 干渉計で観測された長波長のモードの振幅とは相関があり、揺動の増加が熱輸送の増加に寄与している可能性を示唆している(図 3.1.2-6)。この劣化の原因の最も有力な候補として抵抗性 MHD に起因した乱流輸送が考えられるが、核融合炉の運転領域では閉じ込め特性に大きな影響は与えないことが予測されている。

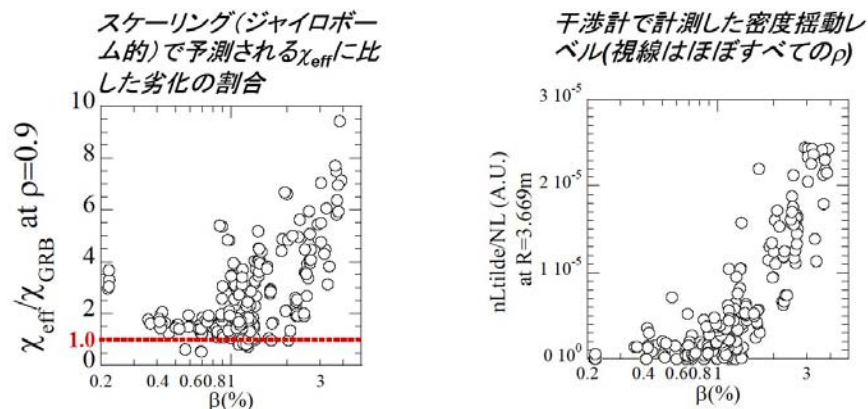


図 3.1.2-6 β 値に対する熱輸送係数の劣化と、長波長の揺動レベルの上昇を示す。

3. 1. 2. 4 MHD 不安定性の大域的な影響

LHD での大きな発見の一つは、メルシエ不安定な領域で運転を行っても、プラズマに大域的な影響を与えるような不安定性が観測されず、良好な放電を行うことができることである。これは磁気シアの強い領域では、揺動の固有関数は比較的狭い領域に局在して大域的な影響を与えないことが原因と考えられる。このため線形の安定性計算からだけでは、ある磁場配位の運転が可能であるか否かを定めることは難しい。磁気シアが弱い配位、高い圧力勾配を持つプラズマを作り、実験的に MHD 不安定性の振る舞いを調べることで、ヘリオトロン型の炉で実現可能な磁場配位についての研究を行ってきた。

磁気シアの制御

磁気シアの制御法としては2種類の実験を行った。ひとつは先ほども述べたアスペクト比の制御であり、通常の実験条件ではシアの強い領域にある $\iota=1$ の有理面を内側に移動して磁気シアを弱めた実験である。図 3.1.2-7 に $A_p=8.3$ の条件で小規模な内部崩壊が観測されたときの電子温度分布の時間変化を示す。磁気シアの弱い領域で不安定性は径方向に大きく成長してしまい、プラズマの運転領域を制限するような大きな崩壊現象が観測されることがわかる[3]。

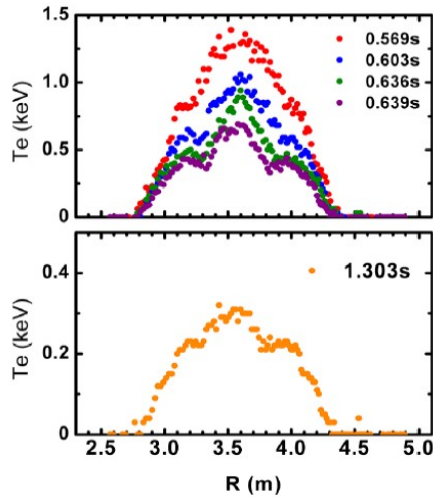


図 3.1.2-7 $A_p=8.3$ の放電で観測された内部崩壊現象。 $\iota=1$ の有理面で電子温度が平坦な領域が急速に拡大する。

もうひとつは日本原子力研究開発機構の諫山 明彦氏との共同研究で行った実験で、NBI によって駆動される電流によって磁気シアを制御したものである。NBI の入射を Co 方向から Ctr 方向に切り替えた場合、 $\iota = 1/2$ の有理面付近の磁気シアが弱まり、 $m/n = 2/1$ の大振幅の MHD 揺動が観測されるようになる(図 3.1.2-8)[4]。

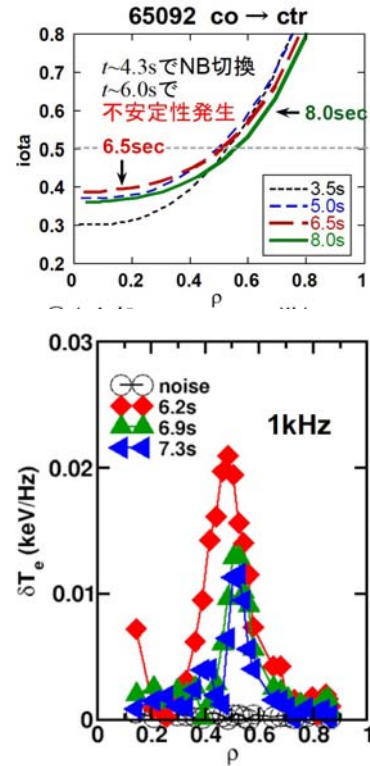


図 3.1.2-8 電流制御による磁気シアの制御とそのとき観測される MHD 不安定性の空間構造

急峻な圧力勾配

ペレット入射後の密度が減衰する時間帯ではプラズマの温度が急速に回復し圧力勾配が急峻化する。図 3.1.2-9 に示すように、この時間帯ではコア部の $\iota=1/3, 1/2$ の有理面に関連したモードが急速に成長し小規模の内部崩壊現象を起こすことが観測された[5]。これらの現象から、MHD 揺動が運転領域を制限するようなモード幅に成長するために必要な条件があきらかになりつつある。

3. 1. 2. 5 改善閉じ込めモードの萌芽

加熱パワー P の増加と β の上昇は ISS04 を仮定すれば $\beta \propto P^{0.4}$ の関係がある。さらに高い β を持つプラズマを作るためには改善閉じ込めモードが必要である。LHD においては、比較的高い β 値を持つ放電で、周辺部での急速な密度上昇を伴う H-mode 遷移が観測されている。この時、密度上昇による圧力勾配の増加から MHD 揺動レベルの増大と、それに伴う ELM-like な熱の吐き出しとが観測され、 β の上昇は比較的短時間で飽和してしまい、飽和するまでの時間も β が高くなるとともに短くなる。こ

の原因は周辺部が磁気丘配位であって、抵抗性の交換型不安定性が不安定なためと考えられ、静的な誤差磁場を印加して周辺付近の不安定性を制御する試みが現在なされている。

コア部の改善閉じ込めモードの候補としては IDB/SDC[6]タイプの放電が考えられる。このタイプの放電を行うことで、磁気軸を外寄せにした配位では、従来の最高 β 値を更新するような高い β を持つ放電が可能となった。中心ベータ値は $Rax = 3.75m$, $Bt = 1T$ の放電で 8% 近くに達し、最高 β 値を得た放電の中心 β 値 10%($Bt = 0.425T$)に匹敵する値となっている。磁気軸をより内寄せにした条件でも IDB/SDC タイプの放電が可能かどうか現在精力的な研究が行われている。

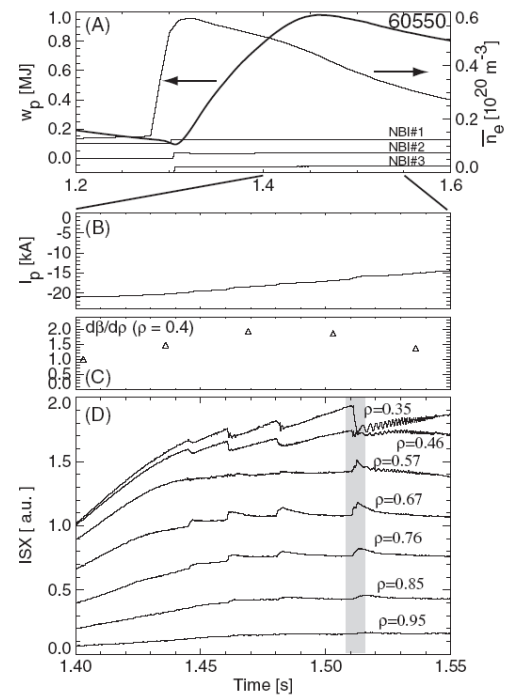


図 3.1.2-9 ペレット入射後に観測される鋸歯振動的な内部崩壊現象

- [1] H. Yamada, et. al, Characterization of energy confinement in net-current free plasmas using the extended International Stellarator Database, Nucl. Fusion 45(2005) 1664
- [2] K. Y. Watanabe, et. al, Effects of global MHD instability on operational high beta-regime in LHD , Nucl. Fusion 45 (2005) 1247
- [3] S. Sakakibara, et. al, Recent progress of MHD study in High-Beta Plasmas in LHD, Fusion Engineering and Design 50 (2006) 177
- [4] S. Isayama, S. Inagaki, et. al. Observation of localized oscillations at $m/n=2/1$ rational surface during counter neutral beam injection in the Large Helical Device, Plasma Phys. Control. Fusion, 4 (2006) L44
- [5] S. Ohdachi, et. al, Two-Dimensional Structure of MHD Instabilities and their Non-Linear Evolution in the Large Helical Device, in Proc. 21th IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, 16-21 October 2006, EX/P8-15
- [6] T. Morisaki, et. al., Superdense core mode in the Large Helical Device with an internal diffusion barrier, Phys. Plasma, 14 (2007) 056113

3) 定常プラズマ保持と高性能化

[はじめに]

ヘリカル装置はプラズマの閉じ込めにトカマク装置のようにトロイダル電流を必要とせず、定常運転に適している。LHDではこのヘリカル装置特有の優位性を実証し、定常プラズマの物理課題を研究することがミッションテーマとなっており、最終的には3MWの入射電力での定常運転を目指している。

平成15年度以前には周波数38.47MHz、磁気軸磁場2.75Tで水素を少数イオンとするヘリウムプラズマでICRF加熱少数イオン加熱を行うことで150秒間のプラズマ維持に成功している。そのとき入射エネルギーは72MJに達した。またECH(84GHz、72kW入射)により756秒のプラズマ維持にも成功している[1]。しかし、ICRF加熱では100秒程度からアウトガスにより密度が上昇し、プラズマを維持することができなくなった。ダイバータ板の温度上昇はトロイダル方向に不均一であり、アンテナ近傍で大きくなっていた。粒子軌道計算により、アンテナ付近の共鳴層での水素イオンの加速によりダイバータ板への熱負荷のトロイダル方向不均一性が生じ、アンテナ付近で局所的に大きくなることが分かった。一方ECHによる長時間プラズマ保持では導波管の温度が上昇し、管内圧力の上昇によるインターロック作動で放電が停止した。

[平成16年度以降の進展]

平成16年度(第8サイクル)にはECHとICRF加熱によるプラズマ保持において大きな進展がみられた。ECHでは導波管の冷却と真空排気系を強化し84GHzジャイロトロンから入射電力110kWで65分のプラズマ維持に成功した[2](図3.1.3-1)。このとき中心電子温度、線平均電子密度はそれぞれ1keV以上、 $1.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以上であった。

LHDでは磁気軸が内寄せ(Rax=3.6m)の場合にはダイバータ板への熱負荷は内側ポート付近で大きく、逆に外寄せ(Rax=3.75m)の場合には上下のポート付近で大きくなる性質がある。ICRF加熱の長時間放電では磁気軸を放電中に変化させる手法により、ポロイダ

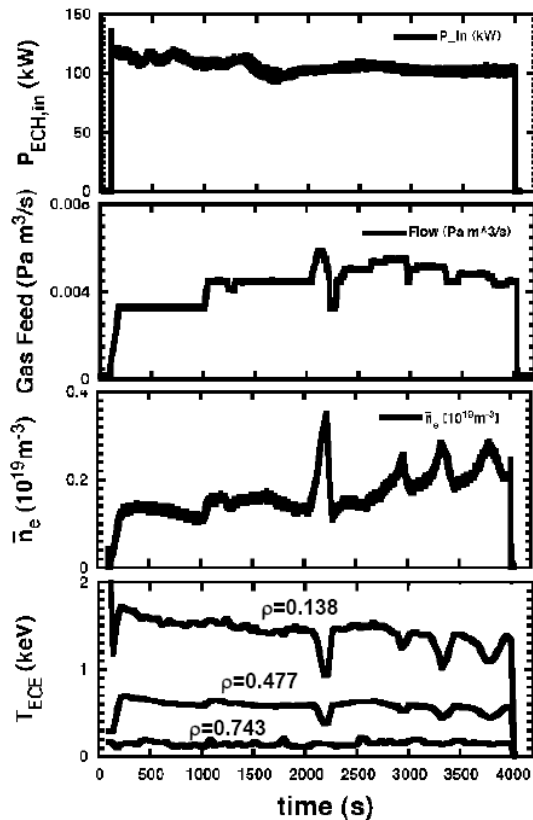


図 3.1.3-1 ECH 単独加熱による 65 分放電。

ル方向の熱負荷を分散させることに成功した。図 3. 1. 3-2 に示すように磁気軸を内寄せで固定した場合よりも少し外側を中心にスweepの方がダイバータ板への熱負荷が緩和されていることが分かる。

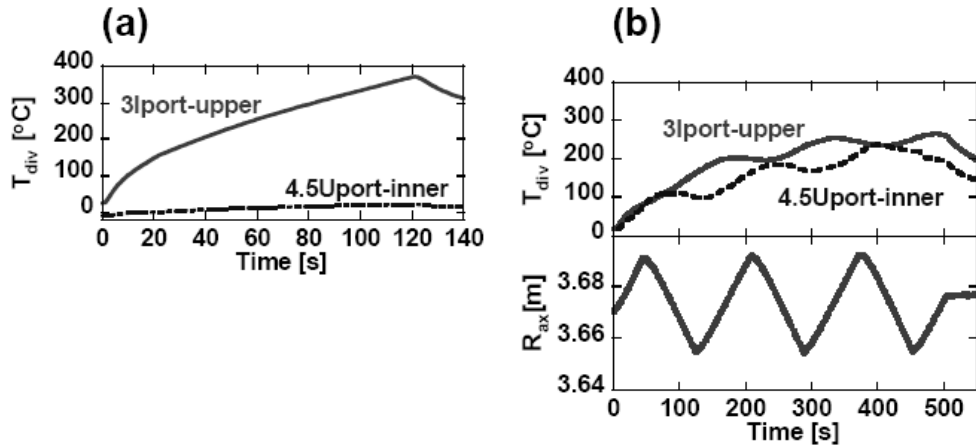


図 3. 1. 3-2 (a)磁気軸位置固定($R_{ax}=3.6\text{m}$)の場合、(b)磁気軸位置を変化($R_{ax}=3.65\sim3.69\text{m}$)させた場合のダイバータ板温度変化。

長時間放電を繰り返すコンディショニングにより以前に見られた I C R F 加熱による放電中のアウトガスによりプラズマ密度が少しずつ上昇してプラズマが崩壊するという現象は避けられた。しかし、長時間放電中に I C R F 加熱アンテナのインピーダンスが変化して反射電力が増大する問題は残されていた。この問題を解決するため、周波数を手動で変化させることを試みたが、周波数変化の許容範囲は発振装置により限られており、最終的には反射電力が大きくなりインターロック作動により発振が停

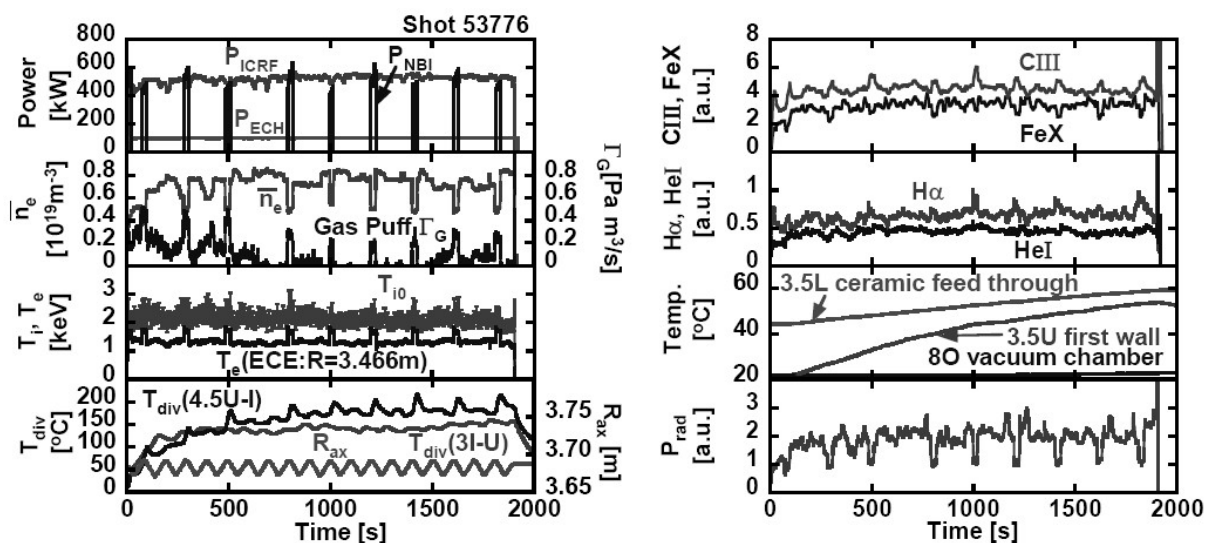


図 3. 1. 3-3 30 分を超えるプラズマ維持。N B I も間欠的に入射されている。

止した。LHDでのICRF加熱では液体スタブチューナーを採用しており、スタブチューナーの内、外導体の間にシリコンオイルを入れその液長を変化させることでインピーダンス整合を取ることができる。長時間放電中に液長を制御することで反射を低く抑えることに成功した。放電時間は飛躍的に伸び30分を超える長時間運転に成功した[3-5]（図3.1.3-3）。

入射エネルギーは1.3GJに達しフランスのトールスープラの記録（1.03GJ）を抜き世界一となった。しかし、突然密度が上昇し崩壊するという現象がしばしば見られるようになった。図3.1.3-4は放電の終わりの様子を示している。トラス内側からのスパークが見られ、その瞬間に鉄のライン強度が大きくなっている。このことから鉄不純物の混入が放電停止の要因と考えられている。

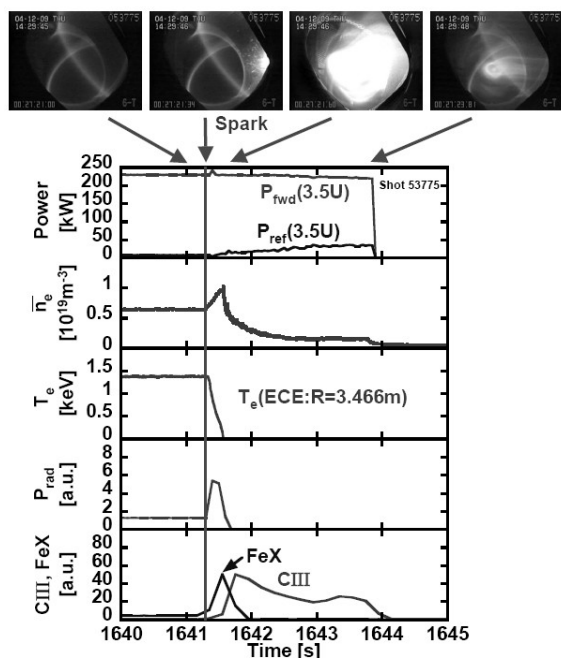


図3.1.3-4 鉄混入によるプラズマ崩壊。

出器で粒子数を長時間カウントすることにより54分放電では1.6MeVまでの高エネルギー粒子が確認された。54分放電では加熱入射電力を下げることで放電時間を伸ばしたが依然として鉄不純物によりプラズマは崩壊した。鉄不純物の混入は壁或いはダイバータ板への高い熱負荷に因ると考えられICRF少数イオン加熱特有のトロイダル方向の熱負荷非等方性を緩和する目的でICRFモード変換加

平成17年度（第9サイクル）にはこの問題を解決する目的で、密度の上昇と同期させ短パルスのECHを入射させ、プラズマを維持させることを試みた。図3.1.3-5に示すように突然の電子密度上昇に同期してECHが入射された。不純物の混入量にも依るが、この場合温度が再び上がり、密度が低下しプラズマは維持された。スパーク対策としてスパークが見え始めたらICRF加熱入射電力を手動で下げていくという手法も採用した。これにより54分を超える長時間運転に成功した（図3.1.3-6）。入射エネルギーは1.6GJに達し世界記録を更新した（図3.1.3-7）。また高速中性粒子検

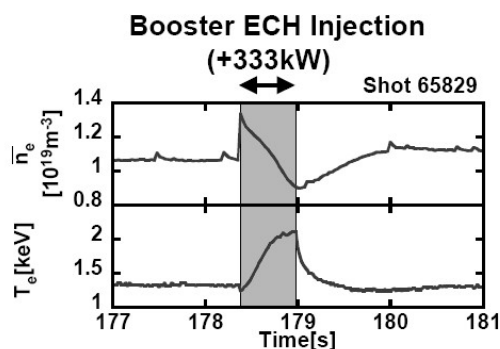


図3.1.3-5 ECH入射によるプラズマ崩壊の回避。

熱も試みた。これは速波をイオン-イオン混成共鳴層でイオンバーンシュタイン波にモード変換させ、電子を加熱する手法である。2本のアンテナから合計 600kW の電力を入射しプラズマを7秒間維持させることに成功した。

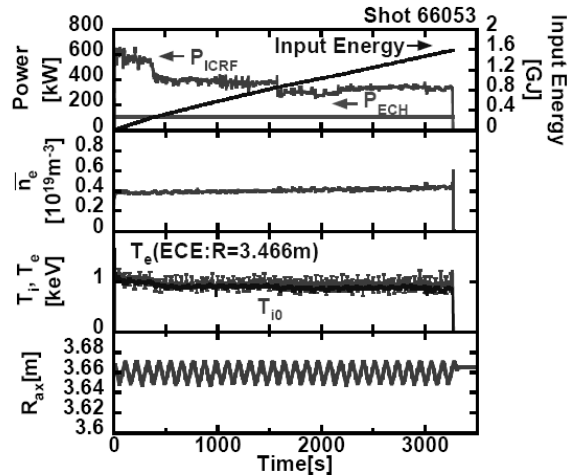


図 3.1.3-6 54 分のプラズマ維持。入射エネルギーは 1.6GJ に達した。

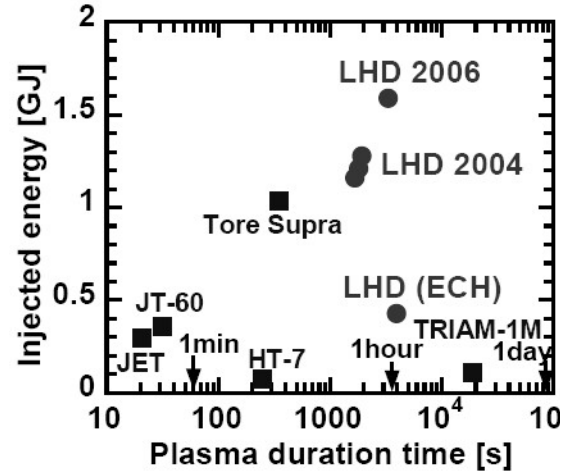


図 3.1.3-7 他の核融合実験装置との比較。入射エネルギー1.6GJ は世界記録である。

入射電力を上げることを目的とした平成 18 年度（第 10 サイクル）には 1MW 以上で 500 秒を超える長時間運転に成功した（図 3.1.3-8）。この電力では更に高い 2.5MeV までの粒子が高速中性粒子検出器により観測された（図 3.1.3-9）。ヘリカル装置のように磁気面と粒子軌道がずれていてもこのような大きなエネルギーを持つイオンが

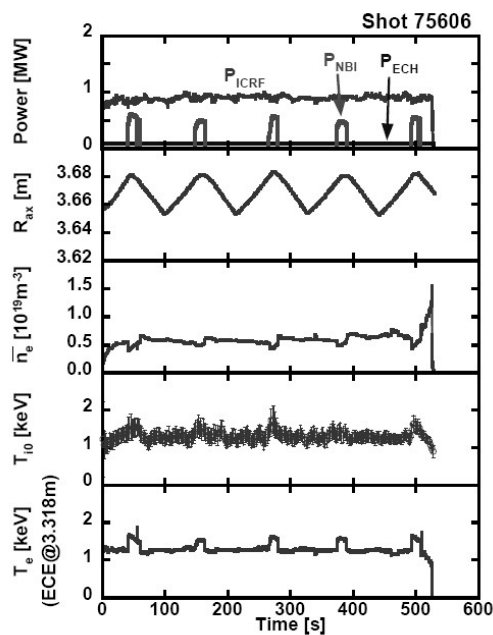


図 3.1.3-8 1.06MW、525 秒のプラズマ維持。

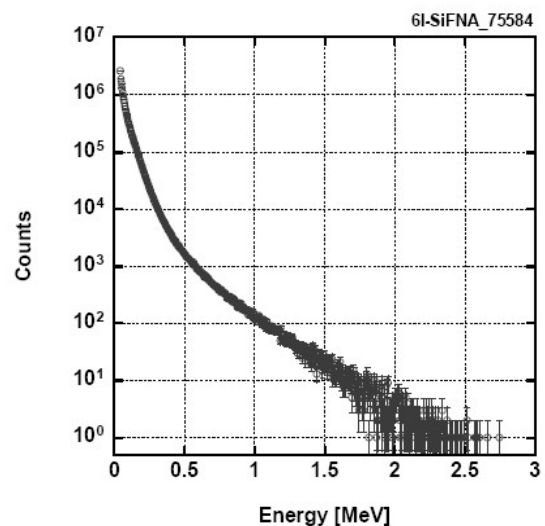


図 3.1.3-9 ICRF 加熱でのイオンテール。2.5MeV までの高エネルギー粒子の閉じ込めが確認された。

閉じ込められることが確認された。モード変換加熱では 90 秒のプラズマ維持に成功した。しかし、負荷抵抗が低く、伝送路電圧が上昇しインターロックで発振が停止することが起こった。今後、密度を上げて負荷抵抗を大きくすることが課題である。

[今後の定常運転の展望]

I C R F アンテナ付近の熱負荷の大きなダイバータ板を平成 19 年度の第 11 サイクル開始前に除熱能力に優れた新型ダイバータ板へと交換した。また付着した鉄の層を削り落とす作業も行っており、さらに大電力、長時間のプラズマ維持が期待される。定常 E C H の入射電力増強のため 77GHz ジャイロトロン (300kW、定常) を新たに設置した。アンテナは冷却されたミラーが使われ標準の磁場強度 2.75T で磁気軸加熱を行える。さらに正イオン源の N B I の定常化も試みられる予定である。現在 I C R F 加熱は 4 本のアンテナからの入射となっているが第 12 サイクル以降は発振装置を 2 系列新たに設置し、全 6 アンテナを使用することで、入射電力の増強及び熱負荷の分散が期待される。

[参照論文]

1. S. Kubo, et al., “Extension and characteristics of ECRH plasma in LHD,” Plasma Physics and Controlled Fusion, 47(2005)A81-A90.
2. T. Shimosuma et al., “Progress on Electron Cyclotron Heating and Electron Cyclotron Current Drive Experiments in LHD,” Fusion Science and Technology, 50(2006)403.
3. T. Mutoh, et al., “Thirty-Minute Plasma Sustainment by ICRF, EC and NBI Heating in the Large Helical Device,” Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.81, No.4(2005)229.
4. T. Mutoh, et al., “Thirty-minute plasma sustainment by real-time magnetic-axis swing for effective divertor-load-dispersion in the Large Helical Device,” Physics of Plasmas, 13(2006)156118.
5. T. Seki, et al., “Study of Long-Pulse Plasma Experiment Using ICRF Heating in LHD,” Fusion Science and Technology, 50(2006)186.

4) 高イオン温度領域の拡大

第8サイクル実験では3台の接線高エネルギー中性粒子入射加熱装置（NBI）を用いた高イオン温度生成実験を行い、アルゴンを用いた高Z放電プラズマにおいて13.5 keVのイオン温度を達成した（図3. 1. 4-1）。接線入射方式のNBIからは3ビームラインで合わせて10.5 MWの粒子ビームを入射した。NBIによって生成されたプラズマにアルゴンガスを注入することにより、急激に密度を上げるとともに、NBIの吸収パワーが急激に増加している。この場合アルゴンのターゲットプラズマによってビームの実効断面積が大きくなり、したがってターゲットプラズマへのイオン一個当たりのイオン加熱パワーが増大している。軟X線結晶分光器で計測したアルゴンスペクトルのドップラー幅から求めたイオン温度は、上昇した電子密度が減少する過程で急激に増加し、最高点で13.5 keV $\pm$ 2 keVを記録した。トムソン散乱法で計測した中心電子温度は4 keV程度で大きな温度差が生じており、イオン温度の上昇とイオン閉じ込め改善の理解のためには中心部でのイオン温度分布形状の詳細な測定が必要である。また、イオン加熱電力を上昇させる事によるイオン温度の上昇が確認されたことにより、水素放電においても水素イオンへの加熱電力を増加させることにより、高イオン温度領域の拡大が可能であるとの結論を得た。

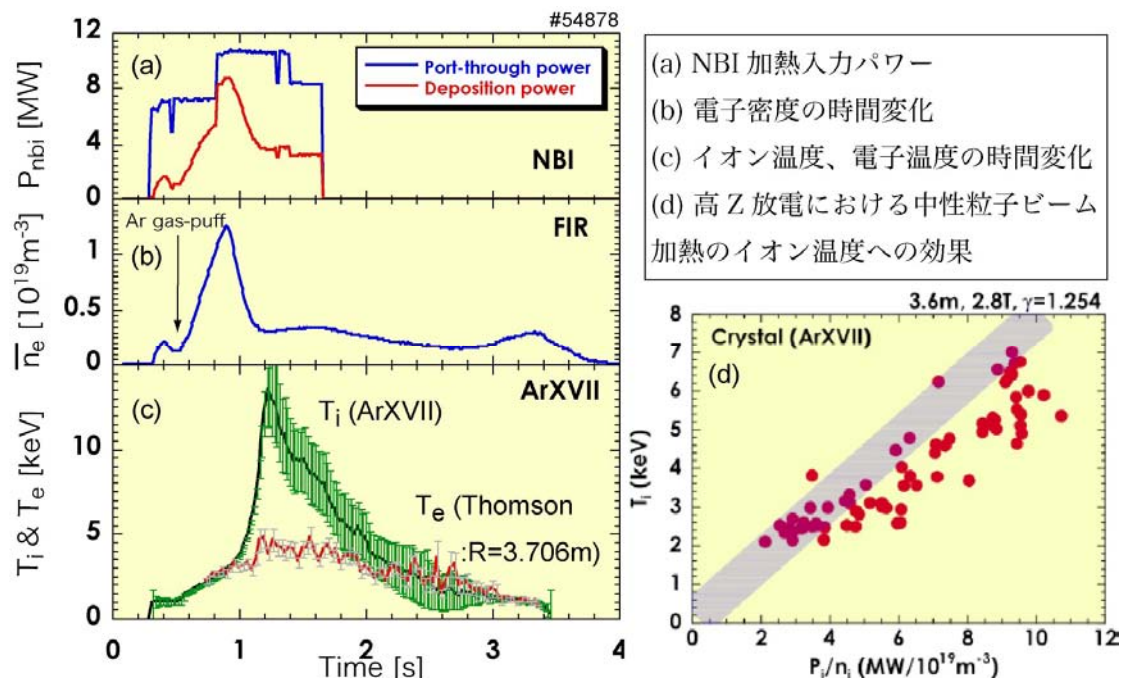


図3. 1. 4-1 アルゴンを用いた高Z放電による高イオン温度プラズマ生成

第9サイクル実験では水素プラズマにおける高イオン温度領域の拡大とイオン温度分布計測を目標とした。水素イオンに対する中性粒子ビームのイオン加熱パワーを増大させるためには、高エネルギー粒子ビームよりも低エネルギー水素粒子ビームが有効であるので、ビームエネルギー40 keV（入射電力3 MW）の垂直入射方式のNB Iシステムを構築した（参照3. 3. 2-2）章）。また垂直NB Iを利用した荷電交換再結合分光（CX S）によるイオン温度分布計測装置を導入した（参照3. 3. 3-5）章）。図3. 1. 4-2に示すのは、水素ペレットを使った水素放電における放電波形およびイオン温度分布である。NB Iパワーは接線入射で11.5 MW、垂直入射で2.2 MWである。達成イオン温度は結晶分光器計測で2.6 keVであり、垂直NB Iによるイオン加熱効果は500 eV程度であった。低エネルギーNB Iの入射パワーに対してイオン温度の上昇値は比例関係を示し、高エネルギーNB Iと比較してより高いイオン加熱効率がある事が確かめられた。ポロイダル方向からのCX S計測によるイオン温度分布では、プラズマ中心付近で低エネルギービームによる加熱効果が顕著に現れている（図3. 1. 4-2右下図R=3.80 mのデータ）。ポロイダル断面からの計測では中心のイオン温度は2 keV程度を示し、結晶分光器計測と比較して若干低い傾向が見られた。これは、周辺部の低いイオン温度成分がポロイダル断面の視線の積分効果によって影響しているものと考えられる。

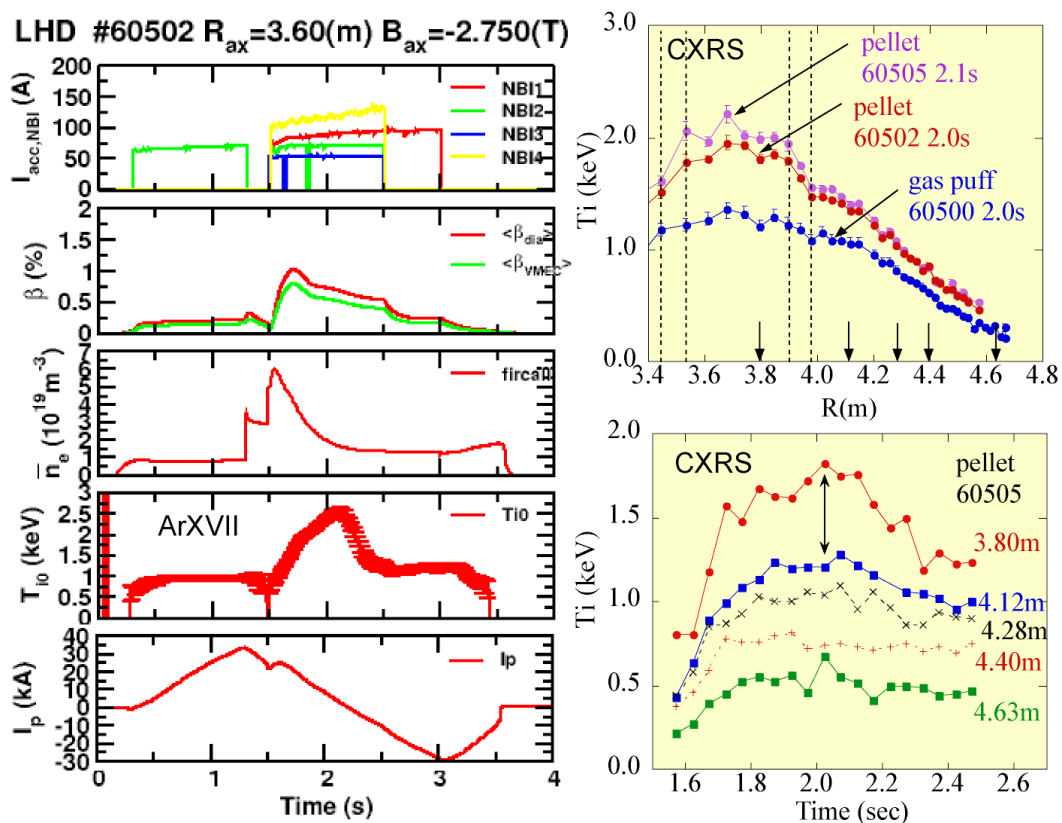


図3. 1. 4-2 高イオン温度水素プラズマ生成(左)とイオン温度分布(左)

そこで、接線NB I入射ポートからの観測視線を利用したトロイダルCXS装置を整備し（参照3. 3. 3-5）章）、同様の水素プラズマ加熱実験を行った。その結果を図3. 1. 4-3に示す。トロイダル視線からのCXSによって空間分解能が向上するとともに、計測された中心イオン温度は2. 5 keVであり結晶分光器で計測されたイオン温度とよく一致している。また低エネルギーNB Iを使用した時にイオン温度が上がる場合には電子温度とイオン温度が比較的近い温度を示していることや、電子密度分布が極端なホロー分布にならないことから、より高い水素イオン温度プラズマ生成にはイオン加熱パワーの増強、密度分布制御による中心加熱効率の改善、高周波加熱とNB Iによるイオン温度への相乗効果等が必要であると考えられる。

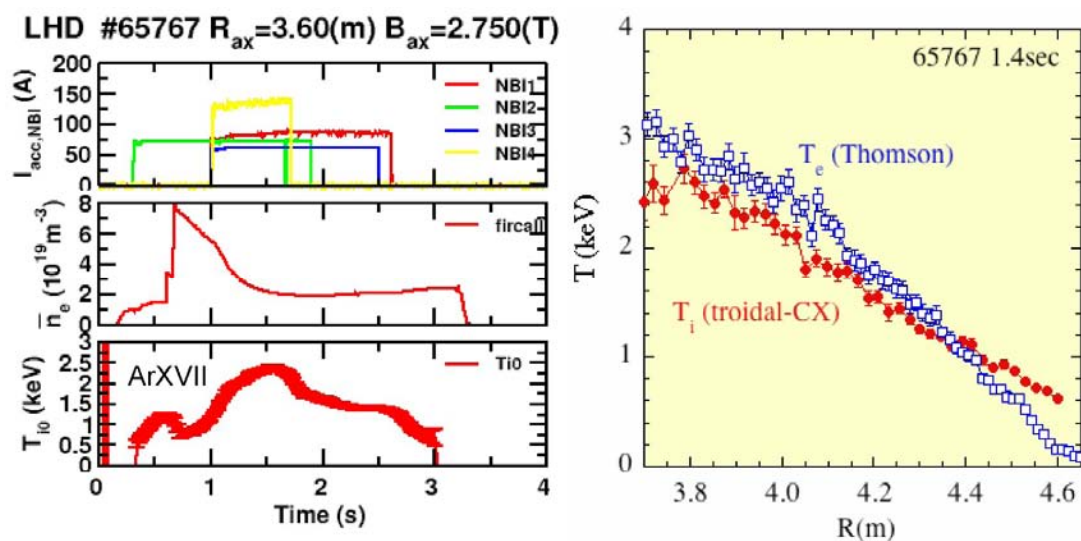


図3. 1. 4-3 トロイダルCXSによるイオン温度分布

第10サイクル実験では、3 MWから6 MWに増強された垂直NB Iを用いて、水素プラズマのさらなる高イオン温度化を目標として実験を行った。第9サイクルにおいて垂直NB Iによるイオン加熱効果は確かめられていたが、加熱の最適化を図るために、高パワー入射における加熱効果の検証を行った。図3. 1. 4-4に、垂直NB I単独入射時に結晶分光器で計測されたイオン温度の、イオン加熱パワー（デポジションパワーの8割と概算）を密度で規格化した値への依存性を示す。緑色のデータは、第9サイクルでの結果であり、青色、赤色のデータが、第10サイクルの結果である。イオン加熱パワーの上昇に伴って順調にイオン温度が上昇していることがわかる。また、系統的に、赤色のデータの方が青色よりもイオン温度が高くなっている。青色のデータは、「ECHから接線NB I入射を経て垂直NB I入射」という加熱パターンでの結果であり、赤色は「ECHに引き続いて垂直NB I入射」という加熱パターンのものである。この結果から、高イオン温度達成への加熱手法として、「EC

Hに引き続いて垂直NB I 入射」することで高いベースイオン温度を実現した上で、3本の接線NB I を入射するという加熱シナリオを追求することが、その後の基本方針となった。密度分布の平坦化、ホロー化を避けることとの関連が認識されている。

また、軽イオン種プラズマでの高イオン温度を目指す上で、イオンサイクロトロン加熱（ICRH）の寄与が大いに期待される。このため、少数イオン加熱モードでのICRH実験も展開した。図3. 1. 4-5に、ICRH実験でのイオン温度の線平均密度依存性を示す。黒は、ICRHなしの垂直NB I 入射による結果であり、緑、青、赤が、垂直NB I なしの状況でのICRH入射（約2MW）の結果である。R_{ax}は真空磁気軸位置を、NB I //は、接線NB I を表している。この図から、垂直NB I とICRHのイオン加熱効果を重畳的に得るためには、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 付近の密度領域が適していると判断し、その後のターゲット密度領域として実験を進めた。

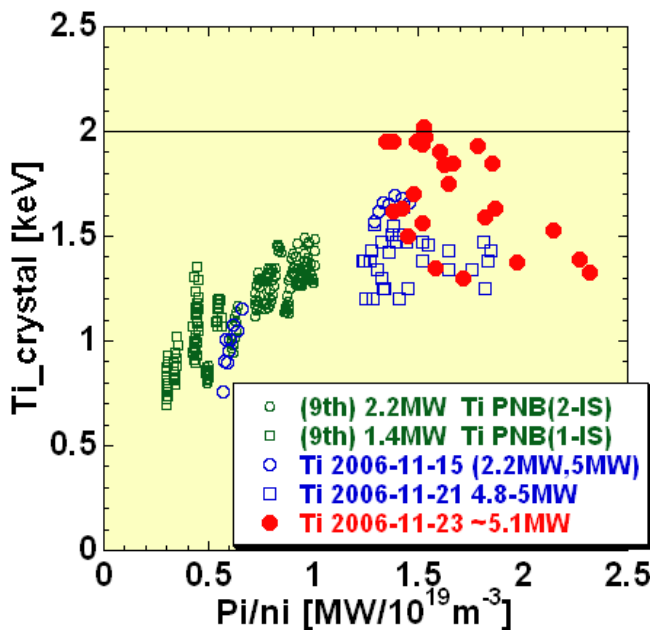


図3. 1. 4-4 低エネルギーNB I単独入射タイミングでのイオン温度（結晶分光器計測）の加熱パワー依存性

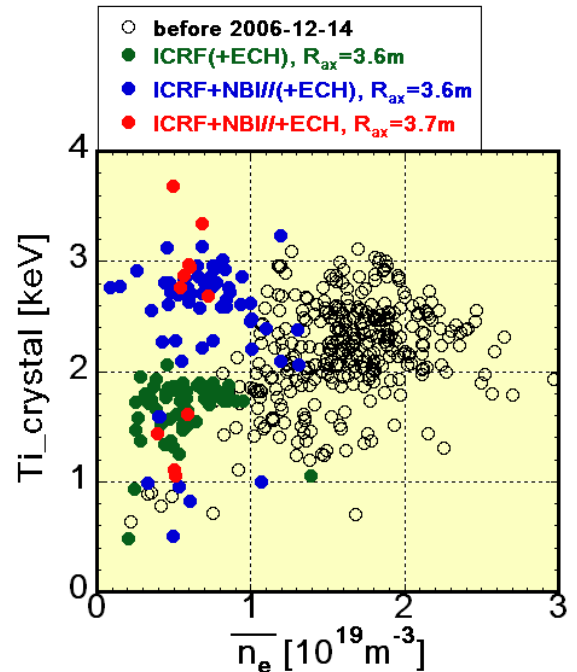


図3. 1. 4-5 ICRHによるイオン温度（結晶分光器計測）の密度依存性

垂直NB I、ICRHによるイオン加熱に関するこれらの知見の積み重ねに基づき、6 MW超の垂直NB I 入射、それに続く15 MW程度の接線NB I 入射によって、線平均密度約 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の水素プラズマにおいて、6.8 keVを達成した。トロイダル視線のCXSで計測されたイオン温度時間変化を図3. 1. 4-6に示す。図からイオン温度は中心付近がより大きく上昇することがわかる。すなわちプラズマ中心部での温度分布が急峻化しており、イオンの閉じ込め改善がうかがえる。このタイミングでは、中心部電子温度は約4 keVであり、イオン温度が電子温度よりも高い状況になっている。また、さらに高い密度NB I、ICRH重畳によっても、5 keV

程度のイオン温度実現に成功した。また、水素やヘリウムガスパフによる密度スキャン実験によって、 $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 超の密度においても、 3keV 程度のイオン温度が実現された。この場合には、イオン温度と電子温度がほぼ等しい状態となっている。

CXS計測を行うに当たり、垂直NBIの4台のイオン源のうち、2台を100ms間隔でON、OFFを繰り返すことで背景光の評価を行った(参照3.3.3-5)章)が、このような入射制御が信頼性高が行えたことも、高イオン温度プラズマのイオン温度分布計測を成功理に行えた要因の一つである。

高イオン温度ショットの中心部で、接線NBIの入射方向に依存したトロイダル回転が大きくなっていること、また、CXS計測に用いる炭素イオン密度が激減する「不純物ホール」という興味深い現象も同時に観測された(参照3.3.3-5)章)。

このように、LHDにおける高イオン温度領域の拡大テーマ実験は、高エネルギーNBIの整備・増強[1]によって、アルゴンプラズマでの13.5keVの達成というイオン加熱性能の原理検証を経て、イオン加熱効率の高い低エネルギーNBIの導入・増強による、密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 超の水素プラズマでの6.8keVの達成へと大きな進展を遂げている。水素プラズマでのイオン加熱においては、ICRHの寄与も確認されており、今後、ビーム・高周波加熱をさらに効果的に重畳させることによって、さらなる高イオン温度領域の拡大を目指していく基礎を形成することが出来ている。トロイダル視線CXSの導入によるイオン温度分布計測の充実は、高イオン温度プラズマにおけるイオン温度分布の変曲、トロイダル回転の促進、不純物ホールといった、イオン輸送物理の解明・学術的体系化に向けた多くの知見を提供しており、理論・データ解析研究との連携も深化しつつある。LHDの所期の目標値達成に向けた進展を遂げるとともに、世界のヘリカル系閉じ込め研究の最前線を開拓し、核融合炉心プラズマをも見通せる状況になりつつあると言える。

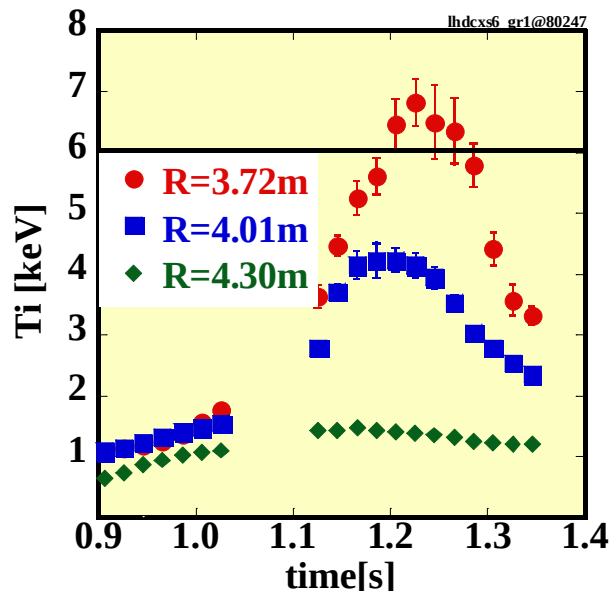


図3. 1. 4-6 トロイダル視線CXS計測によるイオン温度の時間変化(R=3.72m がプラズマ中心)

[参考文献]

- [1] Y. Takeiri, O. Kaneko, K. Tsumori, Y. Oka, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Nagaoka, E. Asano, T. Kondo, M. Sato and M. Shibuya, “High-power and long-pulse injection with negative-ion-based neutral beam injectors in the Large Helical Device”, Nucl. Fusion **46** (2006) 199-210.

5) 高電子温度の実現

プラズマの電子温度を向上させるためには、ミリ波帯の電磁波を入射し電子を加熱する電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) を主に用いる。LHD における ECH システムは、実験サイクル毎に改善を繰り返し、最大入射パワーは 2 MW を超えている。これまでの実験サイクルにおいては、サイクル毎にその構成は若干変更されてきているが、基本的には 84GHz 帯ジャイロトロン(4~5 本)、168GHz ジャイロトロン(3~4 本)、77GHz ジャイロトロン 1 本を用いた構成となっている。伝送路は直径 88.9mm と 31.75mm の低損失コルゲート導波管を用い、ジャイロトロン管よりアンテナまでおよそ 100m 程度の伝送を行っている。高耐電力化の目的で、順次伝送路の真空化を進めており、現時点では 2 系統の 31.75mm 系と 2 系統の 88.9mm 系の真空化を完了している。またミリ波入射アンテナは上部ポートより 4 系統、下部ポートより 2 系統、横ポートより 2 系統の計 8 系統が設置されている。さらに一つのアンテナは 2~4 枚の集光又は平面ミラーで構成されており、プラズマの赤道面付近に入射ミリ波を集光でき、その焦点位置を可動ミラーで調節できるようになっている。

5-1) 高電子温度プラズマにおける内部輸送障壁 (ITB) 形成物理の理解の進展

ECH による高電子温度プラズマ実現のためには、入射アンテナからの放射ミリ波の集光位置及び偏波の最適化が必須である。閉じ込め磁場 3T においては、84GHz 帯のミリ波は基本波共鳴となり、磁力線にほぼ垂直に入射する場合には、正常波モード (O-mode) での吸収が最も良くなる。また 168GHz では第 2 高調波共鳴となり、異常波モードの入射が適当となる。実験開始当初より実際のジャイロトロンパワーを用いてアンテナ集光位置及び入射偏波の最適化を行ってきた。特に平成 16 年頃より ECH パワーに変調をかけ(変調 ECH : MECH)、電子サイクロトロン輻射(ECE)によって測定される各部の電子温度の応答をフーリエ変換し、変調周波数に対応する周波数での振幅、位相の情報を用いることで吸収位置や吸収分布を高精度で測定する方法を確立した。図 3. 1. 5-1 は、168GHz の入射に対して入射偏波の依存性を測定したものを示している。ECH の吸収効率を最適化するためには、入射角に応じて楕円偏波の主軸の方向、楕円度、回転方向を最適化する必要がある。図 3. 1. 5-1 a)は楕円偏波を特徴づける α 角と β 角の定義を示している。 α 角は楕円の主軸とトロイダル方向とのなす角、 β は楕円度を表す。b) 図では、およそ $\alpha = -50^\circ$ 付近に ECE 信号の振幅の最大値が達成されており、これはプラズマ周辺($\rho \sim 1$)で磁力線にほぼ垂直な電場ベクトルを持つ直線偏波であることに対応し、プラズマ周辺で X-mode 励起になっていることを示している。 β 角依存性については少し負値で極大が得られており、これがアンテナ入射角が磁力線に完全に垂直になっていないことから起こるのか、エルゴ

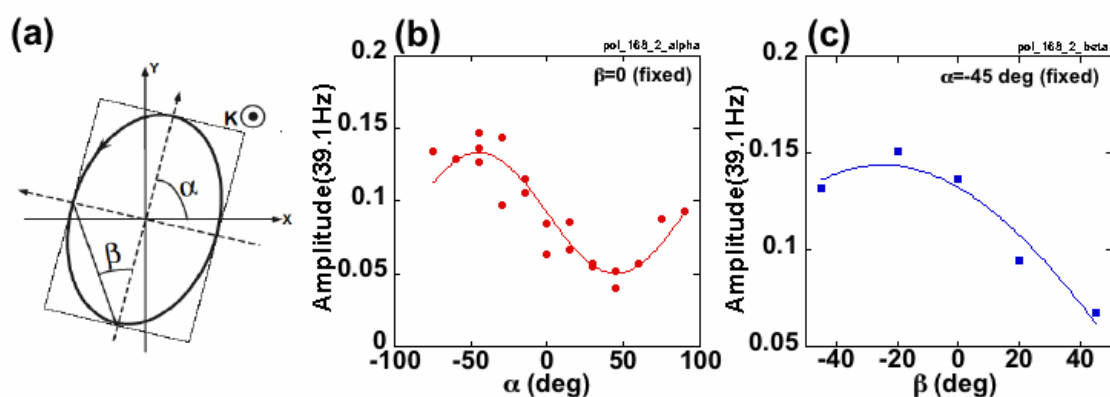


図 3.1.5-1 (a)楕円偏波の定義、このアンテナの場合 x 軸はトロイダル方向、y 軸は大半径方向におおよそ対応する。(b) プラズマ中心付近の ECE 信号の MECH の変調周波数でのフーリエ振幅の α 角依存性を示す。(c) 同様に β 角依存性を示す。

ディック層に存在するプラズマの効果なのか詳細な検討を要する[1]。

このような方法を各アンテナ系で行い、さらに入射焦点位置依存性を調べ、最適な入射配位で実験を行っている。

これまでに高電子温度を達成する際に電子の熱輸送に関する内部輸送障壁(ITB)の形成が観測されている[2,3] (主要論文の 13)。ITB の形成は以下のように特徴づけられる。1) ECH のパワーをプラズマ中心付近に集光したとき、規格化小半径 $\rho \sim 0.3$ 付近に急峻な電子温度勾配が形成され中心温度が 10keV 程度まで上昇する。熱輸送解析によればこの半径以内での電子の熱輸送係数が低減している。またこの領域には強い正の径電場が形成されている。2) 中心部の高電子温度遷移には ECH パワーと電子密度について閾値が存在する。またプラズマコア領域に存在する低次の有理面又は磁気島が、この高電子温度遷移の起こりやすさを促進するような傾向が見られている。

平成 17 年度には、この第 2 の点を明確にするために、カウンター方向に入射された中性粒子入射加熱(NBI)生成プラズマに ECH を追加熱したときの高電子温度実験において、外部コイルにより $m/n=2/1$ の磁気島を縮小、拡大した場合の高電子温度遷移の変化を調べた。図 3. 1. 5-2 は線平均密度で規格化した ECH パワー (定常状態でおよそ全熱フラ

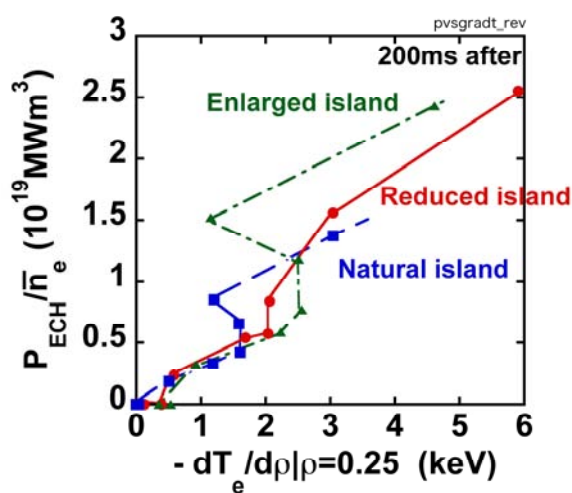


図 3.1.5-2 全熱フラックスに相当する電子密度で規格化された ECH パワー P_{ECH}/n_e を ITB フット位置での電子温度勾配についてプロットした

ックスに相当) を、ITB フット位置での温度勾配- $dT_e/d\rho$ に対してプロットしたものである。この場合ターゲットとなるプラズマのコア部 ($\rho \sim 0.3$) には、誤差磁場による $m/n=2/1$ の自然磁気島が存在する (磁気島幅は最大 58mm 程度)。計算によれば縮小した場合は 29mm、拡大した場合はおよそ 83mm 程度になる。図より熱フラックスが増大するとある領域で温度勾配が変化しない又は減少する領域が存在する。これは熱輸送が増大することを意味している。しかしさらに全熱フラックスが増加すると熱輸送が改善されるのがわかる。この改善は自然磁気島の場合が最も低いパワーで起こり、磁気島を拡大した場合が最も高くなっている。この結果は、コア部における熱輸送改善のための閾パワーを低減するためには、ある程度のサイズの磁気島の存在が有効ではないかということを示唆している[4,5] (主要論文の 12)。しかしながら十分な ECH パワーがある場合には磁気島サイズが小さいほど中心温度が高くなる傾向があることが分かってきており、現在も研究の途上である[6]。

5-2) 磁場配位、磁場強度向上によるさらなる高電子温度の達成[6]

電子温度が 10keV を超えるような場合には、電子サイクロトロン共鳴(ECR)の相対論的なダウンシフトにより、入射波の周波数が一定の場合には、相対論的係数 γ の上昇により ($B=2\pi m_0 \gamma f/e$)、より高い磁場の領域で吸収が起こるようになる。ここで B は磁場強度、 m_0 は電子の静止質量、 f は入射電磁波の周波数である。図 3. 1. 5-3 は LHD における 2 つの磁場配位における非相対論的な ECR 層と磁気軸の位置の関係を示している。a) の場合(トロイダル平均磁気軸 $R_{ax}=3.5m$, 磁場強度 $B_0=2.829T$) には、ECH 入射断面において磁気軸は ECR 層の低磁場側に存在している。b) のケース ($R_{ax}=3.5m$, $B_0=2.931T$) では、磁気軸は ECR 層の高磁場側に存在している。ECH によって電子温度が上昇した場合には、吸収はより高磁場側にシフトすることになる。図 c) に上記 2 つの配位における磁場強度の大半径依存性を示す。特に電子のエネルギー

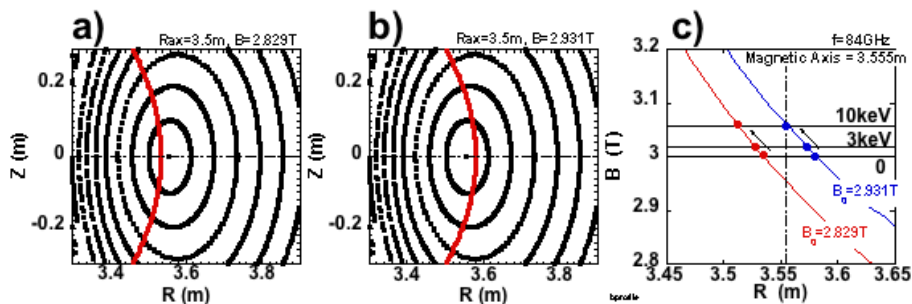


図 3.1.5-3 磁気面と ECR 層の位置関係 a) 磁気軸 $R_{ax}=3.5m$, 磁場強度 $B_0=2.829T$ の従来の磁場配位、b) ヘリカルコイルのサブクールにより実現された磁場配位、磁気軸 $R_{ax}=3.5m$, 磁場強度 $B_0=2.831T$ 、c) 相対論的な ECR の変化を考慮した共鳴位置の変化 エネルギー 3keV と 10keV に対してプロット

ギーが 3keV と 10keV の場合に対する共鳴磁場強度を●印で示した。ケース b) ではエネルギーが上昇しても磁気軸加熱が維持できることが分かる。半面、ケース a) では温度が上昇すると磁気軸からずれた加熱になる傾向がある。

平成 18 年度の LHD 実験においては、ヘリカルコイルのサブクールが実施され、従来よりも高い磁場強度で実験が行うことが可能になり、より磁場配位の自由度が広がった。今回可能になった磁場配位($R_{ax}=3.5m, B_0=2.931T$) で中心集光した ECH (パワー約 1.6MW) によって高電子温度プラズマ生成を行った。図 3. 1. 5-4 はそのときのトムソン散乱計測による電子温度プロファイルと遠赤外レーザー干渉計による電子密度プロファイルを示したものである。密度分布は平坦で中心部はホローになっている。電子温度は $\rho < 0.2$ で急峻に立ち上がり、中心でおよそ 10keV に到達している。

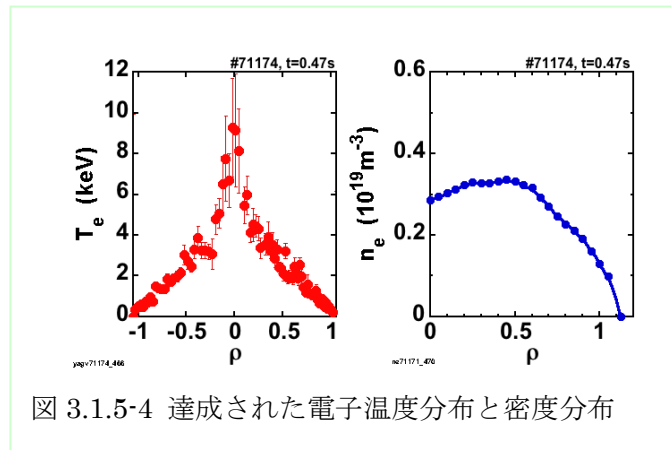


図 3.1.5-4 達成された電子温度分布と密度分布

これまでに行われてきた ECH のみによって生成維持されたプラズマの中心温度 T_{e0} に関して、線平均密度で規格化された ECH 入射パワーの平方根 $\alpha = (P_{ECH}/n_{19})^{1/2}$ に対する依存性をいろいろな磁場配位(1) (R_{ax}, B_0)=(3.5m, 2.829T), (2) (3.5m, 2.931T), (3) (3.53m, 2.907T), (4) (3.53m, 2.951T) について図 3. 1. 5-5 に示した。ほぼ直線にのる一群のデータ（閉じ込め時間のスケーリングとして ISS95 を用いたときの依存関係）と高電子温度へ遷移しているデータ点に分けられる。磁気軸 3.53m の配位ではより磁場強度の強い $B_0=2.951T$ (磁場配位 4) の方が α 値の小さい値で 10keV の高電子温度を実現している。また、磁場配位(2) 3.5m, $B_0=2.931T$ では磁気軸 3.53m よりも大きな α 値で高電子温度が実現しているが、磁場の低い $B_0=2.829T$ (磁場配位 1) ではさらなる高電子温度への遷移は見られていない。磁場配位 2 と 4 は、磁気軸が非相対論的な ECR 層より高

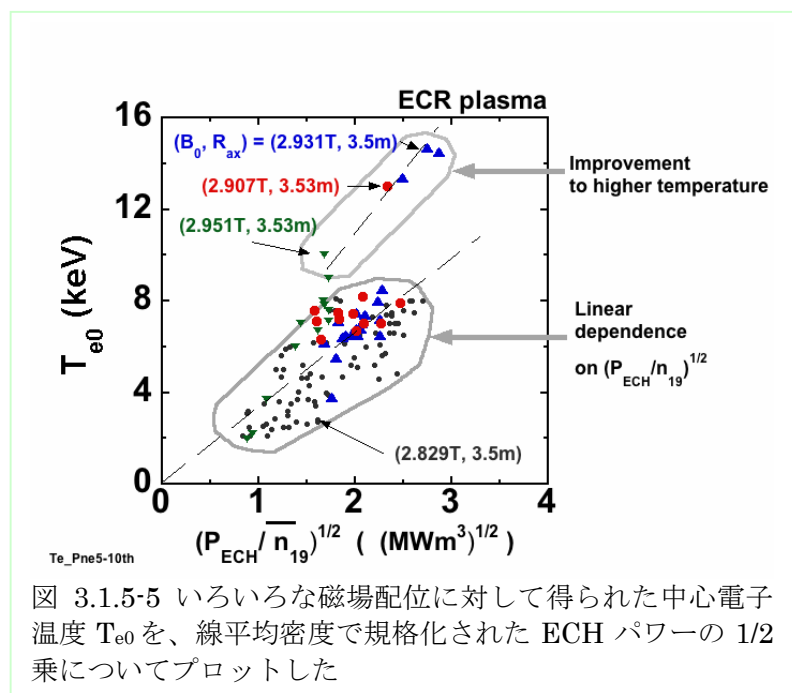


図 3.1.5-5 いろいろな磁場配位に対して得られた中心電子温度 T_{e0} を、線平均密度で規格化された ECH パワーの $1/2$ 乗についてプロットした

磁場に存在する好ましい磁場配位に対応し、磁場配位 3 はちょうど一致する場合、磁場配位 1 は磁気軸が ECR 層の低磁場側に位置する場合に対応する。図より 2 つの中心電子温度状態が存在し、その遷移の起こりやすさが磁場配位に依存しているように推測される。

図 3.1.5-6 は、磁場配位 $R_{ax}=3.53m$, $B_0=2.907T$ において、外部コイル磁場を印加することによってプラズマ中の自然磁気島を縮小した場合と拡大した場合の電子温度分布の振る舞いを比較したものである。興味深いことに磁気島を縮小した場合（図 a））に中心尖塔型の電子温度分布が得られ、中心温度は他の場合に比べて $3keV$ 程度上昇している。自然磁気島が存在する場合には図 b) に示したように中心部の電子温度は上昇しない。

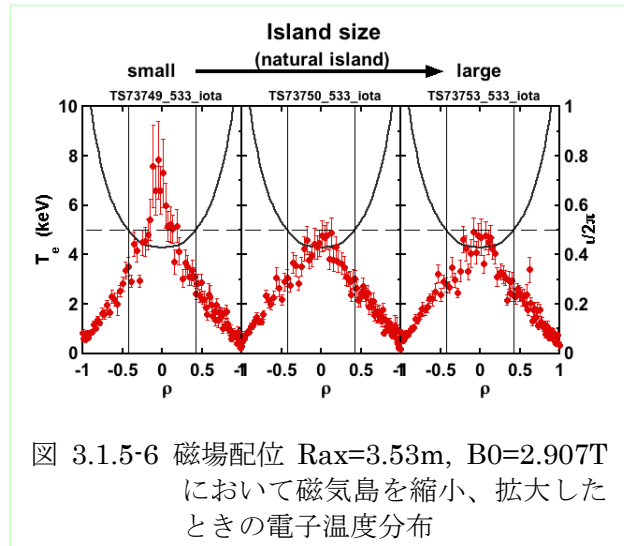


図 3.1.5-6 磁場配位 $R_{ax}=3.53m$, $B_0=2.907T$ において磁気島を縮小、拡大したときの電子温度分布

以上をまとめると、LHD では ECH の入射パワー増強、入射条件の最適化とともにヘリカルコイルのサブクールによって加熱配位の自由度が広がった。そのため、電子温度の上昇に伴う相対論的なダウンシフトを考慮しても中心加熱に好都合な磁場配位で強力な ECH が可能になった。到達中心電子温度は、密度で規格化された ECH パワーについて 2 つの依存状態があり、さらなる高電子温度への遷移の閾値が磁場配位に依存しているように推測される。またコア部の磁気島の大小が到達電子温度に影響していることが分かり、電子の熱輸送の改善に関連して今後明らかにすべき課題である。

(参考文献)

- [1] T. Notake, S. Kubo, T. Shimosuma, et al., “Optimization of incident wave polarization for ECRH in LHD”, Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) 531-544.
- [2] S. Kubo, T. Shimosuma, Y. Yoshimura, et al., “Extension and characteristics of an ECRH plasma in LHD”, Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) A81-A90.
- [3] T. Shimosuma, S. Kubo, H. Idei, et al., “Formation of electron internal transport barriers by highly localized electron cyclotron resonance heating in the Large Helical Device”, Plasma Phys. Control. Fusion 45 (2003) 1183.
- [4] T. Shimosuma, S. Kubo, H. Idei, et al., “Transition phenomena and thermal transport properties in LHD plasmas with an electron internal transport barrier”, Nucl. Fusion 45 (2005) 1390.
- [5] T. Shimosuma, S. Kubo, et al., “Progress on electron cyclotron heating and electron

- cyclotron current drive experiments in LHD”, Fusion Sci. and Tech. 50 (2006) 403.
- [6] T. Shimozuma, S. Kubo, et al., “Experimental conditions of ECRH and magnetic configuration for high electron temperature plasmas in LHD”, 34th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Warsaw (Poland), July 2-6, 2007, P4.153.

3. 2 物理テーマ実験 — 炉心プラズマの実現に向けた学術研究

1) コアプラズマの熱粒子輸送

本テーマでは、LHD のコアプラズマにおける熱・粒子輸送に関して、特にそのダイナミクスに着目して研究を進めている。従来、輸送解析では、例えば熱輸送解析では、準定常状態の温度分布から求めた温度勾配と加熱吸収分布から算出した熱流束の比を熱拡散係数とし、その空間分布から輸送の特性を議論するというアプローチ（パワーバランス解析）が取られてきた。しかしながら乱流輸送が支配的な場合には、熱流束が温度勾配に比例せず、非線形性・非局所性・非対角成分を持つことが知られている。この場合、前述の様なパワーバランスによる研究は、乱流輸送を解明するには不十分であると考えられている。そこで本テーマでは、プラズマに外から摂動を与えて、プラズマの応答を解析することで、熱・粒子輸送を明らかにしようというアプローチ（ダイナミック解析）で研究を進めている。

熱輸送に関する研究では、トレーサ内蔵固体ペレット（Tracer-Encapsulated Solid PELlet: TESPEL）もしくは、固体水素ペレット入射に伴うコールドパルス伝播や変調 ECH によるヒートパルス伝播などにより、LHD で得られている多様なプラズマに対してダイナミック解析を行っている。電子系内部輸送障壁（e-ITB）が発現しているプラズマに対してコールドパルス伝播によるダイナミック解析を行い、日本原子力研究開発機構の大型トカマク装置 JT-60U における同様の実験の結果と比較したところ、ともに e-ITB 内部で、熱拡散係数が非常に弱い温度勾配依存性を持つこと、熱拡散係数が負の電子温度依存性を持つ領域が LHD と JT-60U で異なることなどが明らかとな

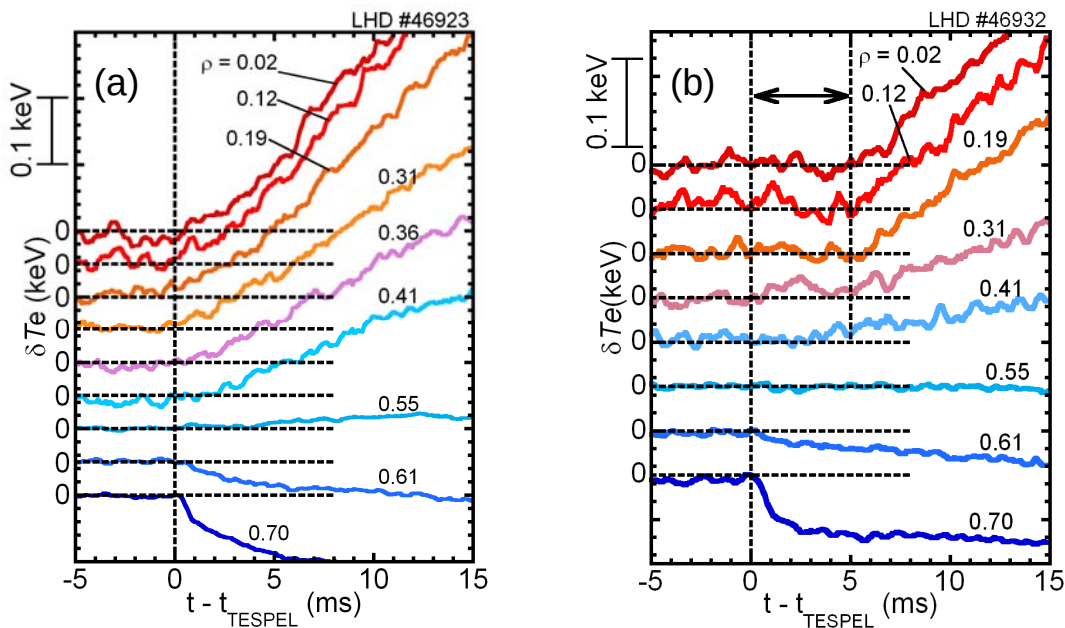


図 3.2.1-1 TESPEL 入射前後 ($t - t_{\text{TESPEL}} = 0$ が TESPEL 入射時刻) の摂動電子温度の時間変化。(a) $n_{e_bar} = 0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、(b) $n_{e_bar} = 0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合。

った[1]。また、これまでトカマク型装置でしか見られなかった「非局所輸送現象」がヘリカル型装置においても観測されることが明らかとなった[2]。図 3.2.1-1 にその典型的結果を示す。図中 $t - t_{\text{TESPEL}} = 0 \text{ ms}$ は、プラズマ中に TESPEL が入射されている時刻を表す。図 3.2.1-1(a)より、TESPEL がプラズマ中に侵入するとほぼ同時に中心部の電子温度が上昇しているのが分かる。この時、電子温度が大きく変化した中心部の電子温度勾配、電子密度及びその勾配はほとんど変化していない。これは、その場の流束はその場の勾配に比例するとした拡散の描像から大きくかけ離れており、電子熱輸送の非局所性を示す結果と考えられる。図 3.2.1-1(b)に示す通り、図 3.2.1-1(a)の場合から線平均電子密度を増加させると、中心部の電子温度上昇に遅れが見られた。この遅れ時間は、中心部の衝突度及び周辺部の温度勾配特性長に比例して長くなること

が明らかとなった [3]。さらに図 3.2.1-2 に示す通り、相互相関解析を行ったところ、TESPEL 入射直後に周辺部の温度勾配と中心部の規格化熱流束の間に強い負の非局所相関が表れ、それが時間とともに弱くなっていくことも明らかとなった [4]。固体水素ペレット入射によるコールドパルス伝播実験では、固体水素ペレット入射後のプラズマ周辺部における温度回復過程において、弱い温度依存性を持つ輸送ブランチから強い温度依存性を持つ輸送ブランチへ遷移する様子が観測された[5]。図 3.2.1-3 にその様子を示す。固体水素ペレットが入射された直後、規格化熱流束は弱い温度依存性を持つ輸送ブランチ上で変化する (Phase II)。その後、ペレット入射後の密度分布の変化に伴い、突然この弱い温度依存性からはずれて、元の強い温度依存性を持つ輸送ブランチへゆっくりと遷移する (Phase III)。その後は密度が減少するに伴い、強い温度依存性を持つ輸送ブランチ上を変化する (Phase IV)。この遷移に掛かる時間は温度勾配に比例して長くなり、エネルギー閉じ込め時間よりも長くなる。L-H 遷移

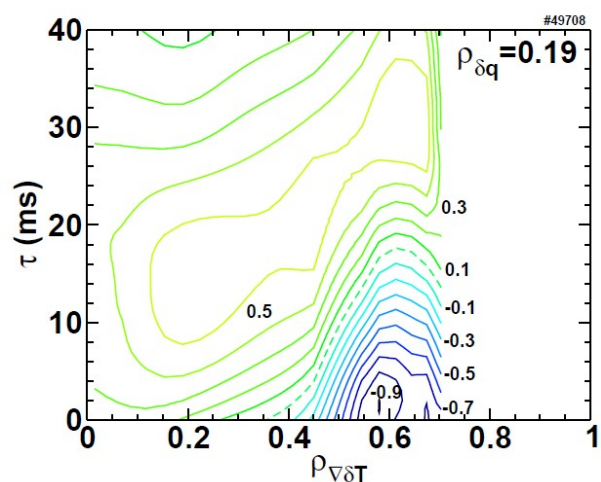


図 3.2.1-2 TESPEL 入射後の $\rho = 0.19$ の摂動規格化熱流束と各規格化小半径位置の摂動温度勾配との相互相関値の等値図

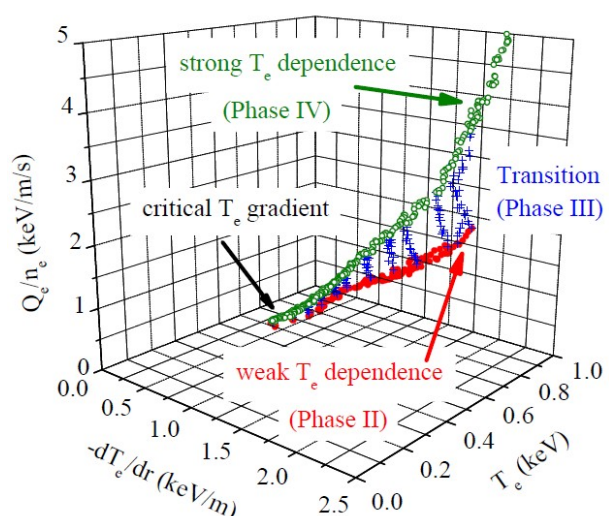


図 3.2.1-3 固体水素ペレット入射後に起きる弱い温度依存性を持つ輸送ブランチから強い温度依存性を持つ輸送ブランチへの遷移現象

時などの時間スケールと比較すると、この遷移現象は非常に遅い時間スケールを持つことが分かる。荷電交換分光計測の大幅な改善により、イオンのダイナミック熱輸送研究を行える環境が現在整備されつつある。改善された荷電交換分光計測により測定された固体水素ペレット入射時のイオン温度の時間応答を図 3.2.1-4 に示す。この時の線平均電子密度は、 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であり、中心部のイオン温度が最も低下するまでに要する時間は約 5 ms

であった。これは、その地点における密度上昇よりも時間的に早く、コールドパルスの伝播がイオン温度にも表れていることを示唆している。ただし、イオン系コールドパルスの伝播速度を測定するためには、さらに高い時間分解能が必要であることが分かったので、今後改良を進めていく。

粒子輸送に関する研究では、ガスパフ変調による粒子輸送係数の評価を軸に LHD プラズマ内の粒子輸送を規定している物理機構の解明を進めている。LHD プラズマ

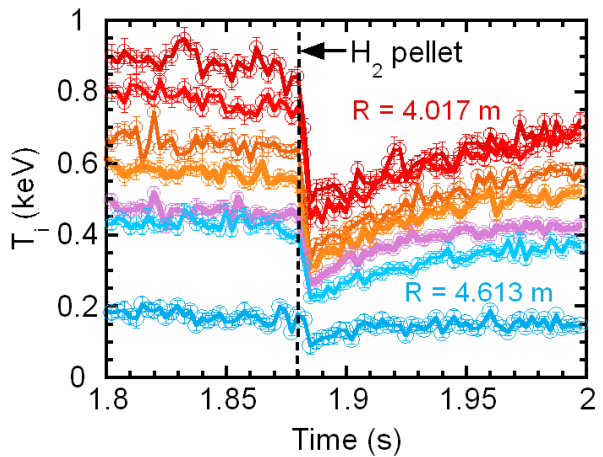


図 3.2.1-4 固体水素ペレット入射時のイオン温度の時間応答

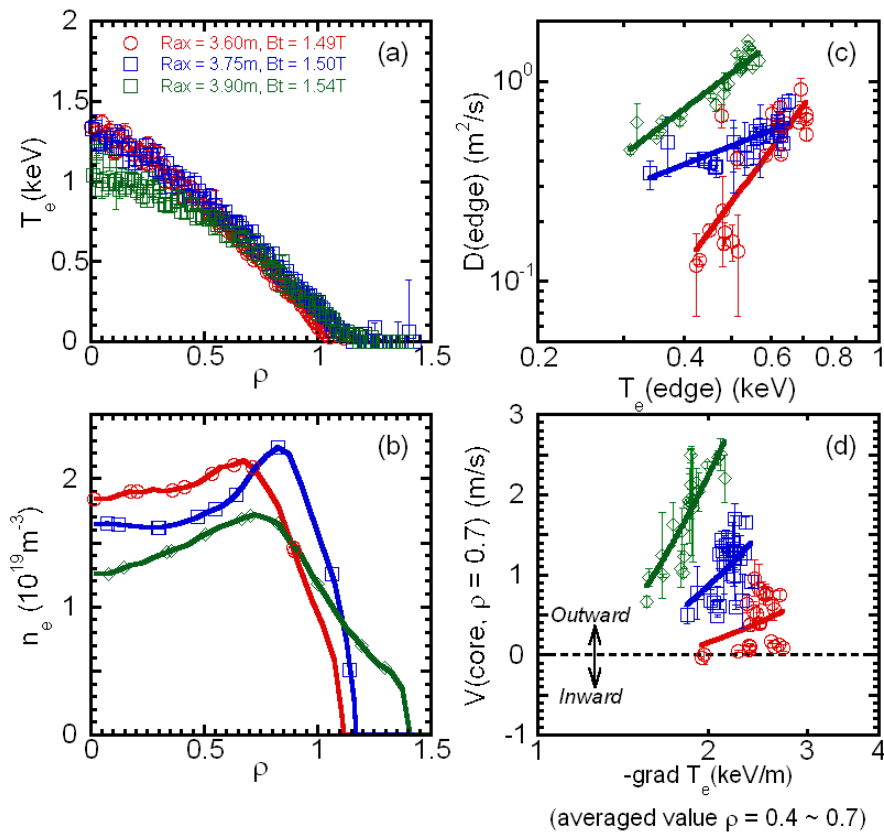


図 3.2.1-5 電子温度分布固定とした場合の粒子輸送の磁場配位依存性

では、磁気軸や加熱入力パワーの違いによる密度分布の変化が観測されている。例えば図 3.2.1-5(a, b)に示すように、電子温度分布を固定して磁気軸を内寄せから外寄せに変化させると、電子密度分布はピークした分布からホローな分布となる。(最近の研究により、加熱入力パワーを増加させても、同様に電子密度分布はピークした分布からホローな分布となることも分かっている。) この時のプラズマ周辺部における電子温度とガスパフ変調により得られた拡散係数の関係を図 3.2.1-5(c)に示す。図より、どの磁場配位においても電子温度に比例して拡散係数が大きくなっていることが分かる。また、同じ電子温度では外寄せであるほど拡散係数が大きくなっている。この時得られた拡散係数は、新古典理論による計算値より一桁以上大きく、異常拡散が支配的であると考えられる。次に、プラズマコア部における電子温度勾配とガスパフ変調により得られた対流速度的関係を図 3.2.1-5(d)に示す。図より、どの磁場配位においても電子温度勾配に比例して対流速度(常に外向き)が大きくなっており、同じ電子温度勾配では外寄せであるほど対流速度は大きくなっていることが分かる。また、新古典理論値と比較すると、得られた値はほぼ同程度であることが分かった。密度分布計測の精度は、従来の遠赤外レーザー干渉計に加えて炭酸ガスレーザー干渉計を導入することで大幅に向上した。この炭酸ガスレーザーを用いた二次元位相コントラスト干渉計を構築することで、密度揺動の空間分布計測ができるようになった。図 3.2.1-6 に、この二次元位相コントラスト干渉計によって測定されたプラズマ周辺部の密度揺動強度と拡散係数との関係を示す。図より、拡散係数が大きくなるとイオンの反磁性方向に進行する密度揺動レベルが大きくなることが分かる。また、磁場配位が外寄せであるほど、揺動レベルが大きいことも分かった[6]。

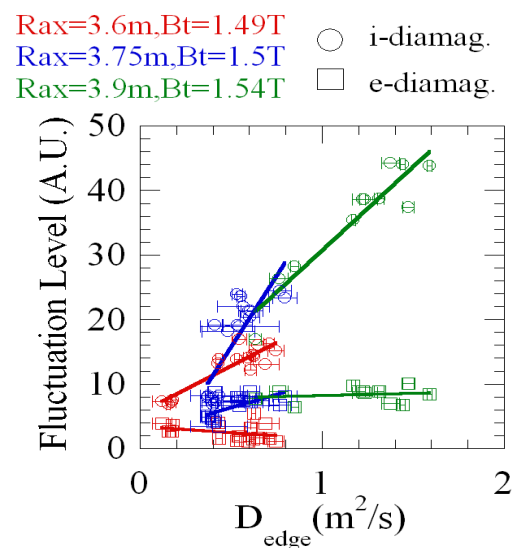


図 3.2.1-6 プラズマ周辺部の密度揺動レベルと拡散係数の関係

不純物輸送研究においては、様々な手法を用いて、低 Z から高 Z に亘る不純物輸送について研究を進めた。低 Z 不純物に関しては、特に将来の DT 核融合炉において直面する He 灰排気に関する研究を進めている。LHD ではこれまで He ガスパフ後の電子密度の減衰から He の粒子閉じ込め時間を評価していたが、新設された正イオン NBI により荷電交換分光計測の S/N 比が大幅に向上したことを受け、同荷電交換分光計測による完全電離ヘリウムイオンの空間分布と時間発展の測定から、He の粒子閉じ込め時間を評価している(九州東海大学：御手洗修教授)。現在、粒子ソースの影響などを評価して、それらを加味した解析を進めており、これにより将来の核融合炉に必

要な He 灰の排気シナリオが示されることが期待される。一方、高 Z 不純物に関しては、不純物をトレーサとしてプラズマ中に局所配置できる TESPEL などの手法を用いて研究を進めている。これまでの研究から電子密度が高くなるとコアプラズマ内において不純物蓄積が発生することが分かっているが、これを抑制する手法として ECH 追加熱の効果を調べる実験を行った。その実験の典型的結果を図 3.2.1-7 に示す。チタンをトレーサとした TESPEL をコアプラズマに入射後、50 ms 後に ECH を印加した場合、しない場合と比較して、Ti K α の発光強度の減衰時定数が 1.3 秒から 0.8 秒と短くなった。この時、径電場が負から正に変化している領域があることが分かった。この径電場の変化が不純物蓄積を抑制している可能性がある。ただし、ECH ありなしで線平均電子密度はほとんど変化していないが、ECH 追加熱により中心部の電子温度が上昇しており、温度勾配も変化している。現在、不純物蓄積の抑制に対して、径電場と温度勾配のどちらが有効であるのか検討を進めている。いずれにせよ、コアプラズマで発生する不純物蓄積の抑制に対して、ECH 追加熱が有効であることが明らかと

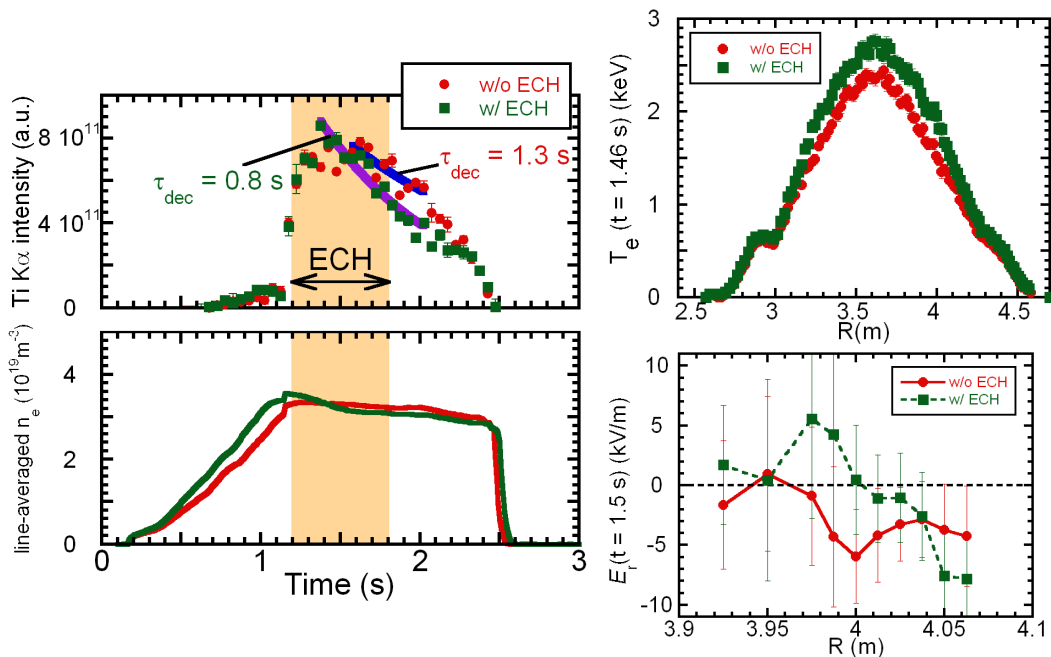


図 3.2.1-7 TESPEL を用いた不純物蓄積に対する ECH 追加熱効果検証実験の結果
 になった。

本テーマでは、乱流輸送を研究するのに不可欠である、乱流揺動を対象とする計測（例えば、ビーム放射分光法（Beam Emission Spectroscopy: BES）（[東京大学：門信一郎准教授](#)、[ジェネラル・アトムックス社（米）：G. McKee 氏](#)）やジャイロトンをを用いたマイクロ波散乱計測（[ロシア科学アカデミー一般物理研究所（露）：K. Sarksyant 氏、N. Kharchev 氏、N. Skvortsova 氏、A. Petrov 氏](#)、[オーストラリア国立大学（豪）：M. Shats 氏](#)）など）の充実も積極的に進めている。いずれの計測も平成 19 年度より本格的稼働の予定であり、これにより乱流輸送研究が大きく進展するものと期待される。

これまで取得された多様な閉じ込め実験において取得されたデータは国際協力によって国際ステラレータ/ヘリオトロン閉じ込めデータベースとして整理のうえ、蓄積されている[7-9]。データベースは核融合科学研究所とマックスプランク・プラズマ物理研究所が共同して運営している。LHDを含めた最近までのデータを取り込むことによって ISS95 則を見直した ISS04 則が提案された。

$$\tau_E^{ISS04} = 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{0.54} B^{0.84} t_{2/3}^{0.41}$$

また、無次元量での記述では、

$$\tau_E^{ISS04} / \tau_{Bohm} \propto \rho^{*-0.79} \beta^{-0.19} v_b^{*0.00} t_{2/3}^{1.06} \varepsilon^{-0.07}$$

ISS04 則はトカマク H-mode の代表的スケールリングである IPB98(y,2)則とジャイロボーム的であることを共有していることと、ベータ値に対する依存性が弱いことが特徴である。このスケールリングを導出するに当たっては、磁場配位による差異を定量的に扱う必要があった。つまり、LHD においても内寄せによる閉じ込め改善があることを認め、その改善度を定量化することである。結果、図 3.2.1-8 (a)にあるように、特徴的な磁場配位ごとに規格化因子 f_{ren} を与えることによって、小型装置から LHD までを記述することができる上記スケールリング則が得られた。

さらに、この規格化因子 f_{ren} の物理的意義を明らかにするため、磁場配位を特徴づける物理パラメータとの相関を調べた結果、実効的ヘリカルリップルとの相関が認められた[8]。ここでは磁気軸位置変化などの LHD のデータが主導的な役割を果たした。リップル構造が環状プラズマの閉じ込めに与える影響を普遍的に定式化できる可能性を示唆している。ここで注意すべきことは、この閉じ込め改善を示す f_{ren} は新古典輸送だけでなく、異常輸送の抑制に関わっていることである。ヘリカルリップルの低減による異常輸送の抑制は、今後のヘリカル系装置設計の方針に大きな影響を持つため、後述する帯状流（ゾーナル・フロー）との関係において、ジャイロ運動論に基づくイオン温度勾配モードによる乱流を対象とした大規模シミュレーションなどの高度な理論的アプローチからも解明が急がれている。

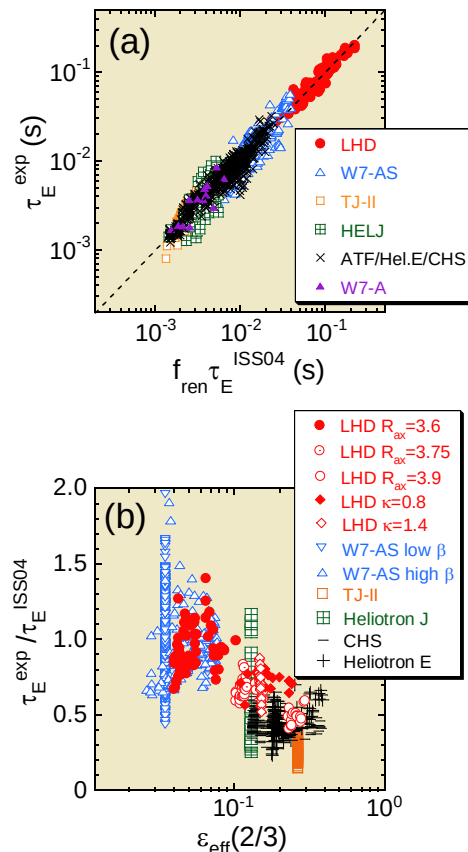


図 3.2.1-8 (a)エネルギー閉じ込め時間に関する ISS04 スケールリング、(b)閉じ込め改善度の実効的ヘリカルリップル依存性

- [1] S. Inagaki et al., “Comparison of transient electron heat transport in LHD helical and JT-60U tokamak plasmas”, Nuclear Fusion, Vol. 46 (2006) pp. 133~141.
- [2] N. Tamura et al., “Observation of core electron temperature rise in response to an edge cooling in toroidal helical plasmas”, Physics of Plasmas, Vol. 12 (2005) pp. 110705-1~110705-4.
- [3] N. Tamura et al., “Impact of nonlocal electron heat transport on the high temperature plasmas of LHD”, Nuclear Fusion, Vol. 47 (2007) pp. 449~455.
- [4] S. Inagaki et al., “Transport Dynamics and Multi-Scale Coupling of Turbulence” to be submitted Plasma and Fusion Research.
- [5] K. Ida et al., “Slow Transition of Energy Transport in High-Temperature Plasmas”, Physical Review Letters, Vol. 96 (2006) pp.125006-1~125006-4.
- [6] K. Tanaka et al, “Effect of magnetic configuration on density fluctuation and particle transport in LHD”, Fusion Science and Technology, Vol. 51 (2007) pp. 97~111.
- [7] Yamada H. et al, “Configuration effect on energy confinement and local transport in LHD and contribution to the international stellarator database”Fusion Science and Technology, Vol.46, pp.82-90 (2004)
- [8] H.Yamada et al., “Characterization of energy confinement in net-current free plasmas using the extended International Stellarator Database” 2005 Nuclear Fusion Vol.45, pp.1684-1692 (2005)
- [9] A.Dinklage et al., “Physical model assessment of the energy confinement time scaling in stellarators” Nuclear Fusion, Vol.47, pp.1265-1273 (2007)

2) 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用

このテーマの実験内容は以下の4つに大きく分けられる。

- 1) 周辺・ダイバータプラズマ特性研究
- 2) 閉じ込め領域及び周辺プラズマ中の不純物輸送研究
- 3) プラズマ・壁相互作用研究
- 4) 原子・分子過程基礎研究

特に1)、2)については、平成16年度以降、計算機シミュレーションコードの導入が進み、実験と計算の比較から多くの知見を得ることができた。

3. 2. 2. 1 周辺プラズマ・ダイバータプラズマ特性

ヘリオトロン型装置であるLHDの最外殻磁気面外側には、エルゴディック層、残留磁気島、ヒゲ構造、間ヒゲ領域から成る複合磁力線構造領域が存在する。ポロイダルダイバータ配位のトカマク型装置におけるスクレイプオフ層に比べて複雑な磁場構造をもつ複合磁力線領域における輸送特性を明らかにするため、静電プローブを用いた周辺プラズマ分布計測が行われてきた [1]。

さらに平成17年度に、3次元プラズマ・中性粒子輸送コードEMC3-EIRENE [2]を導入した。図3. 2. 2-1に計測と計算でそれぞれ得られた電子密度、電子温度分布の比較を示す。計算では、拡散係数D及び熱伝達係数 χ を周辺プラズマ領域で一定とし、 $\chi = 3D$ を仮定している。ヒゲ構造に対応する電子温度のピークが低密度放電では観測されるが高密度放電では観測されないこと、また電子密度にはヒゲ構造に対応するピークが観測されないこと、電子密度、電子温度分布が長い磁

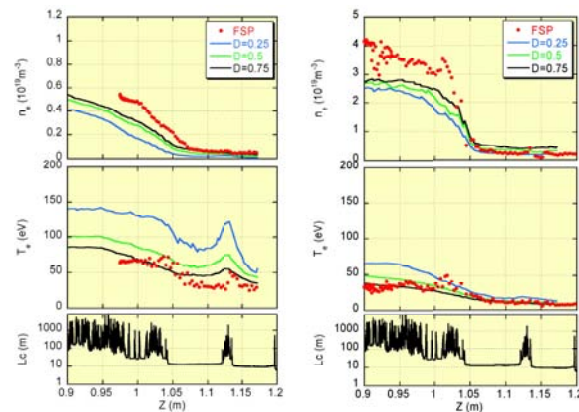


図3. 2. 2-1 磁気軸 3.75m の配位において、静電プローブによる計測で得られた周辺プラズマ中の密度、温度分布とEMC3-EIRENEコードによる計算結果の比較。(左) $n_{e,bar} = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、(右) $n_{e,bar} = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。それぞれ上から電子密度、電子温度、磁力線接続長。赤丸が計測データ、実線はD(χ)を変化させた計算結果。

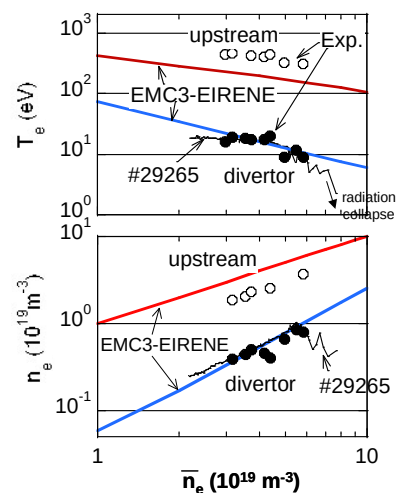


図3. 2. 2-2 最外殻磁気面近傍及びダイバータ部の電子密度(上)及び電子温度(下)について、静電プローブによる計測とEMC3-EIRENEコードによる計算結果計測との比較 [3]。

力線群が密に分布する領域が始まる $Z = 1.05$ m 近辺から立ち上がることを、について、計算結果は実験データをよく再現している。実験と計算との比較では、 $D(\chi)$ は、 $0.75 \text{ m}^2/\text{s}$ ($2.25 \text{ m}^2/\text{s}$) 程度を仮定すると両者の絶対値がよく一致する。この値はトカマク装置のスクレイプオフ層と同程度の値である。同様の比較をトムソン散乱計測で得られた電子温度分布でも行っており、同様の結果を得ている。

周辺プラズマ領域の最下流にあたるダイバータ部における静電プローブ計測では、FIR干渉計及びトムソン散乱計測でそれぞれ得られた最外殻磁気面近傍の電子密度、温度の値に比べて、図3. 2. 2-2に示すようにダイバータ部ではそれぞれ10分の1以下まで低下していることが観測されてきた。また、運転密度を上げると、トカマク型装置のダイバータで観測されているような高リサイクリング状態は観測されていない。EMC3-EIRENEコードによる計算結果は、計測結果を再現するものであった。このような性質は、最外殻磁気面からダイバータへ至る磁力線長が数kmにも及ぶほど長いこと、磁力線を横切る輸送の影響が大きくなること、また磁力線に沿って反対方向の流れが形成される領域があり、そのため運動量損失が生じることに起因すると考えられる。

トカマク装置では、磁力線に沿った構造をもつプラズマ小塊 (blob) が、数十から数百 m/s の早さで磁力線を横切って輸送されていることが観測されている。blob 内部の荷電分離により発生した電場による $E \times B$ ドリフトで磁力線を横切ると考えられている。このような輸送のため、第一壁近傍への粒子負荷が無視できなくなっている。LHDの複合磁力線領域におけるblob輸送特性を明らかにするため、ダイバータ板上の静電プローブアレイ及び可動静電プローブで観測したイオン飽和電流の揺動について、確率密度分布関数 (PDF) 及びWAVELET法を用いた解析を行っている。図3. 2. 2-3に、ダイバータ板上プローブ (a) を参照) で得られた信号

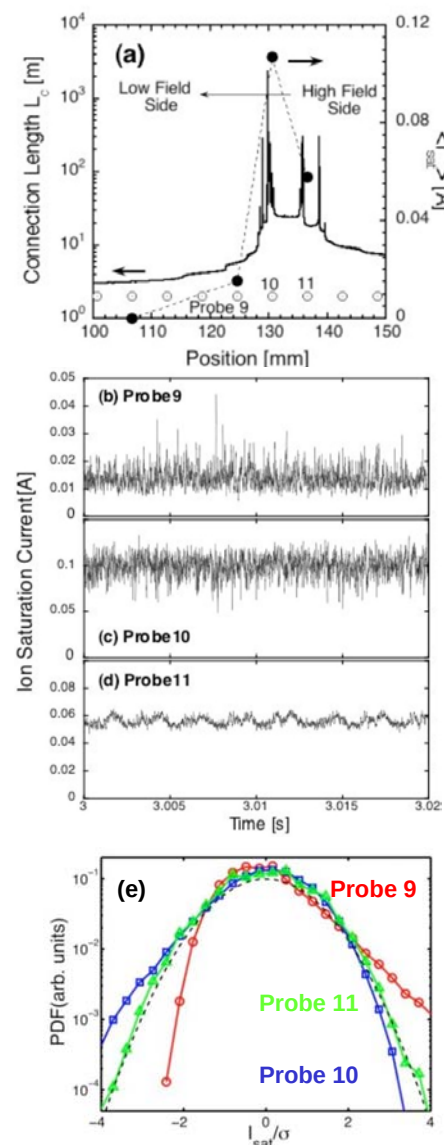


図3. 2. 2-3 (a)ダイバータ板上の磁力線接続長分布と静電プローブ位置。(b)-(d)異なるプローブにおけるイオン飽和電流波形。(e)各プローブのイオン飽和電流揺動のPDF。破線はガウス分布を示す。

(b)-(d) の解析の一例を示す。それぞれのプローブ信号のPDFは(e)のようになる。プローブ9、10のPDFはそれぞれ正、負にテールをもつ。一方、プローブ11のPDFはガウス分布に一致している。この結果は、blobが弱磁場側に輸送されていることを示している。負のテールはblobが離脱したあとのホールに対応すると考えられる。この観測は、blob輸送機構の理論的な予測と矛盾しない。(名大・大野)

LHDにおける中性粒子挙動を明らかにするため分光計測と中性粒子輸送コードEIRENEによる計算の比較を行った。図3.2.2-4は、 H_α 線計測器アレイによって測定された

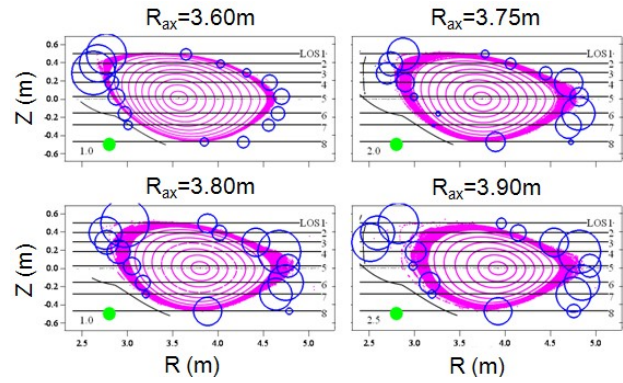


図3.2.2-4 偏光分離光学系を伴った H_α 線計測器アレイによって測定された各磁場配位におけるプラズマ周辺部の H_α 線輝度分布。

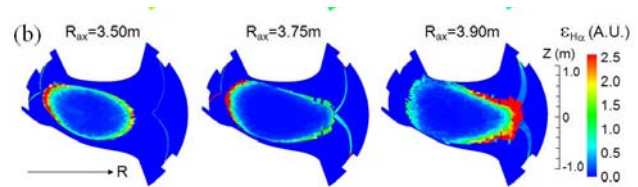


図3.2.2-5 (a)各磁場配位において中性粒子輸送コードによって計算されたプラズマ周辺部の H_α 線輝度分布。

偏光分離スペクトルをガウス関数でフィッティングすることにより求められたプラズマ周辺部の H_α 線発光輝度の空間分布を示している。磁気軸位置が3.60mよりも内側の磁場配位では、トーラス内側の領域の H_α 線輝度が他の領域と比較して大きくなっているが、磁気軸位置が外側になるに従ってトーラス外側領域の H_α 線輝度が相対的に大きくなる傾向が観測されている。この空間分布の磁気軸依存性を理解・解釈するために、EIRENEコードによる詳細な解析を行った。なお、ここではダイバータタイルから放出される中性粒子・中性水素原子・分子のトロイダル・ポロイダル方向分布はダイバータトレース分布と同一であると仮定している。LHDの複雑な真空容器壁形状、ダイバータタイル位置などを考慮して計算された各磁場配位におけるプラズマ周辺部の中性水素分子密度分布を図3.2.2-5に示す。磁気軸が外側になるに伴い、トーラス外側領域の中性水素分子密度が高くなっている。磁気軸位置が外側になるとともに、トーラス外側領域の H_α 線輝度が高くなっており、図3.2.2-4の結果を再現している。磁気軸の変化に伴う H_α 線輝度分布の変化は、磁気軸が内側から外側に変化するのに対してダイバータトレース分布も相対的にトーラス外側に集中することが挙げられる。(京大・岩前)

3.2.2.2 不純物輸送

主プラズマ中における不純物の径方向輸送性を明らかにするため、不純物ペレット

入射を用いた実験研究を行ってきた。不純物の径方向輸送は次の式で表すことができる。

$$\Gamma_q = -D_q(r) \frac{\partial n_q}{\partial r} + V_q(r) n_q$$

ここで D_q 及び V_q は q 種のイオンの拡散係数及び対流速度を示す。外径 0.3–0.8 mm の円筒型ペレットを高圧の He ガスによって 200 m/s 程度に加速し LHD に入射する。ペレットはプラズマ中で溶発しイオン化する。実効荷電数 (Z_{eff}) の増加によって強められた可視域制動放射強度空間分布の時間変化を計測することにより、入射した不純物ペレット構成元素の径方向輸送係数を求めた。通常 LHD の密度分布は中心部が平坦であるため対流速度が非常に少ないことが示唆される。そこで D は空間一定であるが、 V はある ρ^* の位置より内側は一定でその外側で勾配を有する形状とする仮定の下で解析を行った。不純物輸送の原子番号依存性を確かめるために炭素、アルミニウム及びチタンを入射した。炭素ペレットを入射した放電から得られた制動放射強度の時間変化の計測結果と D 及び V を仮定した計算値との比較の一例を図 3. 2. 2–6 に示す。図 3. 2. 2–7 にこのような手法で得られた炭素、アルミニウム、チタンイオンの D 及び V の電子密度依存性を示す。拡散係数 D は原子番号によらず一定値をとるが対流速度には大きな原子番号および密度依存性が存在することがわかる。ここで得られた拡散係数は新古典理論から予想される値より 10–20 倍大きく、異常輸送が支配的であることが理解できる。密度勾配が増大すると内向きの対流速度が大きくなることが新古典理論から予想されているが今回の結果はそれと矛盾しない。しかしながら、温度勾配と対流速度の相関はほとんど見られず、新古典理論からの予測とは一致しない（新古典理論では温度勾配が増大すると外向きの対流速度が生じる）

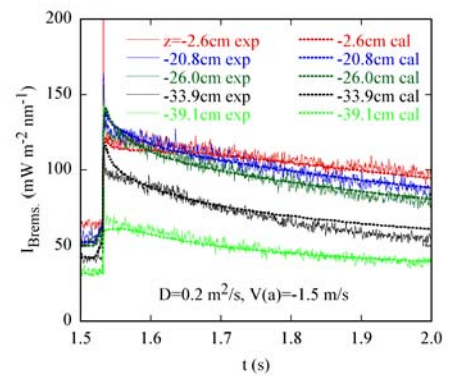


図3. 2. 2–6 炭素ペレット入射後の制動放射。計測値と計算値の比較

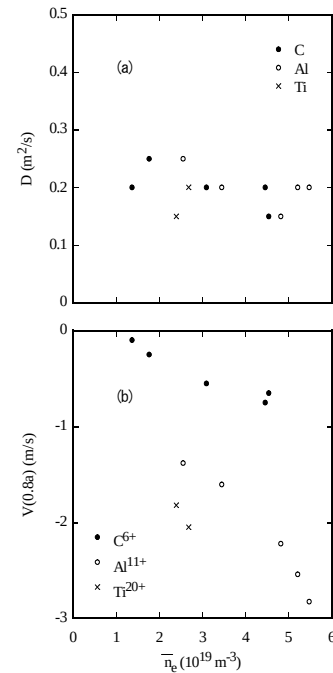


図3. 2. 2–7 $\rho=0.8$ における炭素、アルミニウム、チタンイオンの拡散係数及び対流速度の電子密度依存性

周辺プラズマ領域における不純物輸送について、EMC 3-EIRENEコードを用いた計算が行われた。図3. 2. 2-8に計算で得られた周辺プラズマ領域における炭素不純物の密度分布を示す。密度が比較的低い($2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)場合には、炭素は最外殻磁気面近傍に集中して分布していることがわかる。これは磁力線に沿ってできるプラズマの温度勾配によって発生する thermal force によって不純物が上流(最外殻磁気面の方向)に向かって引き上げられるためである。一方、プラズマ密度すなわち衝突頻度をあげていくと背景プラズマと不純物のあいだに働く摩擦力が大きくなる。プラズマは上流からダイバータに向かって流れているため、この力是不純物をダイバータに向かって押し戻す働きを持つ。図3. 2. 2-8下図では密度が増加したために($4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) 摩擦力が thermal force よりも大きくなり、結果として不純物遮蔽がおこっている様子を現している。この効果を実験的に確かめるために、炭素原子からの発光について、EMC 3-EIRENEコードによる計算をおこなった。不純物遮蔽が優勢な場合、ほとんどの炭素がエルゴディック層の外側に押し戻される。そこでは電子温度が低いため、低荷数のイオンが増えることになる。そのため CII, CIII, CIVが増加する。図3. 2. 2-9 (a) は (CII+CIII+CIV) と (CV+CVI) の比の電子密度依存性を示したものである。ここで、CIV と CV の電離電圧はそれぞれ 65eV、392eV と大きな差があり、空間的にもこれら二つのグループは離れて分布していることがわかっている。密度を上げるにつれて摩擦力が大きくなり不純物遮蔽が優勢となり、低荷数からの発光が増加し、結果として比 $(\text{CV}+\text{CVI})/(\text{CII}+\text{CIII}+\text{CIV})$ が小さくなっていく。比較のために摩擦力を考慮しない場合の計算結果も示してあるが、この場合は不純物遮蔽がおこらず、低荷数、高荷数ともに密度に対して同じような振る舞いをするために、比があまり変化していない。図3. 2. 2-9 (b) に分光計測から得られた実験データを示す。明らかに密度に対して $(\text{CV}+\text{CVI})/(\text{CII}+\text{CIII}+\text{CIV})$ は大きく減少しており、摩擦力による不純物遮蔽が働いていることがわかる。

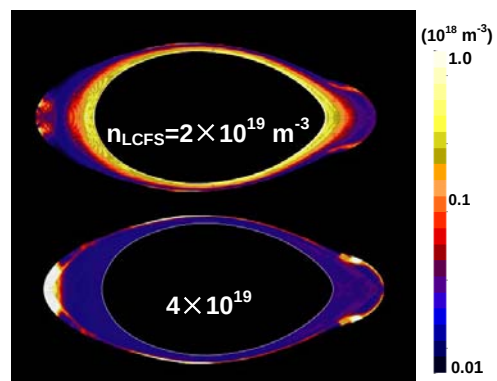


図3. 2. 2-8 炭素不純物分布の計算結果。最外殻磁気面の密度: $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (上)、 $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (下)。入力パワー:8MW。

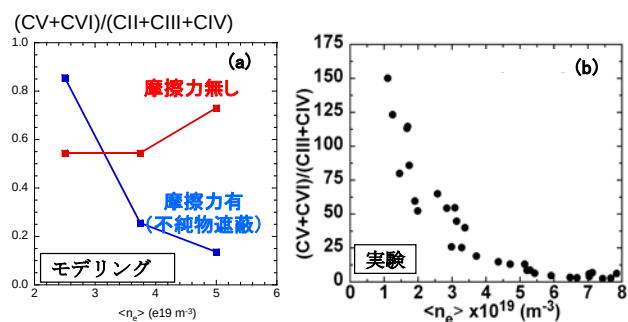


図3. 2. 2-9 炭素不純物からの発光強度の背景プラズマ密度依存性。(a) 3次元モデリング、(b)実験結

3. 2. 2. 3 プラズマ・壁相互作用研究

LHDにおけるプラズマ・壁相互作用研究は、1) LHD真空容器内材料の移動と損耗・堆積に関する研究、2) LHD真空容器内のダスト生成及び輸送に関する研究、3) 効果的な壁コンディショニング法の研究、4) 将来の核融合炉におけるプラズマ対向材候補である高Z金属に関する研究、の4分野に大きく分けることができる。

1) LHD真空容器内材料の移動と損耗・堆積に関する研究

LHDの真空容器内材料は、第一壁がSUS316、ダイバータ板が等方性黒鉛となっている。実験サイクル毎にLHD真空容器内にはマテリアルプローブ（SUS316、Siなど）が設置され、表面堆積物の組成やガス保持量の分析が行われてきた。その系統的な研究から、トロイダル方向の水素及びヘリウムガス保持量分布は、壁コンディショニングのために使用するグロー放電陽極位置でピークを持つ分布であることが明らかになっていた。特に平成16年度以降は、損耗・堆積のトロイダル分布を評価したところ、マテリアルプローブを設置した横長断面ヘリカルコイル直下位置においてはほぼ全周で損耗しており、特にグロー放電陽極近傍の損耗が大きいことが示された。また平成17年度以降は、特にプラズマと炭素材料の相互作用の大きいローカルアイランドダイバータヘッド部にマテリアルプローブを設置し、炭素堆積層の形成機構とガス保持特性に関する研究を進めている。（北大・日野）

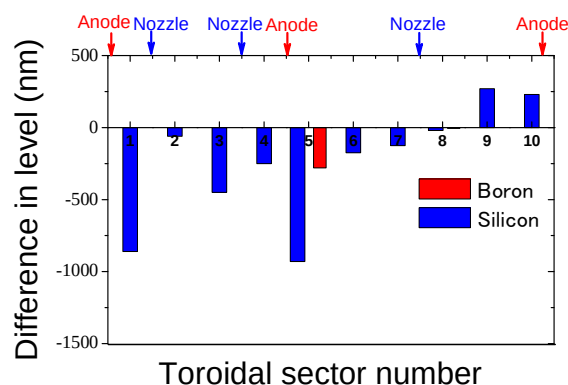


図3. 2. 2-10 トロイダル各セクションに設置したマテリアルプローブの損耗・堆積厚さ分布

2) LHD真空容器内のダスト生成及び輸送に関する研究

核融合装置内では炉内材料、特に現在の中大型装置ではリミタやダイバータ板材料である炭素のダストが観測されている。局所的に炭素ダストが堆積層を形成していることも観測され、そのような層ではバルクの炭素に比べて水素同位体保持量が大きくなるため、ITERや将来の核融合炉では炉内残留ト

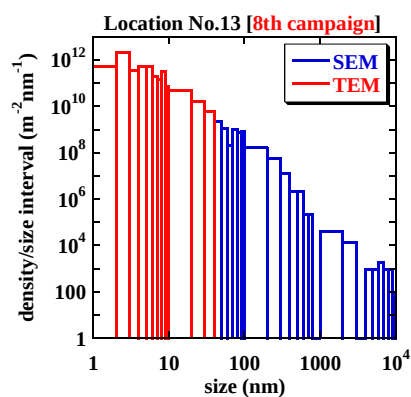


図3. 2. 2-11 LHDにおけるダストサイズの密度分布。

リチウムの増大をもたらすため問題となっている。LHDでは実験サイクル終了後に、フィルタを用いた吸引によりダストを採取し、そのサイズ、数及び組成を調べた。特にサイズについては、透過型電子顕微鏡を用いて、1 nm オーダーまで観測した。組成は、サイズが1 μm よりも小さい場合は主として炭素であり形状は粒状あるいはそれらが集まった形状をしており、大きい場合は鉄が主であり、その形状はフレーク状であることが分かった。サイズの密度分布を図3. 2. 2-11に示す。密度分布はダストの採取場所には強くは依存していない。サイズが1桁小さくなると密度は3桁大きくなっている。この分布は $\text{density}[\text{m}^{-2}]/\text{size}[\text{nm}]=(\text{size}[\text{nm}])^{-3}$ で表される J u n g e の指数分布で近似することができ、 $\beta=2.1\text{--}3.3$ 程度である。この分布は大気中の微粒子の分布にもなっており、小さいサイズのダストが大きくなっていくという成長機構があることを示唆している。(九大・白谷) ダストの輸送については、高速カメラを用いたプラズマ中のダストの運動観測を行いつつある。(名大・大野)

3) 効果的な壁コンディショニング法の開発

LHDでは壁コンディショニング法として、ヘリウムグロー放電が主として行われてきた。また、第一壁へのチタン蒸着も酸素の除去、水素排気に効果的であり、用いられてきた。一方、ヘリウムグロー放電後の水素主放電中にはヘリウムが混入することが観測されていた。また駆動装置を用いてマテリアルプローブをヘリウムグロー放電に曝露して、その材料損傷を詳細に調べた結果、多くのバブルが形成されていることが分かった。バブルの形成は水素保持特性にも影響を与えることが考えられた。そこでLHDにおいて水素、ヘリウム、ネオングロー放電を実施し、コンディショニング効果及び材料損傷について、質量分析器による残留ガス分析や透過型電子顕微鏡等を用いて調べた。その結果、ネオングロー放電はコンディショニングの進行が比較的早く、図3. 2. 2-12に示すように材料損傷もヘリウムに比べて極めて小さいことが明らかになった。(九大・吉田、時谷) また、ジボランとヘリウムの混合ガスを用いたグロー放電による第一壁のボロン被覆について、トロイダル方向に均等な膜形成を目指し、前出の真空容器内マテリアルプローブによりボロン膜厚のトロイダル分布を評価し、3ヶ所のジボラン導入ノズルからのガス流量調整を最適化した。(北大・日野) これらの

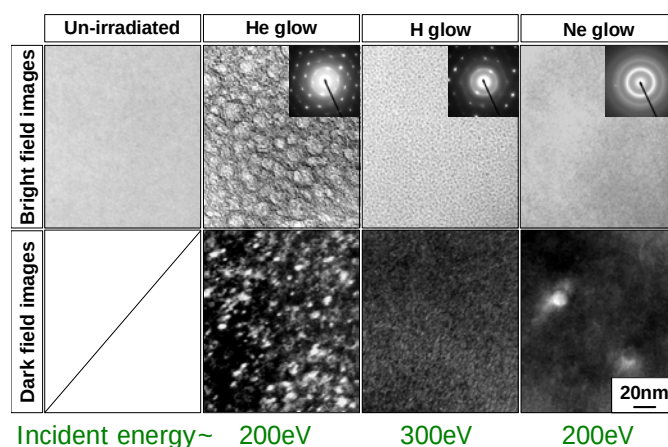


図3. 2. 2-12 ヘリウム、水素、ネオングロー放電への曝露前後の透過電子顕微鏡像

結果から、LHDではメンテナンス期間終了後にベーキング及びネオングロー放電を行い、その後水素放電により壁中ネオンを除去し、実験開始1週間程度前にボロン被覆を行うという壁コンディショニング法を確立した。

4) 将来の核融合炉におけるプラズマ対向材候補である高Z材料に関する研究

本研究では、マテリアルプローブシステムを用いてタングステン (W) などの金属材料を様々なLHDプラズマ放電へ曝露し、材料損耗やそこに捕捉されるプラズマ粒子の量について多くの知見を得た。その中でも、正確な実機照射実験に加えその後の透過型電子顕微鏡 (TEM) による損傷組織観察とイオンビーム分析 (RBS及びERD) を用いた捕捉プラズマ粒子量評価を組み合わせた分析技術を確立できたことは大きな成果であった。

W のTEM試料及びバルク試料をマテリアルプローブシステムに取り付け、ダイバータレグ位置まで挿入し、He やH のダイバータプラズマへの照射を行った。He ダイバータプラズマに曝露されたW試料内部には、大小さまざまなHeバブル(1-20nm)や転位ループが高密度に発生し、同時に表面には直径100-200nm程度のブリスターの剥離も確認された。一方、Hダイバータプラズマに曝露後の試料内部にも直径1-3nm程度の高密度水素キャビティが確認され、表面には直径100-300nm程度のブリスターの剥離が観察された。低エネルギーHeプラズマによるバブルやホールの発生は過去の基礎研究などからある程度予想できたが、低エネルギーHプラズマによるキャビティやブリスターの剥離の発生はこれまでの知見からは予測できなかった現象である。これらは、パルス的な高熱負荷・高粒子負荷の相乗効果によって引き起こされたものであると考えられる。このような欠陥の形成は表面層の剥離を引き起こし、予期せぬプラズマ汚染につながる可能性がある。W内部の欠陥には多くのプラズマ粒子(HeやH)が捕捉されることが考えられるため、内部に捕捉されたHeやHを定量化する必要がある。その手段として、タンデム加速器によるラザフォード後方散乱法(RBS)と弾性反跳粒子検出法(ERD)の同時測定法を用いた。図3. 2. 2-13にERDによって導出されたW中の(a)Heおよび(b)Hの面密度を示す。前者がダイバータトレース部にピークを持つのに対し、後者はダイバータトレース部で最小となっている。Heは材料中に存在する原子空孔との結合力が極めて強い

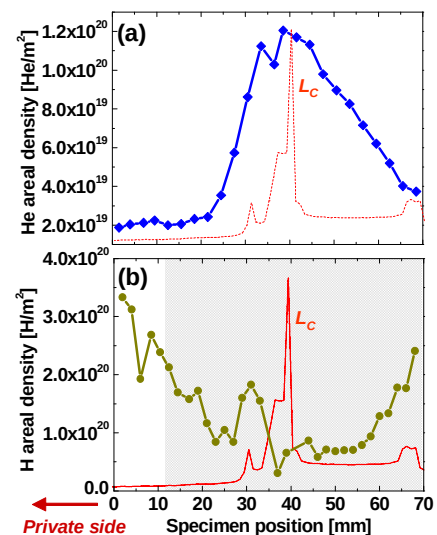


図3. 2. 2-13 (a)He および(b)H ダイバータプラズマ曝露後(それぞれ 30s 曝露後)の W 試料中に捕捉されたプラズマ粒子の面密度。L_cは磁力線の接続長を示し、その分布はダイバータ粒子束分布に対応する。

ために、1000℃近い温度においても容易に放出されることはない。一方、Hは欠陥との結合力が弱いために程度でも大部分が放出されることから、このような分布の違いが出来たと考えられる。(九大吉田)

3. 2. 2. 4 基礎研究

次世代EUV（極端紫外光、Extreme Ultra Violet）光源の開発研究に関連する実験を大阪大学及び首都大学との共同研究で行っている。大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、レーザープラズマを利用した次世代半導体製造用EUV光源の開発研究を行っている。次世代の半導体を製造するために波長135 Åの極端紫外領域波長の採用がすでに国際標準として採用されている。135 Å波長領域に高い変換効率のスペクトルが得られる材料としてSn ($Z = 50$)及びXe ($Z = 54$)が有力候補として挙げられているが、これら高Zイオンから放射されるスペクトル線の詳細構造は十分理解できていない。そのため、これらイオンのスペクトル構造を実験及び理論の両面から解明し、技術開発の指針を得るための放射流体コードへの組み込みを行う必要が生じている。そこで、LHDプラズマからの放射極端紫外線スペクトルの計測と詳細原子モデルに関する研究を開始した。その目的はレーザープラズマのような温度・密度勾配の急峻なプラズマではなく、温度密度分布が正確に把握されているLHDプラズマにおいて放射スペクトルを観測することにより基準データを取得し、これと比較することによって高Z物質の詳細原子モデルを確立し、それをレーザープラズマ診断に還元することにある。

図3. 2. 2-14はLHDプラズマにSnペレットを入射した放電で得られたスペクトルとFACコードとの比較を示している。現段階ではレート方程式への組み込みはまだなされていないので、各電離度のイオンに対して等配分した場合の結果である。今後、順次解析を進めていく予定である。(阪大西村)

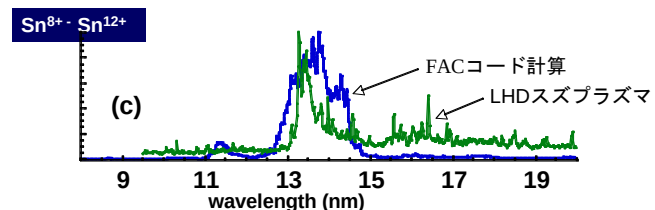


図3. 2. 2-14 FACコード計算と電荷交換分光法(首都大/田沼ら)による観測結果ならびにLHDスズプラズマ放射スペクトルとの比較。

また同様に130 Å付近の波長のEUV光源開発のため、比較的低電離のXeイオンからの発光を観測し、そのスペクトルがどのイオン化状態からのどのような遷移かを明らかにする実験が行われた。LHDプラズマ中にXeガスを入射し、発光スペクトルを得た。Churilov (2004)の結果、及び数種のコードによる計算結果を用いてスペクトルの同定がなされた(図3. 2. 2-15.)。LHDで得られたXeの極端紫外(EUV)領域のスペク

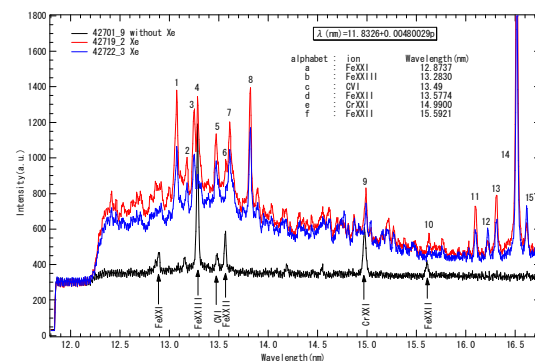


図3. 2. 2-15 Xeガスパフ実験で得られた130 Å付近のスペクトル同定

トルと、理論予測に基づく計算コードによる波長との比較と、イオン化状態及び遷移の同定を行った結果、プラズマが放射崩壊した場合としない場合に得られたスペクトルについて、放射崩壊の際に増加する EUV 光は、より外側の軌道の電子、すなわち低電離イオンからのライン発光が支配的であること等が明らかにされた。

3) MHD 平衡と安定性

大型ヘリカル装置 LHD は、超伝導コイルに流す電流を適切に調整することにより、多種多様な平衡配位・磁場配位を高い自由度で生成できる特徴がある。また、外部摂動磁場コイルによる磁気島の生成や、接線入射中性粒子ビームおよび電子サイクロトロン電流駆動法による電流駆動を通じた回転変換分布の制御などにより、能動的な平衡配位の制御を行なうことができる。『MHD 平衡と安定性』テーマグループでは、ヘリオトロンプラズマの平衡と MHD 安定性を探求するために、LHD が持つこれらの特徴を最大限に活用して、各々の研究課題に最適な平衡配位を用いて実験が進められている。『MHD 平衡と安定性』テーマ枠に提案された実験課題を分類すると、MHD 平衡特性、MHD 安定性、閉じ込め特性の平衡配位依存性、磁気島物理など多岐に渡る。以下に、それぞれに分類される実験について述べる。

3.2.3.1 MHD 平衡特性に関する研究

MHD 平衡特性に関する研究として、回転変換分布の計測を通じた研究が行われた。磁場閉じ込めプラズマにおいて、平衡配位を論ずるためには回転変換分布の計測ならびに制御が必要である。モーショナルシュタルク効果(MSE)分光による回転変換分布の計測を行い、ヘリカルプラズマにおける磁気シアと輸送および MHD 不安定性との関連について研究が進められた[1-2]。平成 16 年度には初歩的なデータを取得し、回転変換分布を得ることができた。図 3.2.3.1-1 は差分偏光角度の空間分布と、その偏光角度にベストフィットする磁場配位時の回転変換角度の分布を示したものである。中性粒子ビームがヘリカル磁場を作る等価プラズマ電流と同じ向き(co 方向)に入射されたときには、偏光角度が正に変化し、回転変換角度が真空の回転変換角度に比べ大きくなる様子がプラズマ全体において観測された。これとは逆に、中性粒子ビームがヘ

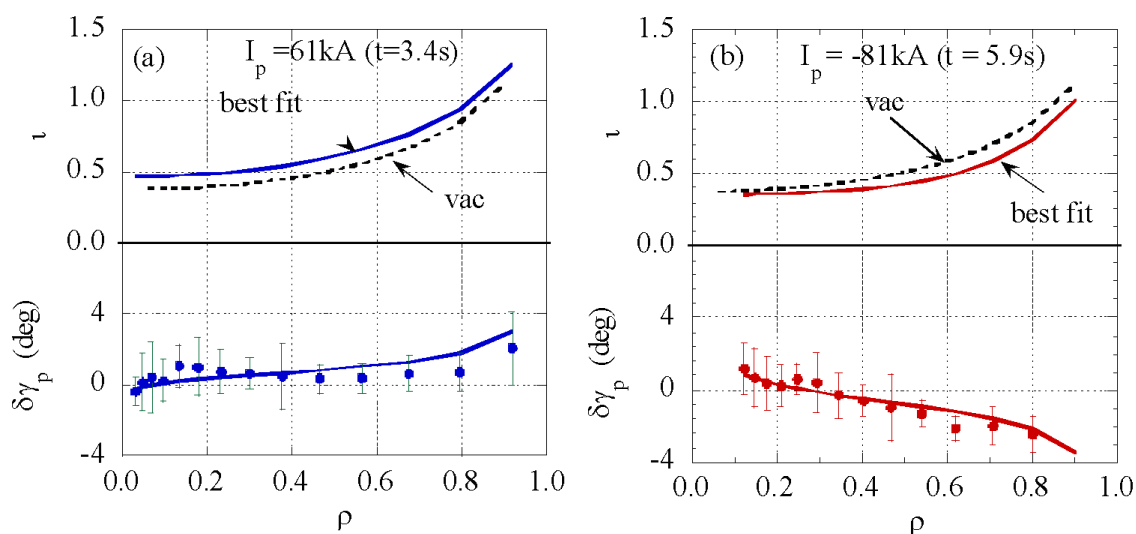


図 3.2.3.1-1 (a) co-NBI 入射と(b)ctr-NBI 入射における回転変換角度分布と差分偏光角度の分布

リカル磁場を作る等価プラズマ電流と逆向き(ctr 方向)に入射されたときには、偏光角度が負に変化し、プラズマ周辺部においては回轉變換角度が真空の回轉變換角度より小さくなる様子が観測されたが、中心部の回轉變換角度には変化が見られなかった。このようにモーショナルシュタルク分光によって、中性粒子ビーム電流駆動によるプラズマ内部の回轉變換角度を計測できるようになった。平成 17 年度以降は、電流駆動により中心の回轉變換を下げて、プラズマの閉じ込めがどのように変化するか、また逆に中心の回轉變換を上げて磁気シアを小さくし、MHD 不安定がどのように変化するかについても調べた。これらの実験研究を通じて、回轉變換分布のプラズマ閉じ込め及びMHD不安定性への影響について研究を行った。図 3.2.3.1-2 は、この中性粒子ビーム入射方向切り替え実験において、回轉變換角度の時間変化を測定した結果である。プラズマ電流を co 方向から ctr 方向へ切り替えた場合には、プラズマ周辺部($\rho=0.9$)の回轉變換角度は減少していくが、プラズマの中心部($\rho=0.2$)の回轉變換角度は、逆に増加している。一方、プラズマ電流を ctr 方向から co 方向へ切り替えた場合には、プラズマ周辺部($\rho=0.9$)の回轉變換角度は増加していくが、プラズマの中心部($\rho=0.2$)の回轉變換角度は一旦減少し、その後緩やかに増加している。この回轉變換角度の変化が、プラズマの周辺部と中心部で逆転する現象は、温度が低いプラズマ周辺部に電流が流れることによって生じた逆起電力が原因である[3]。上記以外にも、NBI 駆動電流による回轉變換分布の制御を用いた研究[4-5]、有限ベータによるプラズマ境界の変化を詳細に調べた研究[6]、シャフラノフシフトが平衡限界に与える影響についての研究、反磁性信号から得られるベータ値のプラズマ電流の影響に関する研究[7]、磁気計測を用いた圧力非等方度の計測[8]が行なわれてきている。

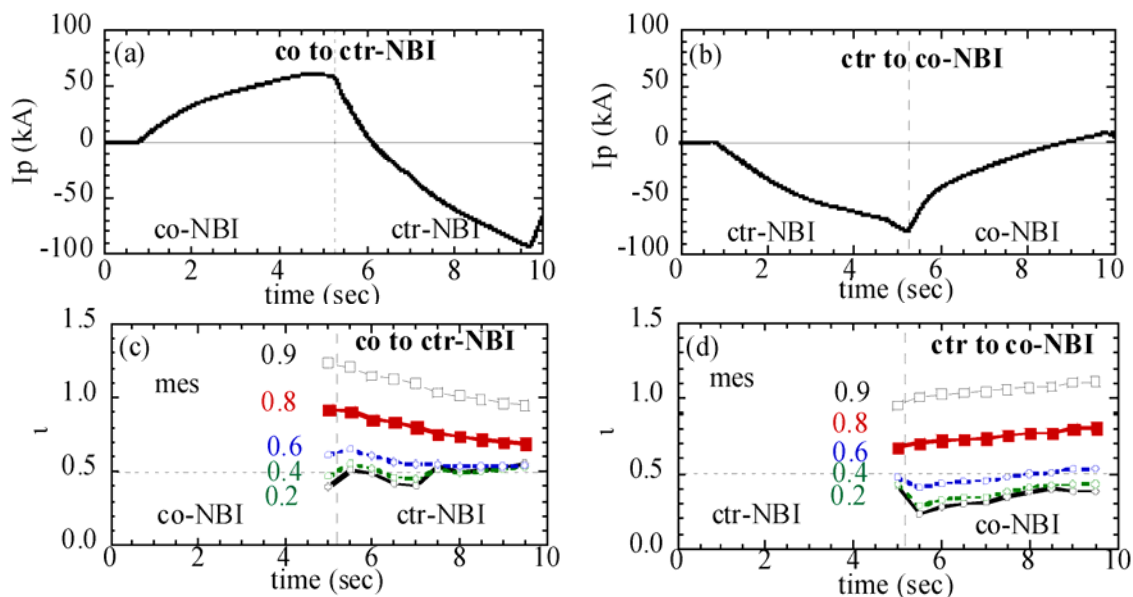


図 3.2.3.1-2 中性粒子ビーム入射方向切り替え実験 [(a),(c)co 方向から ctr 方向、(b),(d) ctr 方向から co 方向] における(a),(b)プラズマ電流、(c),(d) MSE で観測された回轉變換角度の時間変化

3.2.3.2 MHD 安定性に関する研究

MHD 安定性については、プラズマからの軟 X 線の観測を通じた揺動の計測により、さまざまなモード構造の同定によりその特性が調べられてきている。軟 X 線放射強度は電子温度、密度、不純物の密度などの複雑な関数で直接物理量を推定することは困難だが、磁気面上で放射強度分布が一定と考えられるため放射強度分布の等高線から磁気面の動きが推定でき、幅広いプラズマ条件下で使える揺動計測器として広く用いられている。大型ヘリカル装置では接線方向からの 2 次元計測を行い、MHD モードの 2 次元構造の可視化を行っている。図 3.2.3.2-1 に示すのは水素ペレット入射後の圧力勾配が急峻化する時間帯にしばしば観測される内部崩壊現象の測定例で、崩壊の直前に $m = 3$ の空間構造を持つ不安定が成長し、コア部からの熱の流出が起きていることがわかる。複雑な磁気面を持つ LHD においても、形状が単純なトーラスに近いコア部の不安定性に対してはこのような直接の可視化は有効で、MHD 不安定性の空間構造やその非線形発展を捉える計測器として有用である。

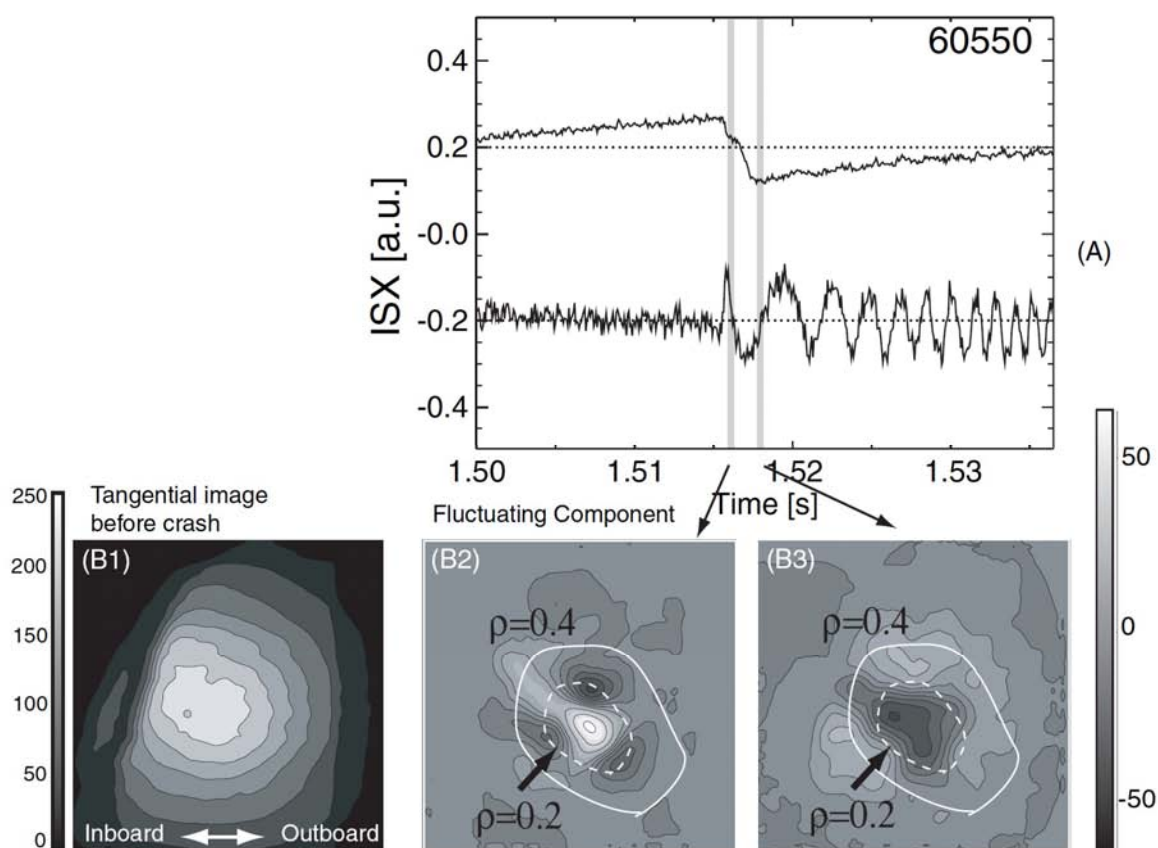


図 3.2.3.2-1 コア部の内部崩壊現象時に観測される $m = 3$ の MHD 不安定

上記以外にも、プラズマ周辺で励起される圧力駆動型 MHD モードに関する研究 [9-10] や、周波数掃引した外部磁場摂動の印加による TAE 励起実験 [11]、NBI 駆動電流を用いて回転変換のシアを弱くした場合の MHD 不安定性の研究 [4] などが行われてきている。

3.2.3.3 閉じ込め平衡配位依存性に関する研究

閉じ込め平衡配位依存性に関する研究として、ECH プラズマを対象に、低衝突領域における閉じ込め特性、楕円度・実効ヘリカルリップル ϵ_{eff} 依存性に関する研究が挙げられる。これまで、広い磁場、密度、加熱方法において、エネルギー閉じ込め時間の実効ヘリカルリップル (ϵ_{eff}) 依存性が指摘されており、 ϵ_{eff} が低減された配位において異常輸送が抑制されていることが分かっている。この新古典拡散の最適化が乱流輸送をも抑制するという作業仮説の物理機構として、ポロイダル回転粘性 C_p の減衰率の効果を検討している。新古典拡散の最適化が乱流輸送をも抑制するという作業仮説の物理機構として、ポロイダル回転粘性 C_p の減衰率の効果を検討している。

図 3.2.3.3-1 にあるように、磁気軸シフトでは ϵ_{eff} と C_p が良く相関しており、逆に言えば分離できない。今回行った縦長断面変形 (BQ=0%, $\kappa=1.4$ 、白抜き三角のシンボル) では、標準配位 (BQ=100%) と比較して、 ϵ_{eff} が大きく、 C_p が逆に小さい配位が実現できる。これによって、 C_p の効果を分離して議論することができる。図 3.2.3.3-2 に示すように、スケーリング則 ISS04 にトレンドは沿っているが、その改善度は表 3.2.3.3-1 に示すとおりである。縦長断面変形では標準配位に比べて閉じ込めが劣化していることが分かった。このことから、 C_p の依存性については否定的であることが示唆される[12]

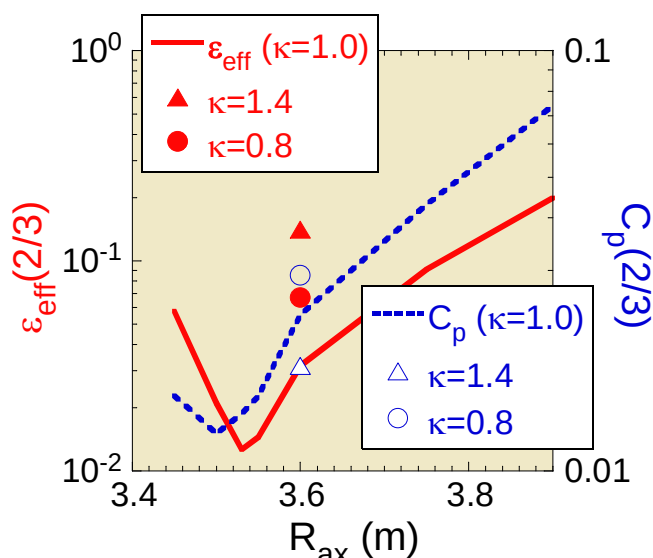


図 3.2.3.3-1 磁気軸位置に対する ϵ_{eff} 、 C_p 依存性

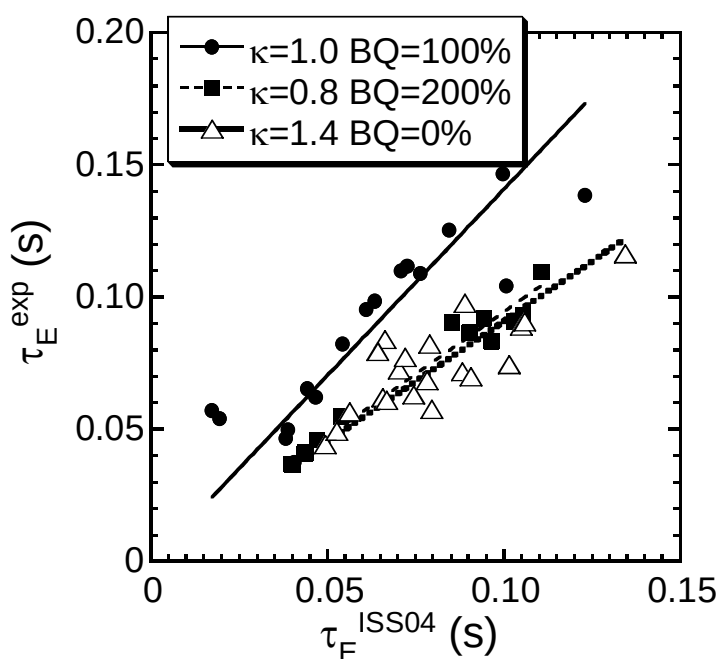


図 3.2.3.3-2 エネルギー閉じ込め時間の比較

表 3.2.3.3-1 閉じ込めの改善度

BQ/ κ	改善度	標準偏差
200/0.8	0.94	0.02
100/1.0	1.41	0.07
0/1.4	0.91	0.03

3.2.3.4 磁気島物理

一般に、よい閉じ込めを実現するためにはきれいに閉じた磁気面が要求され、誤差磁場やMHD揺動などに伴い生成される磁気島は排除すべき対象とされている。そのため、磁気島の能動的制御が重要な課題となっている。LHDには、ローカルアイランドダイバータ配位に供する磁気島生成用に、外部摂動磁場コイルを装備しており、このコイルを活用して静的な真空磁気島を生成し、磁気島物理の研究をおこなっている。LHDにおいて、外部から磁気島を生成できることは、トカマクにはない特徴である。磁気島内に ECH を行なうことにより外部摂動を与えた時の応答特性を明らかにする実験を 2005 年から行っている。(諫山 明彦 日本原子力研究開発機構、稲垣 滋 九州大学) 図 3.2.3.4-1 に示すように、ポロイダルモード数 $m = 2$ 、トロイダルモード数 $n = 1$ の磁気島を対象に、磁気島の O 点、X 点、および両点を同時に ECH により加熱し、それぞれの応答の違いについて調べた。応答の観測手法ならびに磁気島構造の測定として、中心部に変調 ECH (MECH) を入射して電子温度の詳細な変化を ECE により観測し、電子温度分布の上昇および熱パルスの伝搬を測定した (図 3.2.3.4-2)。プラズマ中心部から熱パルスが来ると磁気島を回り込むように伝搬するため、磁気島内部へは遅れて伝搬すると考えられる。その結果、位相分布は「へ」の字型を示す。すなわち、磁気島構造を反映していることを示す。その結果、図 3.2.3.4-3 に示すように磁気島の加熱方式の違いで電子温度の上昇分布に差が見られた。O 点加熱の場合、 $\rho = 0.4-0.5$ (磁気島領域)の温度が局所的に増加した。O+X 点加熱の場合、やや広い分布が観測された。したがって、X 点加熱は広い分布を示すのではないかと推測される。熱パルスの伝搬特性の違いについては磁気島近傍の伝搬特性の変化が観測された[13]。X 点加熱については第 11

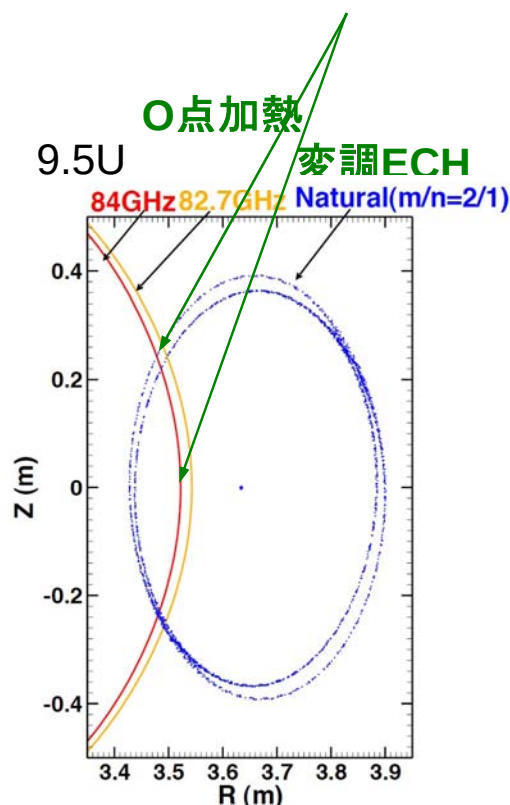


図 3.2.3.4-1 磁気島の幾何学形状と ECH 入射位置

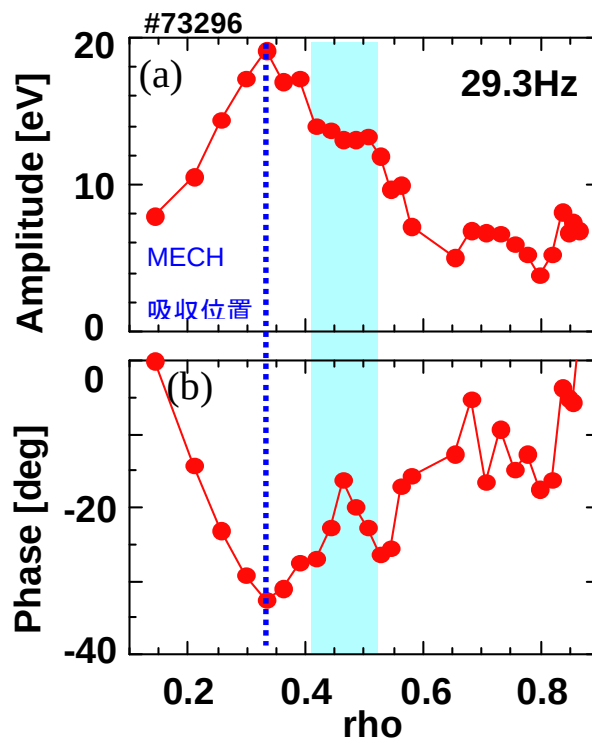


図 3.2.3.4-2 ECE により計測された(a)電子温度分布の上昇、および(b)熱パルスの伝搬。

サイクル（平成 19 年度）において実験を行なう計画であり、これらの結果をまとめて IAEA での発表を視野に入れている。上記以外にも、磁気計測系を用いた磁気島変化（拡大・消失）の観測[14]も行われている。

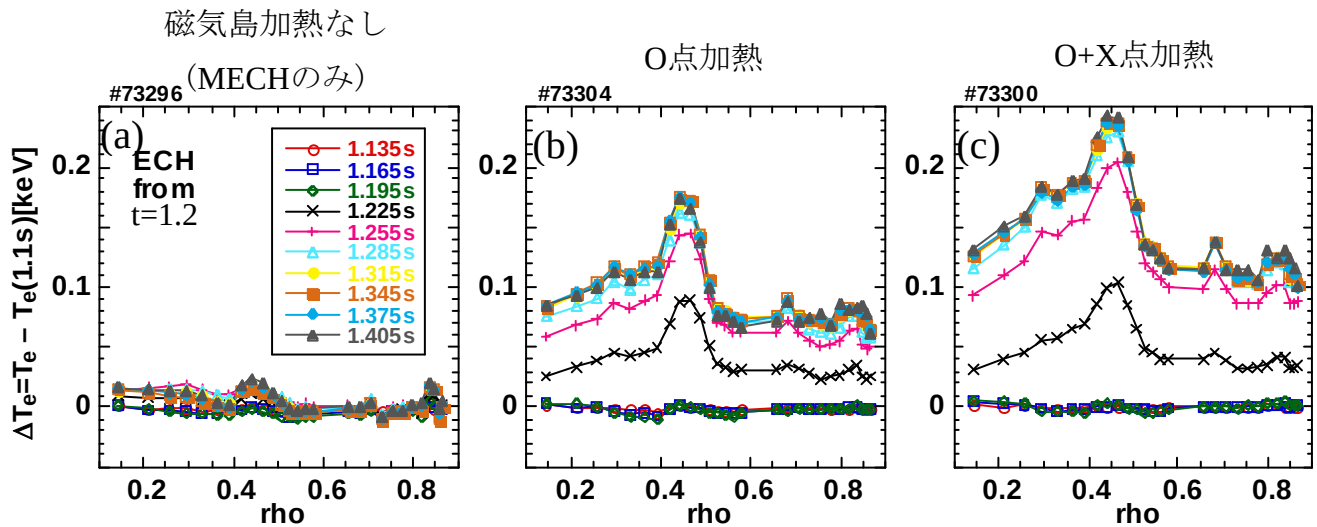


図 3.2.3.4-3 電子温度分布の変化(a)磁気島加熱がない場合、温度の変化は見られない。(b)O 点加熱の場合、局所的な温度上昇が見られる。(c)O+X 点加熱の場合、広い範囲で温度上昇が観測される。

参考文献

- [1] K. Ida, et al. "Measurements of rotational transform due to noninductive toroidal current using motional Stark effect spectroscopy in the Large Helical Device" *Rev. Sci. Instrum.* **76**, (2005) 053505
- [2] K. Ida, et al. "Line Ratios within σ and π Components of $H\alpha$ Lines from High Energy Hydrogen Atom with Motional Stark Effect" *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, **7** (2005) 5-8
- [3] K. Ida, et al. "Characteristics of transport in electron internal transport barrier and in the vicinity of rational surfaces in the Large Helical Device" *Phys. Plasmas* **11** (2004) 2551-2557
- [4] Y. Narushima, et al. "Observation of Minor Collapse of Current-Carrying Plasma in LHD" *Plasma Fusion Research Vol.1*, (2006) 004
- [5] K. Toi, et al. "Formation of Edge Transport Barriers by L-H Transition and Large Reversed Plasma Current on LHD" *Plasma Sci. Technol.* **8** No 1 (January 2006) 5-9
- [6] K.Y. Watanabe, et al. "Change of plasma boundaries due to beta in heliotron plasma with helical divertor configuration" *Plasma Phys. Cont. Fusion* **49** No 5 (May 2007) 605-618
- [7] T. Yamaguchi, et al. "The effect of net toroidal current on the measurement of diamagnetic beta value in heliotron plasma" *Plasma Phys. Cont. Fusion* **48** No 9 (September 2006) L73-L85
- [8] T. Yamaguchi, et al. "Measurement of anisotropic pressure using magnetic measurements in LHD" *Nucl. Fusion* **45** No 11 (November 2005) L33-L36
- [9] F. Watanabe, et al. "Radial structure of edge MHD modes in LHD plasmas with L-H transition" *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** A201-A208 (2006)
- [10] F. Watanabe, et al. "Soft and Ultra-Soft X-ray Detector Array Systems for Measurement of Edge MHD Modes in the Large Helical Device" *Plasma Fusion Research* (2007) To be published
- [11] T. Itoh, et al. *Fusion Engineering and Design* (2007) To be published

- [12] H. Yamada et al. "Configuration effect on energy confinement and local transport in LHD and contribution to the international stellarator database" *Fusion Science and Technology* **46** (2004) 82-90
- [13] A. Isayama, et al. "Observation of localized oscillations at $m/n = 2/1$ rational surface during counter neutral beam injection in the Large Helical Device" *Plasma Phys. Cont. Fusion* **48** No 4 (April 2006) L45-L55
- [14] Y. Narushima, et al. "Magnetic Diagnostics of Magnetic Island in LHD" *Plasma Fusion Research* (2007) To be published

4) 高エネルギー粒子の物理

ヘリカル系においては3次元的な磁場配位のため、ヘリカルリップルの影響を受け粒子軌道は複雑な運動となる場合がある。特に、高エネルギー粒子においては、磁場勾配ドリフト速度が熱速度に比べ相対的に増加し、捕捉粒子の複雑な運動が高エネルギー粒子の拡散や損失に寄与する可能性がある。そのためヘリカル系においては将来のヘリカル型核融合炉を考える上で、高エネルギー粒子閉じ込めに関する詳細な検討が重要となっている。高エネルギー粒子の物理テーマでは、(1)高エネルギー粒子生成の物理機構の解明、(2)高エネルギー粒子閉じ込め性能の評価、(3)高エネルギー粒子に関連する物理機構の解明という3つの観点から実験を行った。(1)に関しては、ICRF第2高調波及び第3高調波加熱による高エネルギーイオンテール生成、ICRF加熱の共鳴面位置依存性・磁場配位依存性、ECHによるイオンテール生成、およびECH/ECCDによる非熱的電子生成等の研究を行った。(2)に関しては、高エネルギーイオンの空間分布計測、垂直ビーム粒子閉じ込めの磁場配位依存性、ビーム発光による高エネルギー粒子分布計測等の研究を行った。(3)に関しては、周辺部損失イオン計測、垂直ビームによるポロイダル回転誘起と電場制御等の研究を行った。以下に抜粋して説明する。

高エネルギー粒子の生成において、高調波ICRF加熱は基本波加熱に比べ高エネルギー粒子を効率的に発生させることができると理論的に予想されている。また高調波ICRF波動の吸収にはラーモア半径のある程度大きな粒子が必要であることから、垂直NBIビーム粒子により高エネルギーテールを増大させることが可能になると考えられていた。第9サイクルにおいて垂直NBIが本格的に実験に導入され、この垂直NBIビームと高調波ICRF加熱による高エネルギー粒子の増加を目指した実験を行った。

図3.2.4-1に示すように垂直ビーム粒子の存在により高エネルギー粒子の大幅な増加を観測することができた。図中の実線はGNETコードを用いたシミュレーション結果である。イオンテールの勾配は変わらないが粒子数は約3倍になるという実験結果とよく一致している。第10サイクルにおいては、より高エネルギー粒子の閉じ込めの良い強磁場条件下での第2高調波加熱を行うために、周波数の高いICRF波動を用いた実験を行った。85MHzのICRF波動を用いて行った実験結果

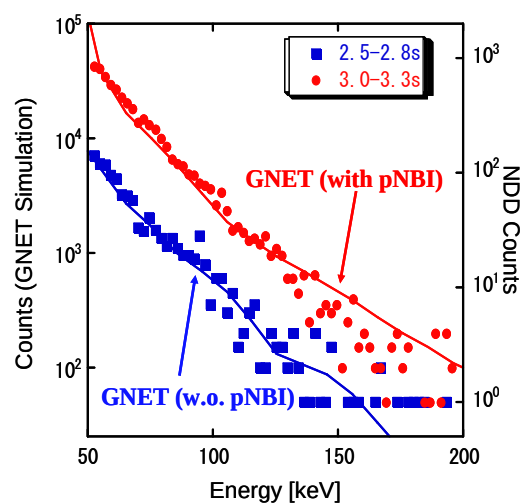


図 3.2.4-1 垂直 NBI と ICRF 波動による高エネルギー粒子スペクトルの違い

を図 3.2.4-2 に示す。通常磁場(2.75T) での第 2 高調波加熱でイオンテールの生成をはじめて確認できた (#70946)。密度が等しく、イオンサイクロトロン共鳴層の位置も同じである 1.25T、38.47MHz の場合 (#61239) と比べ、入射パワーが小さいにもかかわらず同等のテールが生成された。これは高磁場配位により電子温度を高くすることができたことによる衝突緩和時間の増大と強磁場による高エネルギー

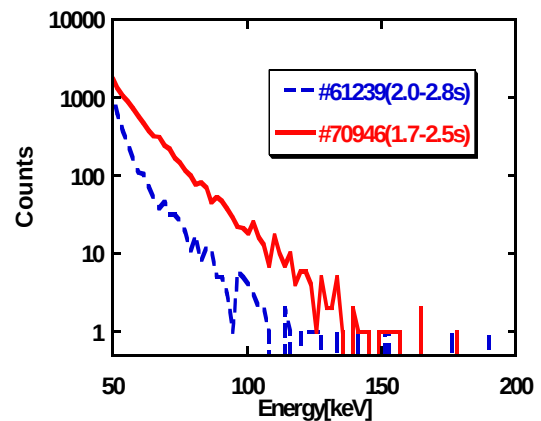


図 3.2.4-2 84MHz(2.75T)と 38.47MHz(1.25T)におけるエネルギースペクトル

ギー粒子の閉じ込め改善が要因であると考えられる。またイオンサイクロトロン共鳴面の位置を変化させ、磁気軸加熱から周辺部の off-axis 加熱へと変化させる実験を行った。共鳴面を外側へシフトさせることにより、共鳴粒子は深いヘリカルリップルに捕捉され、ICRF 加熱により安定な高エネルギー捕捉粒子が生成されることが GNET シミュレーションで予想されており、これを実験で検証した結果、共鳴位置による明らかな分布の違いが観測され、外側共鳴配位においてイオンテールの増加を確認することができた。このように様々な実験配位や加熱方法についての実験データを蓄積することにより、図 3.2.4-3 に示すようにヘリカル炉 FFHR2m1 において予想されるアルファ粒子を外挿できる領域にまで高エネルギー粒子を発生させることができるようになってきている。

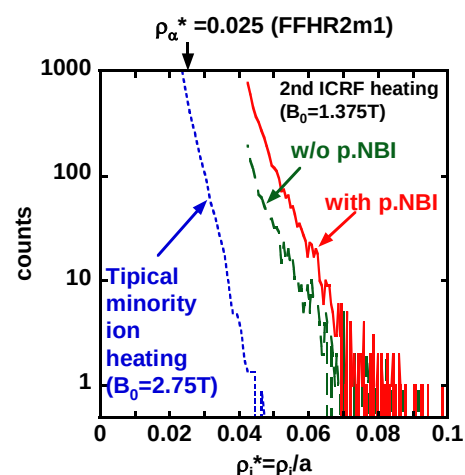


図 3.2.4-3 規格化イオンラーマー半径に対する高エネルギー粒子のカウント数

次に電子サイクロトロン加熱による高エネルギー粒子の生成について、ECCD モード加熱による高エネルギー電子の生成実験とイオンテール発生実験について述べる。ECH を用いた電子加熱時に斜め入射 (ECCD モード) で電磁波を入射すると 100keV を超える高エネルギー

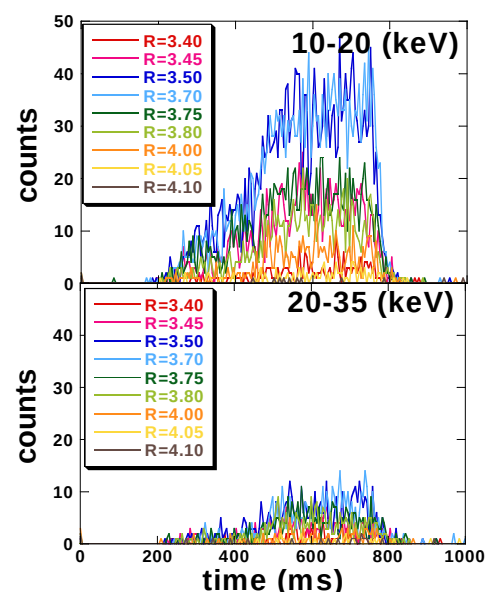


図 3.2.4-4 ECCD モード入射($t=0.45s$)時の Si-PHA 各空間位置における HX 信号強度の時間変化 (右図)

一電子が発生し、またプラズマ電流にも変化が生じることを第9サイクルにおいて発見した。これは有限の $N \parallel$ をつけて波動を入射したことにより主に高エネルギー電子が波動エネルギーを吸収し電流駆動に寄与していると考えられる。従って発生した高エネルギー電子の情報は電流駆動の一つの指標になる。第10サイクルでは、ECCDを担っている電子のエネルギー領域とデポジション（電流分布）の同定を目指した実験を行った。ECHパワーを順次入射し $t=0.45\text{s}$ より ECCD モードでパワーを重畳した。ECCD モードの入射後、特に中心付近の高エネルギー電子輻射による ECE 信号強度が増加し、同時にプラズマ電流が理論的に予想される方向へと反転して流れ始める様子が観測された。Si-PHA による高エネルギー電子の空間分布計測の結果、磁気軸中心付近で強く発生していることがわかった(図 3.2.4-4)。現在、ヘリカル系における ECCD 駆動機構の物理において高エネルギー電子の存在およびこれが熱／粒子輸送に与える影響などについて研究を進めている。

ECH/ECCD 加熱プラズマにおいて、ある条件下ではバルクの数倍のテール温度を持つ高エネルギーイオンが複数のトカマク・ヘリカル装置において観測されている。このイオンテールの発生メカニズムを解明しようという研究を第9サイクルより開始した。この現象の物理機構としては、(1)入射 EC 波のモードコンバージョンによる LH 波励起および(2)電子の分布関数の歪みによる波動励起によるイオン加速などが考えられている。第9サイクルでの実験結果から、低密度 ECH プラズマに EC 波を入射することにより中性粒子束に 10keV 以上のテール成分を観測することができたが、中性粒子束の測定エネルギー領域の設定($>10\text{keV}$)が高く、バルクとテールの分離が上手くできなかった。第10サイクルではバルクも含めたイオンのエネルギー分布測定が可能なように計測器を設定し合わせて ICRF アンテナを用いた高周波揺動計測も整備して実験を行った。図 3.2.4-5 に CNPA による CX 粒子束のエネルギースペクトルを示す。この時 0.3s から 0.6s へと時間の経過とともに密度は低下している。エネルギーが 10keV 以下では密度に関係なく換算温度で 1.6keV であったのに対し、 $10\text{--}20\text{keV}$ では、密度の低下とともに傾きが変化している様子が観測された。また ECH のパワーモジュレーションに伴う CX 束の変化も観測されている。この実験時には観測されなかったが ECH 入射に伴う LH 波動の発生も報告されており、この現象の物理的描像の解明を目指して研究を進めている。

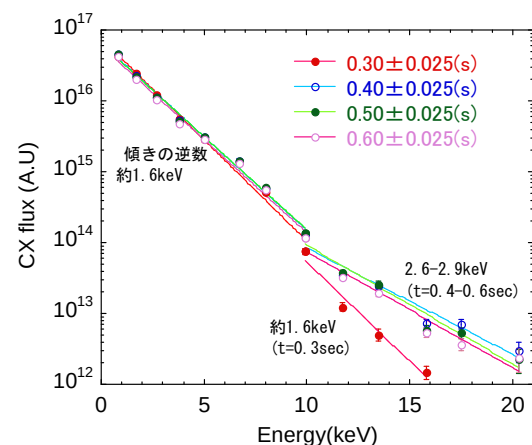


図 3.2.4-5 ECH 入射時の CX 束のエネルギースペクトル

生成された高エネルギー粒子の閉じ込めを評価するためには、プラズマ内部における高エネルギー粒子の情報を手に入れる必要がある。第8サイクルより開始された荷電交換中性粒子計測(PCX:Pellte Charge eXchange)はペレット溶発雲による能動的な高エネルギー粒子の空間分布計測

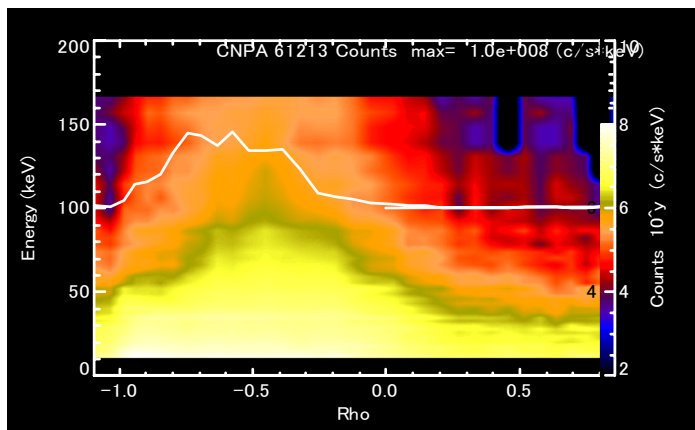


図 3.2.4-6 PCX による高エネルギー粒子の空間分布

である。図 3.2.4-6 に ICH 第 2 高調波サドル点加熱時における高エネルギー粒子の空間分布を示す。 $\rho=0.5$ 付近で粒子束が増加していることがわかる。これはシミュレーションによるテール成分がこの領域で強く励起されるという結果とよく一致する。さらにいくつかの新しい計測器が導入された。第9サイクルでは高エネルギー粒子の速度空間分布を計測できる Position Sensitive Detector (PSD)が稼働した。垂直入射 NBI ビーム粒子の速度空間分布の計測結果では、粒子軌道の影響から磁気軸を外側シフトすることによりビーム粒子の閉じ込めが劣化することが明らかになった。

第 10 サイクルにおいて、ビーム発光による高エネルギー分布計測の実証実験を行った。この手法は垂直入射中性粒子ビームに入射方向とは垂直に CX 分光器の視線をとることにより計測を行う。高エネルギーのイオンから発せられた $H\alpha$ 光は大きなドップラーシフトを持つのに対し、バルクプラズマからの $H\alpha$ 光はドップラーシフトがないので、スペクトル分光することにより高エネルギーイオンからの $H\alpha$ 光の強度分布を、その波長分布からエネルギー分布を計測することができる。分光器で得られスペクトルを図 3.2.4-7 に示す。ビーム速度によりバルマー α 光が青方偏移している様子が観測された。40keV ビームの変移は約 6nm と予想され、得られたデータはビーム成分であることが確かめられた。また、視線を変更することによりプラズマ内部の分布が得られていることが分かる。

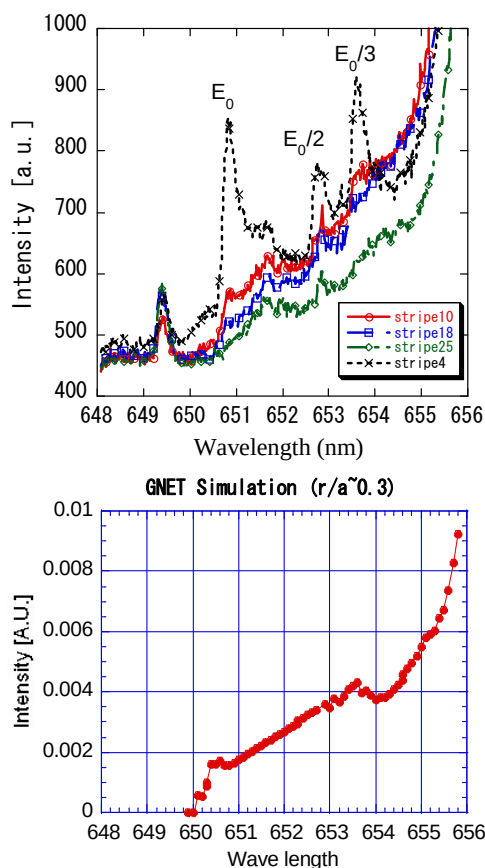


図 3.2.4-7 荷電交換スペクトル (上)、GNET コードシミュレーション(下)

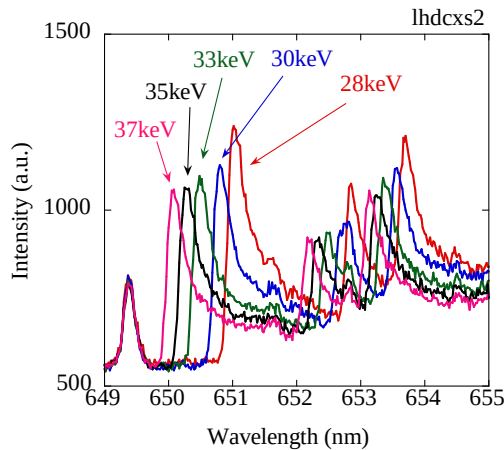


図 3.2.4-8 異なるビームエネルギーにおけるプラズマ周辺部の荷電交換スペクトル

高エネルギー粒子に関連する物理現象として、プラズマ中の MHD 不安定性によって輸送される高エネルギー粒子の研究を行っている。図 3.2.4-9(e)に示すのは TAE バースト発生時における高エネルギー粒子のエネルギースペクトルの時間変化である。TAE バーストに伴って中性粒子束に凹みと突起(hole-clump)が発生し、これらの減衰時間から TAE ギャップが存在している領域でこの粒子輸送が発生し、またこの TAE ギャップに存在する 2つの周波数のモードの中で高い周波数成分によってこの高エネルギー粒子の輸送が駆動されていることなどを明らかにした[1]。

また、このような物理現象の解明に寄与するための新しい計測器として損失イオンプローブが設置された。これはプラズマ周辺部において損失してくる粒子を直接捕集し、その粒子の持つピッチ角とジャイロ半径を計測することができる。図 3.2.4-10 は接線 NBI 入射時に捕集された損失粒子のイメージ図である。ピッチ角約 130° でジャイロ半径 3-10cm であり、接線ビームのエネルギーとよく一致している。

ビームエネルギーを変化させた時の周辺計測チャンネルのスペクトルの変化を図 3.2.4-8 に示した。入射エネルギーの変化と共にスペクトルも変化していることがわかる。スペクトル強度のシミュレーションを GNET コードにより得られた速度空間分布を用いて行った結果を図 3.2.4-7 下図に示した。上図の赤い測定結果と同じ位置でのシミュレーション結果である。非常に良く対応した結果が得られた。

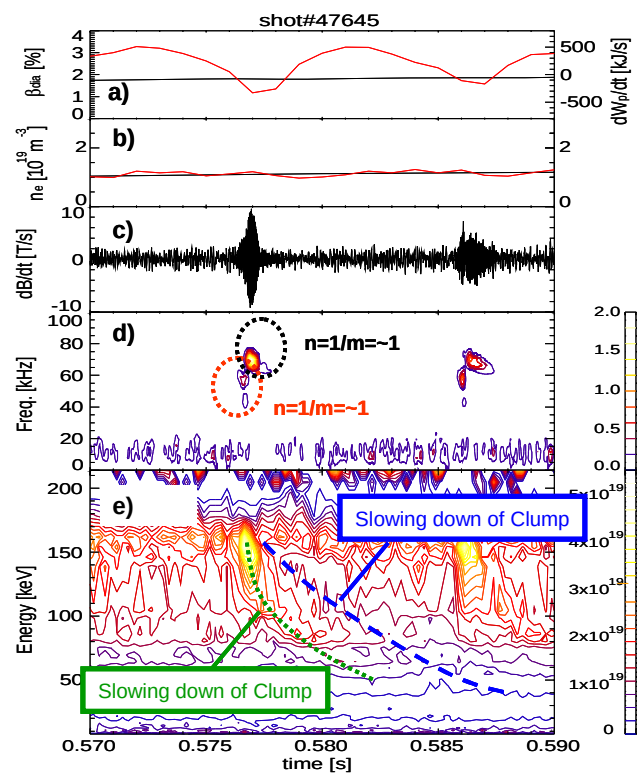


図 3.2.4-9 TAE バースト発生時の典型的なプラズマ緒量の時間応答。(a)プラズマベータ(b)電子密度(c)磁場揺動(d)磁場揺動の周波数スペクトル(e)NPA によるエネルギースペクトル

プラズマ中でTAEバーストが発生した時、それに同期して高エネルギー粒子の損失が発生していることなどの観測結果が得られている。

- [1] M.Osakabe, et.al., "Experimental observations of enhanced radial transport of Energetic Particles with Alfvén Eigen mode on LHD", Nuclear Fusion, **46**, S911(2006).

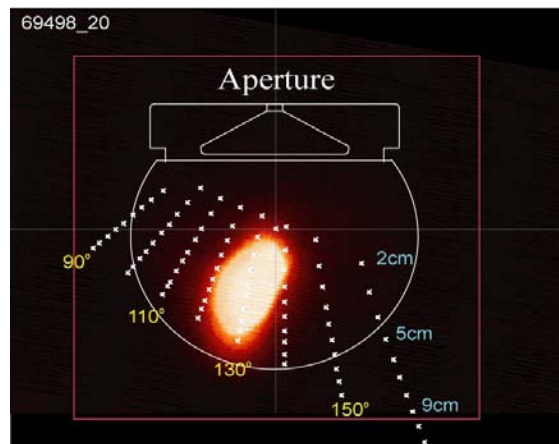


図 3.2.4-10 接線 NBI 入射時の損失粒子

5) 波動加熱物理

電子サイクロトロン加熱実験

LHDでは電子サイクロトロン加熱(ECH)/電流駆動(ECCD)のために、82.7 GHz, 84GHz, 168GHzの電子サイクロトロン波(EC波)が用いられている。近年LHDでは84GHzの遮断密度の10倍を超えるような高密度プラズマが生成されるようになり、伝播に密度限界のない電子バーンシュタイン波(EBW)によるECH/ ECCDが重要な研究テーマとなってきている。LHDにおけるEBW加熱については共同研究による検討が進められてきた経緯があり、波動加熱物理テーマにおいて第8サイクルより継続して実験が行なわれている。(長崎百伸准教授: 京都大学エネルギー理工学研究所、前川孝教授・田中仁准教授: 京都大学エネルギー科学研究科) LHDにおいてEBWを励起する方法は2種類存在する。一つはプラズマ遮断層と左手サイクロトロン遮断層が一致するように適切な角度で弱磁場側より正常波(O)モードを入射することで、プラズマ内部でOモードを異常波(X)モードに変換し、これを高域混成共鳴(UHR)層に到達させてEBW(B)を励起する方法である。図3.2.5-1, 3.2.5-2に示すように、下部(L)ポートよりトロイダル方向成分をつけた入射方向設定で高いOXBモード変換効率が得られる。第9サイクルでは中心電子密度が $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ とカットオフ密度をわずかに超えるプラズマにおいて、放電ショット毎に入射方向を変えOXBモード変換が起こる入射方向設定を実験的に探索した[1]。この実験ではスニファープローブで計測した漏洩波強度を参照しながら入射方向探索を行なった。2-Oポートでの漏洩波強度が最も弱くなる入射方向設定でOモードを入射した放電の第2高調波周波数帯の電子サイクロトロン放射(ECE)信号を解析したところ、図3.2.5-3, 3.2.5-4に示すように、プラズマ中心部の電子温度上昇を示唆する結果が得られた(H.P.Laqua氏: IPP Greifswald)。第2高調波

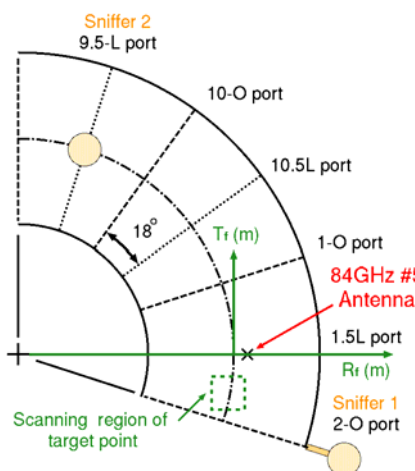


図 3.2.5-1 : トーラス上側から見た入射アンテナ、入射方向設定面(target plane)、スニファープローブの位置関係

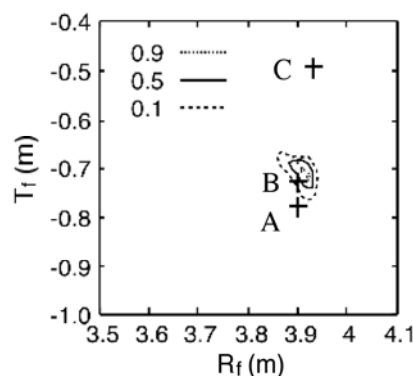


図 3.2.5-2 : 入射設定平面上にプロットし OXB モード変換効率の等高線図。磁場配位 (R_{ax} , B_{ax} , g , Bq) = (3.6m, 2.75T, 1.254, 100%) の場合の検討結果。実験での入射方向設定を A, B, C で示す。

ECEが不可能な超高密度プラズマでは入射方向探索において、漏洩波計測の重要性はさらに増すものと考えられる。EBWを励起するもう一つの方法はECR層より強磁場側から基本共鳴周波数帯の

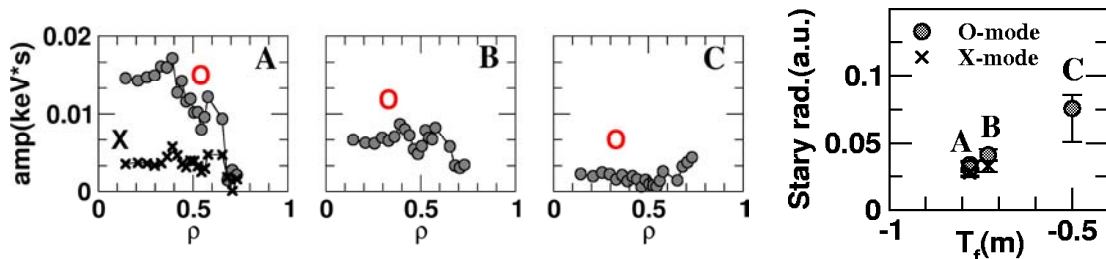


図 3.2.5-3: EC 波を 47Hz, 100%パワー変調入射し、入射方向を左図 A, B, C に示すように変えた際の ECE 信号の 47Hz 摂動振幅分布。A 図には、O モード入射の場合(O)、X モード入射の場合(X)をそれぞれ示す。

図 3.2.5-4: 各入射方向設定による漏洩波強度の変化。入射方向設定 T_f を横軸に取った。

Xモードを直接UHR層に向かってEC波を入射する方法である。第8サイクルでは遮断密度以下のプラズマではあるが、この方法でXモード入射を行なった際にECR層より弱磁場側で局所的なパワー吸収が観測された[2]。しかし、LHDで可能な入射設定は入射波の進行方向に磁場に対して平行な成分があるため、加熱がXモードの吸収によるものか、EBWの吸収によるものかを判断する手段が必要となる。実際第9, 10サイクルでは2カ所でパワー吸収がおきていることを示唆する実験結果が得られている。上記のいずれのEBW励起の手法でも、XモードがUHR層に到達した際にはパラメトリック崩壊波が励起される。これを計測してEBW励起の条件が成立しているかを確かめるため、第11サイクルで崩壊波計測の実験提案がなされ計測システムが立ち上げられている。(田中仁 准教授: 京都大学エネルギー科学研究科)

高密度、低磁場のプラズマのECHのシナリオとしては第3高調波周波数帯のXモードのEC波による加熱がある。これまでにLHDでは中心磁場強度2Tの配位において168GHzでの第3高調波加熱が実証されていたが、第9サイクルで84GHz系統のパワーが増強された後、第10サイクルでは中心磁場強度1T、磁気軸3.75mの配位を選択して82.7GHz, 84GHzによる第3高調波加熱が試みられた[1]。84GHz, 82.7GHzの順に合計1.3MWのEC波を磁場に対してほぼ垂直方向に磁気軸近傍のECR層に向けて入射したところ、中心電子密度は $0.67 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ と低密度、中心電子温度は約1keVと低電子温度ではあるが、図3.5.5-5, 図3.5.5-6に示すように蓄積エネルギー W_p と電子温度の上昇が観測された。 W_p の時間変化より見積もった82.7 GHz系統の吸収効率は最大で20%であった。一方Ray-tracingにより数値的に見積られた吸収効率は約50%であった。この違いの原因としては、温度密度分布のわずかな違いが大きな吸収効率の違いになるようなターゲットプラズマであったことが考えられる。この実験結果については、“TRAVIS” Ray-racing codeと現在LHDで用いられているRay-tracing codeとの解析結果の比較が行なわれている。(N.B. Marushchenko氏、Yu. Turkin氏: IPP Greifswald)

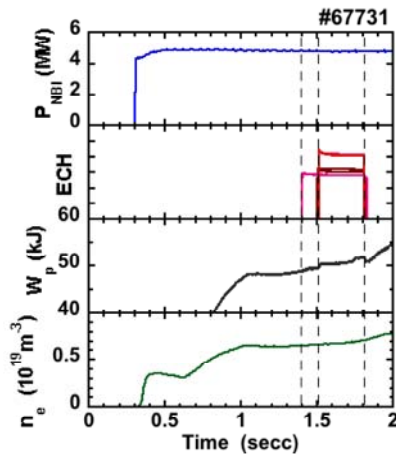


図 3.2.5-5: 上から NBI パワー、ECH パルス、蓄積エネルギー、線平均電子密度の時間変化

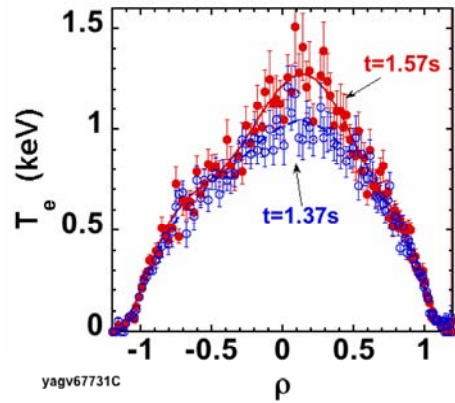


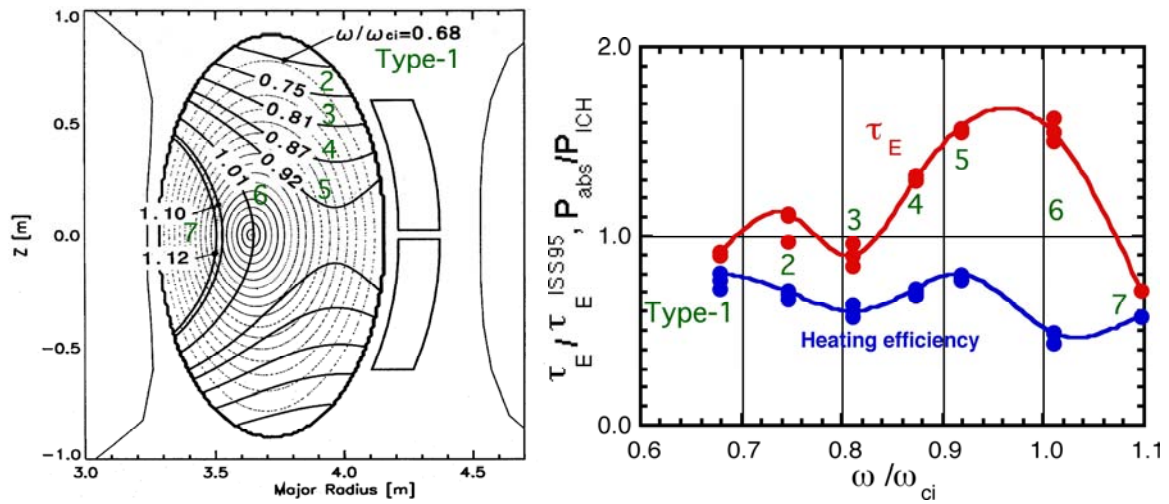
図 3.2.5-6: トムソン散乱計測により得られた温度分布の時間変化。EC 波入射前(1.37s,)、入射後(1.57s)。

EC 波による電流駆動も重要な実験テーマである。ヘリカル系において ECCD はブートストラップ電流の打ち消し、磁気シア制御による閉じ込め状態の改善、MHD 不安定性の抑制などの役割を期待されている。第8サイクルから第11サイクルにかけて、高磁場配位、低磁場配位ともに ECCD 実験が試みられ、概ね Fish- Boozer 理論で予測される方向に 3 kA 程度の電流駆動が観測されている。第 10 サイクルでは磁気軸 3.75m, 中心磁場強度 1.45T の配位で MSE 計測を初めて実施し、ECCD 時の回転変換分布の変化を示唆する観測結果が得られている。

ICRF 加熱を用いた実験

イオンサイクロトロン周波数帯 (Ion cyclotron range of frequencies; ICRF) を用いた加熱では、深く波動加熱物理を理解しプラズマの高性能化及び加熱手法の確立を目的として幾つかの加熱機構について研究を行っている。イオン加熱の手法として少数イオン加熱機構の研究が行われた。図 3. 2. 5-7 に示す様に、磁場及び波動周波数を変化させ、水素のイオンサイクロトロン共鳴層の位置をスキャンさせて、エネルギー閉じ込め時間及び加熱効率を調べた。図 3. 2. 5-7 はその結果である。共鳴層の位置に対して、type-1 から 7 までラベルを付けているが、エネルギー閉じ込め (赤丸) は type-5 及び 6 において最大となっている。どちらの場合も最適な条件では ISS95 スケーリングの約 1.6 倍となっており、NBI 加熱プラズマに匹敵するエネルギー閉じ込め特性を示している。一方、加熱効率は type-5 において最大となっている (青丸)。これらの実験結果から、エネルギー閉じ込めが良好でかつ加熱効率の良い type-5 の配位を ICRF 加熱による標準とすることとした。このときの条件は、

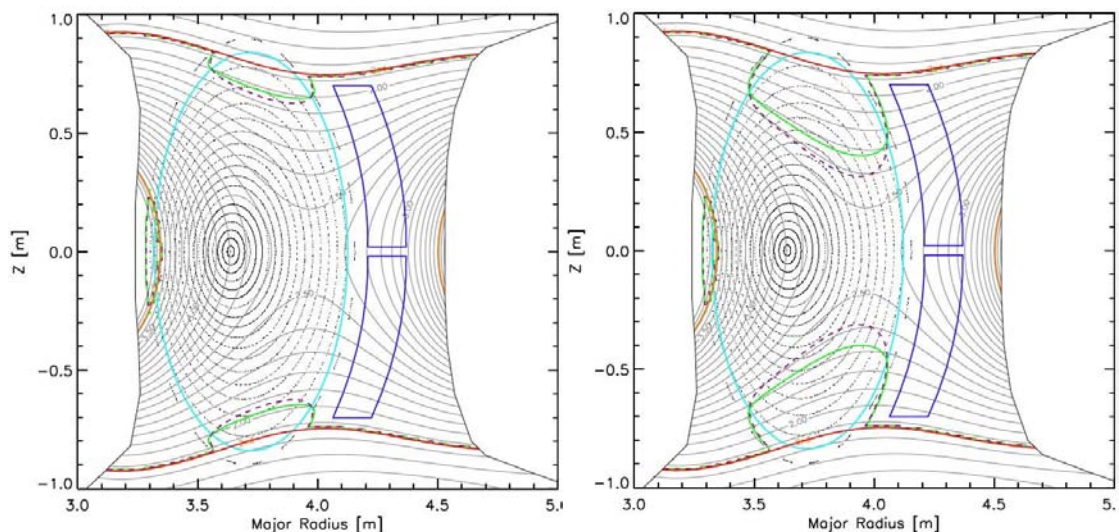
図3. 2. 5-7 少数イオン加熱でのイオンサイクロトロン共鳴層（左図）と
エネルギー閉じ込め時間及び加熱効率（右図）



磁場強度が 2.75T、波動周波数は 38.47MHz、少数イオンとして軽水素が存在するヘリウムプラズマである。高速中性粒子計測等による高エネルギーイオン測定により、イオンが加速されていることが確認され、長時間粒子を溜め込んだ測定では 2.5MeV を越える様な粒子まで観測されており、少数イオン加熱の有効性と、LHD の高エネルギーイオン閉じ込めの性能の良さを実証している。

他の加熱機構として、モード変換加熱の研究を行っている。ICRF 波動によるモード変換加熱は、アンテナから発射された速波が二種イオン混成共鳴層（モード変換層）でイオンバーンシュタイン波にモード変換し、ランダウ減衰等で電子に吸収されることを期待した加熱方法である。従って、ICRF 加熱で標準的に用いられている

図3. 2. 5-8 水素イオン比が 30%（左図）と 60%（右図）の場合の
イオンサイクロトロン共鳴層とモード変換層

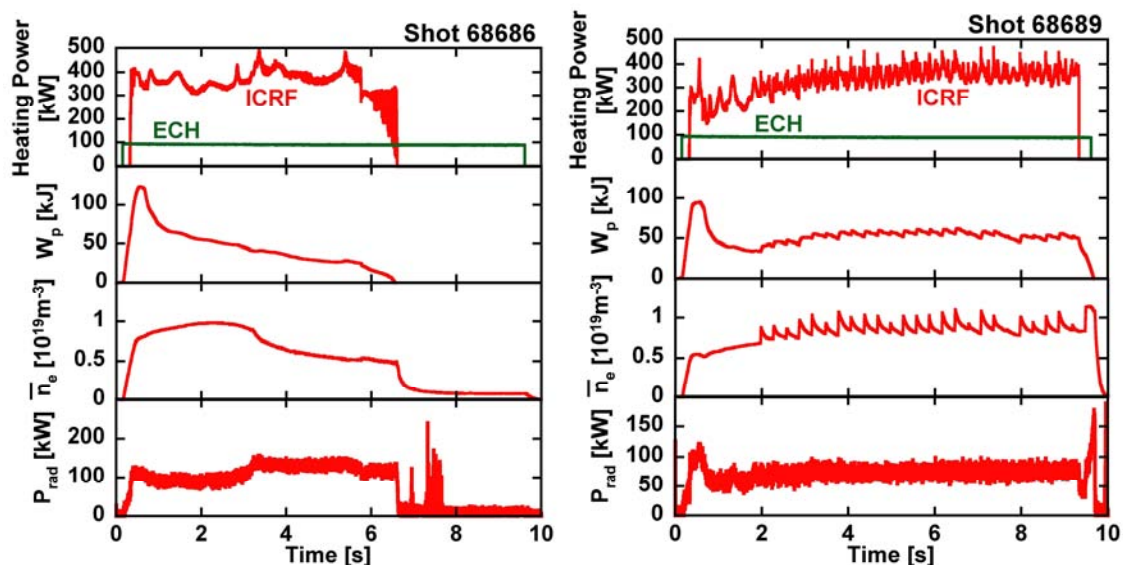


少数イオン加熱がイオンを加熱するのとは異なり、電子加熱が期待される。図 3. 2. 5-8 に、水素イオン比の異なる二つの場合のイオンサイクロトロン共鳴層及びモード変換層の位置を示す。プラズマは水素とヘリウムの混合ガスを用いている。波動周波数は 28.4MHz、磁場強度は 2.75T である。モード変換層（紫色波線）は水素イオン比により位置が変化することが分かる。

この加熱モードの有効性を実証するため、手始めに 10 秒までの短パルスでプラズマ維持実験を行った。図 3. 2. 5-9 は、水素イオン比が異なる場合においてプラズマパラメータの時間変化を比べたものである。モード変換層の位置は水素イオン比によって変化するため加熱位置の違いを比較した実験になっていると考えられる。水素イオン比が低い時、蓄積エネルギーは ICRF 電力の入射中減少し続け、放射損失電力は大きく、プラズマは加熱中に維持されていない。電子温度分布はモード変換層が位置すると思われる周辺部にピークが有り、中心部は極端に低い値となっている。一方、連続水素ペレット入射によりプラズマ放電中に水素を供給し続け、水素イオン比を高目に保った場合には、プラズマは ICRF 電力を入射している間維持されている。密度、温度ともほぼ一定の値で推移し、放射損失電力は、ほぼ同じ加熱電力が入射されているものの逓減している。電子温度分布は、ピークの位置が中心方向に移り、中心部の温度の下がりも 2 割程度に収まっている。高速中性粒子のエネルギースペクトルを Si-FNA により測定すると、少数イオン加熱では同様な加熱電力で 100keV 以上の高エネルギーイオンテイルが観測されるのに比べ、モード変換加熱によりプラズマが維持されている場合、イオンテイルの生成は殆ど見られなかった。

これら短パルスでの実験を経て、モード変換加熱の定常実験への応用が試みられた。

図 3. 2. 5-9 水素イオン比の低い場合（左図）と高い場合（右図）の
プラズマパラメータの時間変化



これまでのところ1分以上のプラズマ放電を維持することに成功している。今後、水素イオン比及び密度の最適化あるいはプラズマ負荷抵抗が低いと言う問題点、また定常実験から得られる知見等も合わせて、更に加熱機構の解明及び加熱の高効率化を進めて行く必要がある。

I C R F加熱を用いた実験では、この他に第二高調波加熱、高次高調波加熱等の実験を行ってきた。第二高調波加熱実験では、LHDプラズマでのこの加熱モードの有効性を示し、イオンテイルの効率的な生成とこの加熱モードでのプラズマ単独維持に成功した。また、高エネルギーイオン計測と連携して、内寄せ配位でのバルクプラズマの閉じ込め特性とは異なる高エネルギーイオンの振舞を観測した。高次高調波加熱実験では、理論から予測される電子加熱を、限定的な実験条件ながら観測することができた。詳細な実験結果の解析と実験条件の最適化を行い、物理機構の理解を深め加熱の高効率化を図って行く必要がある。

参考文献

- [1] H.Igami et al., “*Searching for O-X-B mode-conversion window with monitoring of stray microwave radiation in LHD*” Review of Scientific Instruments, **77-10**, (2006) 10E93-1
- [2] H.Igami et al., “*First Observation of ECH by Electron Bernstein Waves Excited via X-B mode Conversion Process in LHD*” Plasma and Fusion Research, **1**, (2006) 052-1
- [3] T. Shimozuma et al., “*Efficient heating at the third harmonic Electron Cyclotron Resonance in the Large Helical Device*” (to be submitted to Plasma and Fusion Research)

6) 電場と閉じ込め

プラズマ中の電場は、ローレンツ力によってプラズマ中の流れの駆動力となる。プラズマ中の流れは、プラズマ中の乱流、およびそれによって引き起こされる輸送に影響を与える。トカマク装置(DIII-D)において、閉じ込め改善モード(H-mode)が発見され、それに伴って形成される大きな径方向の電場に感心が集まった。電場が閉じ込めに与える影響について、また電場と揺動の関係を調べるための基礎実験が多数行われた。プローブなどを用いた揺動の詳細計測が困難である高温の磁場閉じ込め装置においては、荷電交換分光計測(CXS)、重イオンビームプローブ(HIBP)、ビーム発光分光計測(BES)といった電場および揺動計測手法の進展とともに、電場と揺動の研究が行われるようになった。LHDおよびCHSにおいては、電子の内部熱輸送障壁(電子ITB)が観測され、その内部に強い正電場が形成されていることがCXSやHIBPによって観測された[1,2]。さらに理論の進展とともに帯状流が注目され、重イオンビームによって電場揺動(帯状流)と密度揺動の相互相関の研究が行われるようになってきた[3-6]。このような背景のもと、第6サイクルと第7サイクルに「電場と閉じ込め」というテーマでの研究が進められた。

「電場と閉じ込め」では、以下のテーマが提案され実験が行われた。

- (1) CXSによる電場計測を用いた電場制御
- (2) CO₂レーザーを用いた揺動計測(2次元位相コントラスト干渉計)
- (3) 電子系内部輸送障壁(電子ITB)形成と電場構造との関連
- (4) 重イオンビームプローブ(HIBP)の試験実験
- (5) ペレット(TESPEL)を用いた非局所輸送の発現領域とその機構解明

平成16年度(2004年)(第8サイクル)

磁気島近傍での電場シア形成

これまでの実験でLHDにおけるプラズマ中の電場は、新古典輸送から理論的に予測されるものと定性的に一致することが分かってきた。すなわち、ヘリカルリップルの大きさと衝突周波数によってイオンおよび電子の新古典輸送による粒子束 $\square_i$ および $\square_e$ がすりあうように電場が決定される。その結果、密度を下げる、または電子温度を高くすると正電場が形成され、密度を上げる、イオン温度を高くすると負電場が形成される。一方、磁気島が存在すると磁気島内部の電場は零になることも実験的に調べられている。この二つの性質を用いることで負電場での電場シアを形成することを試みた。

LHDには磁気島を外部から制御することができるLIDコイル(Local Island

Diverter Coil) がある．それを用いて磁気島を形成し，そこへ水素ペレットを入射することによって密度を上昇させた．図 3. 2. 6-1 に磁気島がある場合とない場合での電場分布を示す．ペレットによって密度が上昇することで負電場が形成されるが，磁気島がある場合ではより内側まで負電場が形成され，また磁気島があることによってそこでの電場が零になる．この方法によって，磁気島境界に強い電場シアを形成できることが分かった．図 3. 2. 6-2 に単一入射(Single Injection), 複数入射 (Multi Injection, 3 発), 連続入射(Repetitive Injection, 6 発)入射したときの電場の時間発展を示す．この電場構造は単一のペレット入射では一時的に形成されるだけであるが，複数のペレットを連続で入射することにより，ペレット入射が終わっても維持することができた．このようにヘリカルプラズマ中における電場シアを積極的に制御する手法が試みられた．

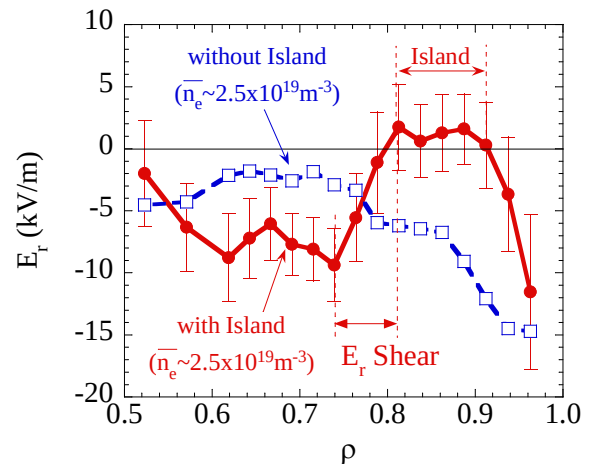


図3. 2. 6-1: 磁気島のあり，なしによる電場分布の変化．

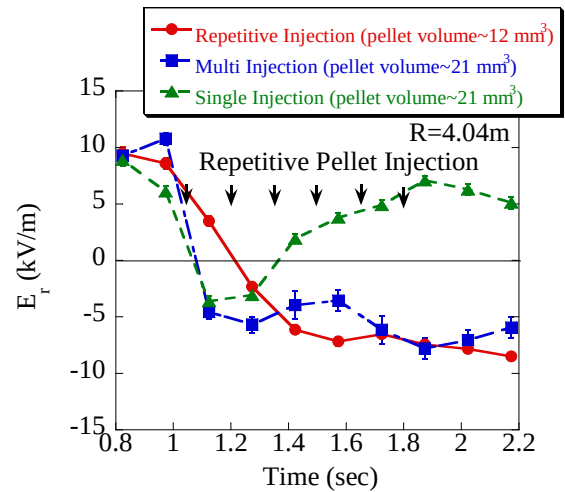


図3. 2. 6-2: ペレット入射にともなう電場の時間変化．

揺動の空間分布計測 (CO2 レーザーを用いた 2 次元位相コントラスト干渉計)

プラズマ中心付近を通過する CO2 レーザービームにより，主にポロイダル方向の波数成分を計測するシステムが開発・整備され，データ取得が始まった．ビーム経路に沿って磁力線の向きが変化している（磁力線のシア）を利用することにより揺動の空間分布を計測することができる．計測された揺動の空間構造の例を図 3. 2. 6-3 (下) に示す．実験室系からみた揺動の位相速度をパラメータとして揺動のスペクトル強度等高線を示した．色が濃くなるにつれて，揺動強度が大きくなることを示している．横軸で負の ρ は，計測ポロイダル断面（ほぼ縦長）におけるビーム経路に沿った下側(bottom)、正の ρ は上側(top)を意味している．上（下）側領域の正（負）の位相速度は電子反磁性方向を，これと反対はイオン反磁性方向に対応している．緑線は，計算された新古典両極性電場の値からも止まるポロイダル回転速度、青線は、この回転速度から反磁性ドリフト速度を差し引いた速度を表している．図 3. 2. 6-

3（上）にこのときの密度分布を示す。密度分布がホローとなっている $\rho < 0.9$ の領域では緑線とほぼ一致した位相速度を持つ揺動が存在し、一方、密度勾配が負になっている $\rho > 0.9$ ではプラズマ系においてイオンの反磁性方向に回転している揺動が存在することが計測された。PCI 計測の初期的なデータが得られるようになった。

電子系内部輸送障壁（電子 ITB）形成と電場構造との関連

LHD では、かねてより電子 ITB が種々の条件下で形成されてきた。ヘリカル系特有の電子 ITB 形成機構として、正電場（電子ルート）形成が理論予測されているところであるが、中心部における電場計測は CXS での計測制度の問題から困難であった。しかし、種々の磁場配位（異なる磁気軸位置の配位）において、電子 ITB プラズマの径電場分布を測定し、新古典論と比較することは、電子ルートによる閉じ込め改善、ヘリカル系特有の ITB 形成機構の実験検証の観点から重要な課題である。

CXS による電場分布計測容易にするため、磁気軸位置 $R_{ax}=3.9\text{m}$ の磁場配位を選択し、磁場強度を 1.49T で行い ECH の第 2 高調波による中心加熱を行った。このとき ECH 焦点位置は $r=0.1$ (84GHz) 及び 0.35 (82.7GHz) 近辺である。本サイクルで

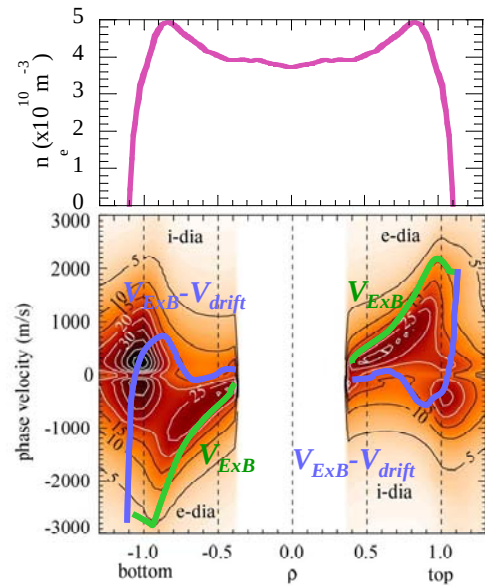


図3. 2. 6-3: 電子密度分布（上）と PCI によって計測された揺動の分布（下）。

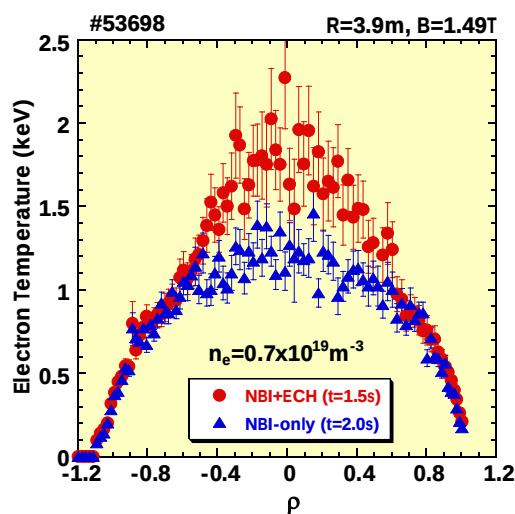


図3. 2. 6-4: ECH 重畳した場合としない場合での電子温度分布。

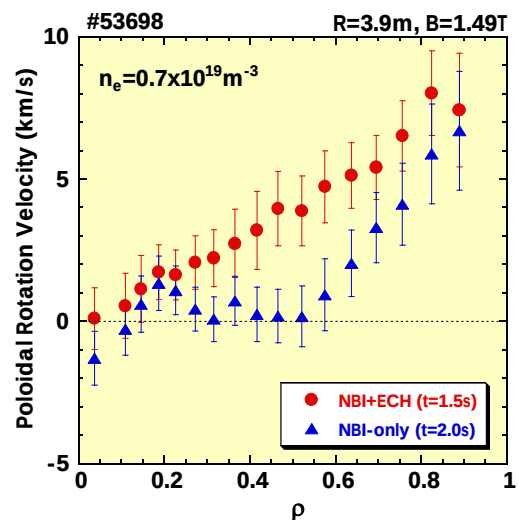


図3. 2. 6-5: ECH 重畳した場合としない場合でのポロイダル回転速度分布。正のポロイダル回転は、正電場が形成されていることを示す。

の CXS は完全電離ネオン(NeX)からの荷電交換発光を用いたため、Ne ガスパフによって密度調整を行った。図 3. 2. 6-4 に電子密度 $n_e=0.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ での ECH ありなしでの電子温度分布を示す。ECH を重畳したことによって中心での電子温度の上昇が観測される。このように NBI+ECH による電子 ITB の形成を確認できた。このとき CXS によって計測された電場を図 3. 2. 6-5 に示す。ECH 重畳による電子 ITB の形成にともなって、明確な正の電場が形成されていることが観測された。わずかではあるがイオン温度の上昇も観測された。

重イオンビームプローブ (HIBP) の試験実験

HIBP システム立ち上げのための試験実験を行った。この実験を通して、ビーム検出、ポテンシャル計測の可能性の評価を行った。軌道計算などの評価によると、2 次ビーム電流は nA 以下となり、これまでの HIBP で用いられてきた単純なスプリットプレートでは検出できない可能性が指摘されていた。そこでビーム電流を増幅するためにマイクロチャンネルプレート(MCP)を検出プレートの前に導入した。さらにビームライン機器およびイオン源の改良を行った結果、ビーム入射の効率が大きく改善した。その結果、プラズマからの 2 次ビームの検出に初めて成功した。その大きさから、ポテンシャル分布計測は可能であると判断できた。

ペレット (TESPEL) を用いた非局所輸送の発現領域とその機構解明

TESPEL を用いた能動的な非局所輸送のデータ蓄積を主眼としてこれまでと異なる磁気軸位置での実験を行った。Rax=3.5m での実験に対し、ここでは磁気軸位置 Rax=3.6m での実験を行った。この磁気軸位置においても非局所熱輸送を示唆している周辺冷却に対する中心電子温度の増加現象を確認できた。Rax=3.6m の配位では、Rax=3.5m の場合と比較して、中心での電子温度上昇量は少ないが上昇した電子温度が長い時間維持されていた。上昇に要する時間にも、Rax=3.6m の場合のほうが長いという違いが観測されている。このように中心温度の上昇傾向は磁気軸の違いにより異なることが観測された。ヘリカル系における非局所輸送特性の解明・理解のためのデータの蓄積が進んだ。

平成 17 年度 (2005 年) (第 9 サイクル) 磁気島境界での電場シアとイオンの熱輸送 磁気島近傍での電場シア形成

電場シア形成に伴う、イオン輸送の変化に着目して解析が進んだ。図 3. 2. 6-6, 図 3. 2. 6-7 に磁気島形成とペレット入射を組み合わせたときの電場シアとイオンの圧力勾配の時間変化を示す。磁気島がある場合、ペレット入射前は、負の電場シア (磁気島より内側の正電場と磁気島内部の零電場の差) が形成されており、ペ

レットを入射による密度上昇とともに正の電場シア（磁気島より内側の正電場と磁気島内部の零電場の差）が形成されていく．磁気島がない場合は，電場シアはほとんど変化していない．負の電場シアの場合，イオンの圧力勾配は磁気島がない場合（電場シアがない場合）と同じである．正の電場シアが形成されると，イオンの圧力勾配が電場シアのない場合と比較して二倍になっている．イオンの圧力勾配の増加は，負電場を強めるため，正の電場シアの場合はますます強められる方向にある．一方，負の電場シアの場合はシアが弱められる方向である．このように，イオンの圧力勾配と電場シアの間に正の帰還が働いていることが示唆された．

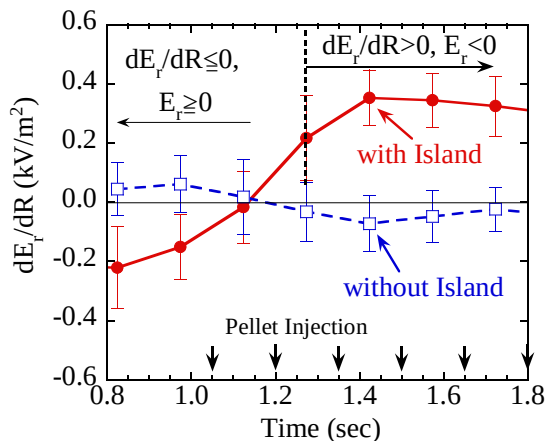


図3. 2. 6-6:電場シアの時間変化.

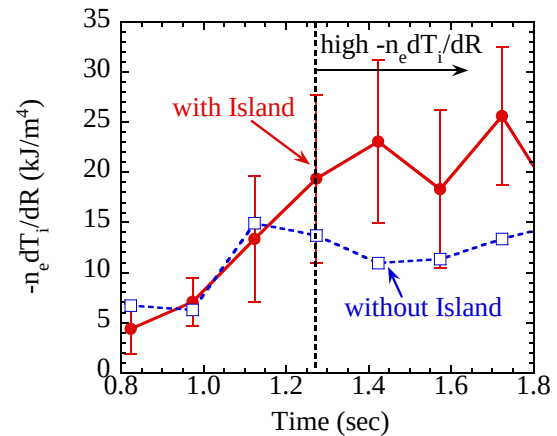


図3. 2. 6-7:イオン圧力勾配の時間変化.

周辺電場遷移の観測

電子系 ITB において観測されているように，ECH による中心加熱を行うと正電場へと電場が遷移する．この遷移の様子を観測するために，密度を緩やかに上昇させていき，電場の時間変化を観測した．図3. 2. 6-8にポロイダル回転および密度の時間変化を示す．低密度において正電場（正のポロイダル回転）であったものが，密度を滑らかに上昇させていくと，ある時点で段階的に電場が小さくなる．さらに密度が上昇すると，正電場から負電場へは滑らかに変化している様子が観測された．大きな正電場から小さな正電場への遷移であり，新古典理論から予測される負電場から正電場への遷移とは異なっている．この実験で周辺電場の段階的な変化を明確に観測できた．

電子系内部輸送障壁（電子 ITB）形成

昨年度に引き続き、ECH 重畳による電子 ITB の形成実験が行われた．本年度は磁気軸位置 $R_{ax}=3.7\text{m}$ 、磁場強度 1.51T で行った．第 2 高調波の中心集光 ECH を用い

た電子の中心加熱によって、中心の電子温度が上昇し、コア領域の電子温度勾配が増大する電子 ITB が形成されることを確認した。ECH の重畳に対応して、中心のイオン温度の上昇が観測された。電子 ITB 形成に伴う、イオン輸送の改善によるイオン温度上昇が示唆された。

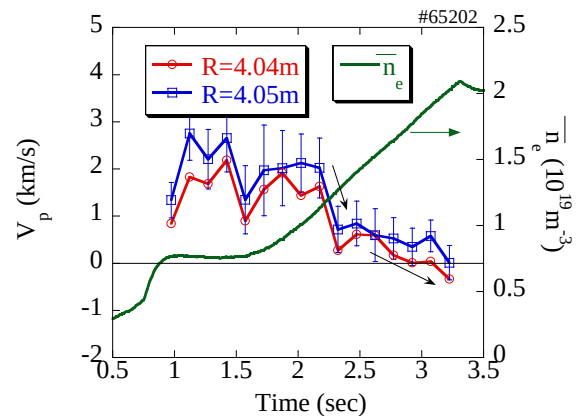


図3. 2. 6－8: 密度スキャンにともなうポロイダル回転の時間変化。

揺動の空間分布計測 (CO2 レーザーを用いた 2 次元位相コントラスト干渉計)

本年度の位相コントラスト干渉計による揺動計測は、荷電交換分光計測との電場計測を同時に行うことで、揺動の位相速度と実測された電場との比較が行われた。システムとして、ビームを大口径化し、円筒レンズを用いることで像の縦横比率を可変にできるように改良された。それによって、空間分解のが改善し、観測できる波数範囲が拡大した。図3. 2. 6－9に位相コントラスト干渉計による揺動分布計測の結果を示す。三つの揺動のピークが観測されている。白線は荷電交換分光計測により測定した ExB 速度である。緑線は、実測された ExB 速度に、電子反磁性ドリフト速度を加えたものである。揺動ピーク 1、2 は、 ExB ドリフトにのって電子反磁性ドリフト速度で伝播しており、電子ドリフト波の可能性が示唆された。

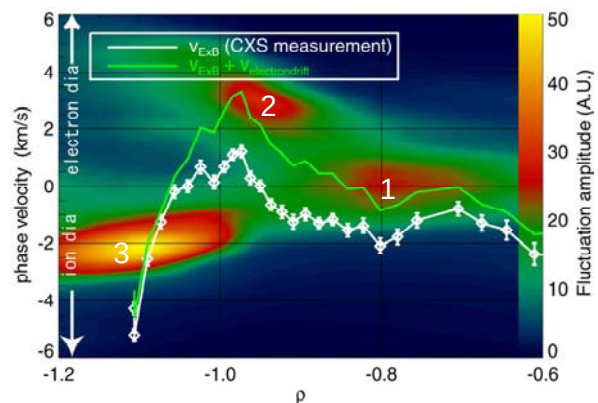


図3. 2. 6－9: 位相コントラスト干渉計による揺動分布。

- [1] A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohsima, K. Itoh, H. Iguchi, Y. Yoshimura, T. Minami, K. Nagaoka, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, Y. Nagashima, K. Ida, K. Toi, T. Ido, S-I Itoh, K. Matsuoka, S. Okamura and P. H. Diamond, “Turbulence and transport characteristics of a barrier in a toroidal plasma,” Plasma Phys. Control. Fusion **48** (2006) S205.
- [2] K. Ida, “Characteristics of transport in electron internal transport barrier and in the vicinity of rational surfaces in the Large Helical Device,” Phys. Plasmas, (2004)
- [3] K. Itoh, et al., “Physics of Zonal Flows,” Phys. Plasmas, (2006)
- [4] A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, H. Iguchi, K. Matsuoka, S.

- Okamura, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, K. Ida, K. Toi, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, Y. Nagashima, S. –I. Itoh, P. H. Diamond, “Experimental Evidence of a Zonal Magnetic Field in a Toroidal Plasma,” *Phys. Rev. Lett.* **98** (2006) 165001.
- [5] A. Fujisawa, K. Itoh, H. Iguchi, K. Matsuoka, S. Okamura, A. Shimizu, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, C. Takahashi, M. Kojima, H. Nakano, S. Ohshima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, K. Ida, K. Toi, S. –I. Itoh, and P. H. Diamond, “Identification of Zonal Flows in a Toroidal Plasmas,” *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 165002.
- [6] A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, K. Itoh, Y. Nagashima, S. –I. Itoh, H. Iguchi, Y. Yoshimura, T. Minami, K. Nagaoka, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, T. Ido, K. Matsuoka, S. Okamura, P. H. Diamond, “Intermittent Characteristics in Coupling between Turbulence and Zonal Flows,” *Plasma*

3. 3 装置工学・機器開発

3. 3. 1 LHD 超伝導コイル

1) LHD超伝導コイル系の評価

LHDは世界最大の超伝導コイルシステムを有する核融合実験装置であり、装置工学実験では、プラズマ実験に安定した磁場を提供するために超伝導コイルシステムの信頼性向上に関する研究を行ってきた[1]. その成果として、1998年の運転開始以来、年間約5,000時間、積算で48,000時間を超える超伝導システムの長期間運転において、98%以上の稼働率を達成している[2]. さらに大型超伝導コイルシステム特有の物理現象に関する研究を装置工学実験として進めており、その具体的テーマと成果の概要は次の通りである.

(1) LHD 超伝導コイルの性能確認と健全性確認

冷却サイクル毎に一連の励磁試験を行い、超伝導コイルシステムの健全性を確認している. 特にヘリカルコイルについては、常伝導伝播が起こり得る電流値までの励磁試験を毎回実施してきており、これまでのところ冷却安定性の劣化は観測されていない.

(2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響(AE)信号を用いた健全性診断(成蹊大学との共同研究)

バランス電圧信号と音響信号を用いて冷却サイクル毎のコイル擾乱の変化を調べてきている. 加温と再冷却の後、次のサイクルにおける最初の励磁では、ある程度までスパイク信号強度が初期化されるものの、冷却サイクルを重ねるごとに強度が減少していることも明らかとなっている.

(3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定

代表的な位置のひずみゲージの出力の経年変化を調べてきている. 建設から10年経過した現在でもひずみゲージは依然として正確に動作しており、かつ、電磁力支持構造物の赤道面付近の溶接部は健全であることが確認されている.

(4) LHD 超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場の観測(東北大学、山口大学との共同研究)

CIC 導体を用いているLHDポロイダルコイルの近傍にホール素子を取り付け、いろいろ通電条件を変えて測定を行ってきた結果、100秒から1000秒オーダーの時定数の長い結合電流の存在が明らかとなった. 超長時定数成分の結合電流のパス等の検討を行っている.

(5) LHD 超伝導コイル電源の電流制御-プラズマ電流消滅時の制御特性向上(大阪大学との共同研究)

外乱信号の影響を抑制する制御系を構築するための理論である H_{∞} 制御設計手法

を利用して、安定性と制御特性の両立を図った制御系を設計してきた。プラズマ電流信号に非線形フィルタ(一定レベル以下の信号には作用せず、一定以上の信号に対しては LPF 特性を持たせた)を挿入して、過渡時擾乱抑制を検討した実験を行い、本制御システムが、高速な現象にも擾乱が少なく運転可能なことが示唆された。

(6) 定常電源を使用した動的制御予備実験(大阪大学との共同研究)

パルス電源の製作を開始する前に、現状の定常電源を使用した電流制御予備実験を実施し、所定の電流制御を実現できることを確認した。

(7) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価

超伝導コイル対におけるバランス電圧計測から超伝導コイルシステムの幾何学的な精度を評価することを目的に実験を行い、コイル対の相互インダクタンスの誤差は $\Delta M \sim 0.3\text{mH}$ 程度という結果が得られた。線電流近似による簡易的なインダクタンス計算では、 $\sim 1\text{mm}$ の位置ずれに相当する。

(8) LHD 電磁力支持構造物の二相流ヘリウムによる冷却の最適化(日本原子力研究所(当時)との共同研究)

LHD 電磁力支持構造物の冷却は、二相流ヘリウムによる 20 並列の強制冷却が採用されており、流路間の流量不均一が生じる可能性があるため、2時間の冷媒停止および流量の半分にする実験を行った。各流路には固有の周期の 1 K 以内の温度振動が観測されるものの、これらの実験範囲内では著しい流量不均一は観測されなかった。

特に研究の進展が見られた(2)、(4)、(6)について、成果の概要を以下に述べる。

1. LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響信号を用いた健全性診断

LHD の超伝導コイルシステムでは、各実験サイクルにおける冷却の終了後、プラズマ実験に先だって提供する磁場配位を作る通電試験を行い、超伝導コイルシステムが健全であることの確認を行っている。特に、ヘリカルコイル、および、トロイダルコイルの健全性については、バランス電圧測定、AE 測定、ひずみ測定によって検証している。励磁に伴ってコイルのバランス電圧に多数のスパイク信号が観測されるが、これらのスパイク信号に対してパルス波高解析の手法を適用することで、巻線の機械的特性に関する定量的情報を得る手法を開発してきた[3]。特に、冷却完了後最初の励磁試験では、#1-o モード(磁気軸位置 3.75 m)における磁気軸中心トロイダル磁場 2.7 T までの励磁を 3 回行い、それぞれの励磁において観測されるヘリカルコイル H-I ブロックのバランス電圧信号(10 Hz のローパスフィルターを通したもの)について、スパイク電圧信号の波高の積分値を励磁回数に対してプロットしたものが図 3. 3. 1-1 (a) である。各冷却サイクルにおいて同じ条件の 2 回目以降の励磁では、1 回

目と比べて総和が減衰していることがわかる．電磁力の印加によってヘリカルコイルの巻線が締め付けられてきているものと推測できる．波高値の減少は，特に，高エネルギー成分（電圧として 3 mV 以上）で顕著であり，常伝導転移を引き起こすような大きな擾乱が減ってきているものと推測できる．また，図 3. 3. 1 - 1 (b) に示すように，加温と再冷却の後，次のサイクルにおける最初の励磁では，ある程度までスパイク信号強度が初期化されるものの，冷却サイクルを重ねるごとに強度が減少していることも明らかとなっている．

LHD の超伝導コイル群において励磁に伴って発生する機械的擾乱についてさらに詳しく調べることを目的として，AE 信号の測定も併せて行っている．これは，[成蹊大学との共同研究（代表者：石郷岡猛教授）](#)として行ってきたものである[4, 5]．ヘリカルコイル容器の 4 カ所に AE センサを取り付け，エンベロープ信号をサンプリング周波数 10 kHz で取得している．AE 信号の積分値について励磁回数に対する依存性を調べたところ，2 回目の励磁より減衰し，バランス電圧の測定結果と類似の傾向を示していることも明らかとなっている．一方，ヘリカルコイルのバランス電圧信号については，低周波数領域（10 Hz）と高周波数領域（1 kHz）の計測結果も合わせて示している．これについて，高周波数領域では低周波数領域には観測されないタイミングで信号が観測されているが，これまでの観測の結果，高周波数領域にかかる信号の一部は，ポロイダルコイルが変位することによって生じる機械的な振動をピックアップしているものであることが明らかとなっている．AE 信号についてもポロイダルコイルの振動を捉えているものが多数あることがわかっている．さらに，これまでに未経験領域の電磁力を経験した高磁場励磁領域においても，励磁の進展に伴ってスパイク信号強度が減少することが確認できており，有益な情報を得ている．プラズマ実験前の励磁試験では，超低速励磁を行うことで正確なひずみ測定も必ず行っており，これまでのところ，変化が認められないことを確認している．

一方，励磁試験や装置工学実験の際に，微小な常伝導転移を確実に捉えることが極めて重要な課題であるため，第 10 サイクルにおいて微小常伝導転移の自動判定を行うシステムを構築した．これを用いることで磁場方向を反転させた直後の励磁において頻繁に観測されるフラックスジャンプや NB I のコンディショニングに伴うノイズ信号等から常伝導転移に伴う電圧変化を分離抽出し，これを確実に捉えることが可能となっている．

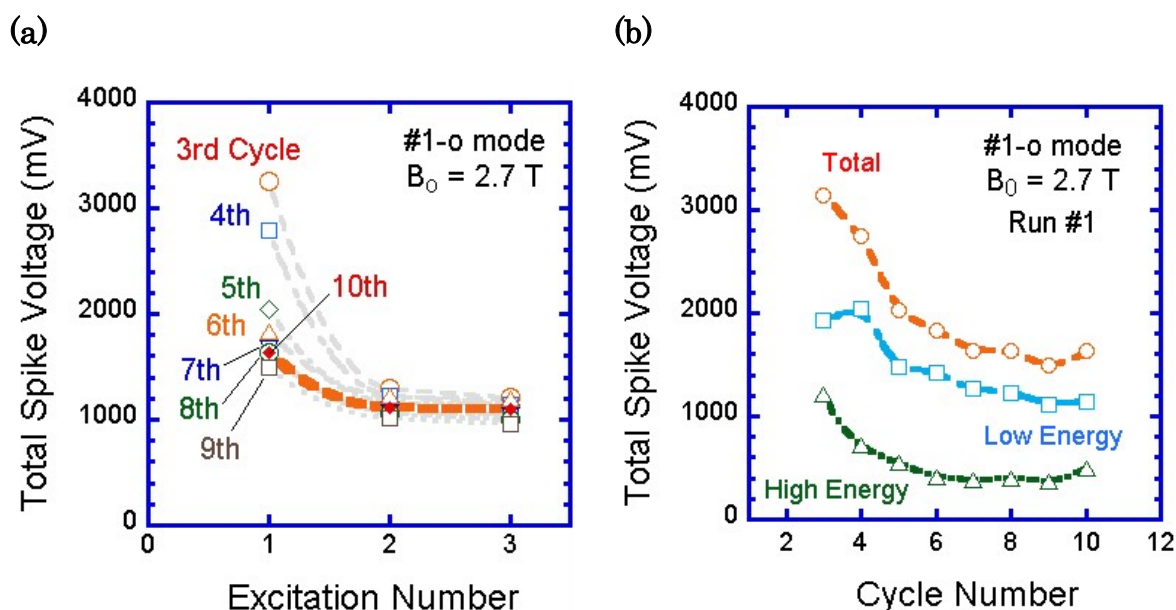


図3. 3. 1-1. (a)#1-o モード磁気軸中心磁場 2.7 T までの励磁時にヘリカルコイルに観測されるバランス電圧スパイク信号積分値の励磁回数に対する推移. グラフ中の番号は冷却サイクルを表す. (b)各冷却サイクルにおける冷却完了後最初の#1-o モード, 磁気軸中心磁場 2.7 T までの励磁時にヘリカルコイルに観測されるバランス電圧スパイク信号積分値の冷却サイクルに対する推移.

2. LHD超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場変化の観測

ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を用いた大型超伝導コイルにおいては, コイル近傍の磁場を測定したとき, 通電電流が一定であっても長い時定数を持った磁場変化が観測されることが報告されている. 磁場の長時定数成分はコイル内部の結合電流ループによるものと考えられているが, その電流経路が複雑なために現在のところまだ完全な定量化には至っていない. そこで, CIC 導体を用いているLHDポロイダルコイルの近傍にホール素子を取り付け, 磁場の長時定数成分の観測を試みてきた(東北大学, 濱島高太郎教授との共同研究) [6]. ISコイル, OVコイルの内周面にそれぞれ4個のホール素子を取り付け, いろいろと通電条件を変えて測定を行ってきた結果, 減磁が終了し電源とコイルを切り離れたにもかかわらず磁場の変化が観測されたり, 通電中のフラットトップで電流値が変化していない状態でも磁場の微小変化が観測されたりした. これらの結果, LHDポロイダルコイルにおいても, 長時定数成分が存在することが明確となっている. 構造物の渦電流ではこのような長時定数減衰は発生しないため, 超伝導性に関係した結合電流ループに起因しているものと考えられる. 観測された磁場変化について指数関数を用いてフィッティングすると, 減衰時定数として100秒から1000秒オーダーと長い成分が存在している. 第10サイクルに行った装置工学実験では, これらの長時定数結合電流の電流経路およびその減衰特性を把握するために, OVコイルの内周面にさらにホール素子4個を追加し, 通電

波形の影響について調べた。図3. 3. 1-2は、OV-Lコイル内周面に貼り付けた(LHD方位18度)ホール素子で観測された通電終了後の残留磁場の変化である。赤線はプラズマ実験時に#1-oモード2.64 T(OVコイル電流値17.27 kA)の通電を9時間継続した後に0.2 T/minで減磁した(台形波状通電)後の変化であり、青線は装置工学実験時に#1-dモード2.5 T(OVコイル電流値16.33 kA)まで0.2 T/minで励磁した直後に0.2 T/minで減磁した(三角波状通電)後の変化である。いずれの場合も減磁完了後1000秒経過する時点までは、磁場が増える方向に変化しているが、その後は磁場が減る方向に変わっている。この結果は、100秒オーダーの結合電流と1000秒オーダーの結合電流の電流経路が異なることを示唆している。現在、100秒オーダーの結合電流は導体内部で発生し、1000秒オーダーの結合電流は導体接続部を介して発生していると推定している。さらに通電波形の影響も見られており、三角波状の通電を行うことで、1000秒オーダーの結合電流の発生だけが抑制されることが確認できる。これは回路モデルの結果と矛盾しないため、時定数の長い結合電流が関与していることがより明確となってきた。現在、詳細な解析を行い、超長時定数成分の結合電流のパス等を明確にすべく検討を行っている。

また、上記に関連した研究として、超伝導体の作る磁化が残留磁場としてどのように不整磁場として影響を及ぼしたり[7]、コイルのバランス電圧を測定するうえでどのように電圧信号に影響を及ぼしたり[8]するかという研究も行っている。

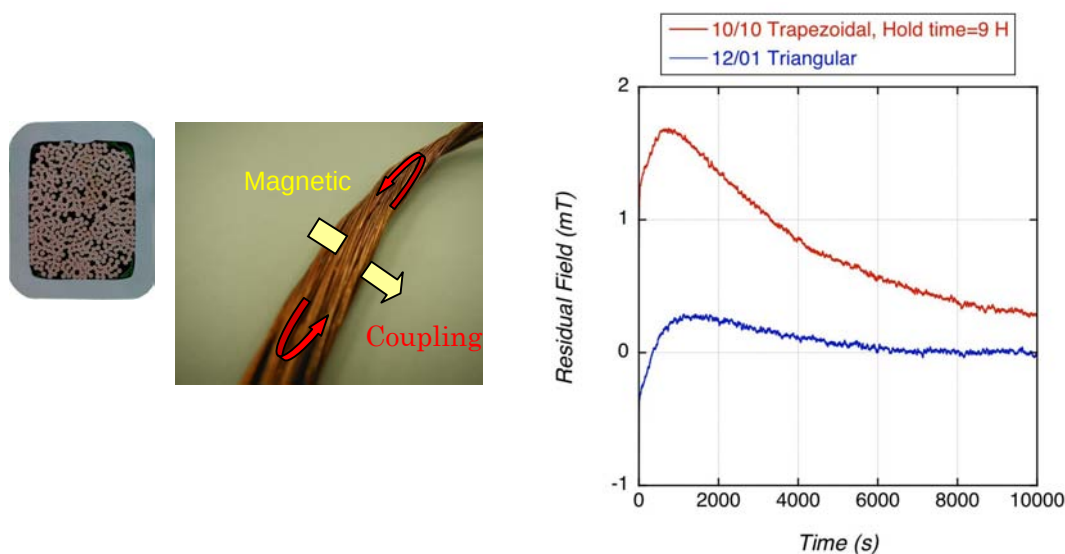


図3. 3. 1-2. ケーブル・イン・コンジット導体の断面図とケーブル部に誘起される結合電流の模式図. 9時間保持後減磁した台形波状通電後の残留磁場の变化(赤線)と三角波状通電を行った後の残留磁場変化(青線)の比較. ホール素子の位置はOV-Lコイル内周面.

3. 定常電源を使用した動的制御予備実験

コイル励磁電源の出力電圧を増強した場合に、現在の電流制御システムを直接適用できるか、コイル端子電圧に含まれるリップル電圧および印加電圧の増大が超伝導コイルの運転監視にあたる影響はどの程度か、を把握しておく必要がある。このため、パルス電源の製作を開始する前に、現状の定常電源を使用した電流制御予備実験を実施した。

試験においては、磁気軸中心の磁束密度を 0.15T とし、パルス電源導入時と同じ時間で磁気軸掃引を行い、その時の電流制御の状況、およびバランス電圧に誘導する電圧レベルの確認を行った。電流制御には H_∞ 制御(大阪大学 伊瀬敏文)と、PI 制御を元にしたアドバンスト制御の二通りを適用し、磁気軸を5cm 刻で 3.45m から 3.9m まで掃引した。

図3. 3. 1-3 および4にそれぞれの制御系のブロック図を示す。図3. 3. 1-5 および6に全体の電流波形を、図3. 3. 1-7と8に磁気軸 3.50m から 3.55m まで掃引したときの、電流波形を示す。いずれの制御系でも所定の電流制御を実現できている。

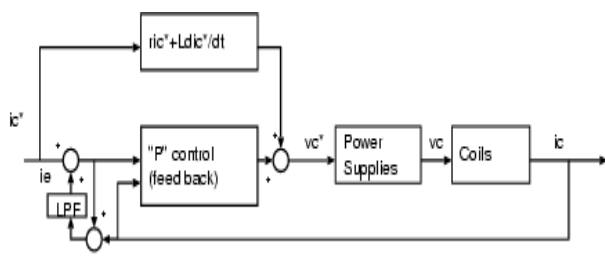


図3. 3. 1-3 P 制御を基にした電流制御

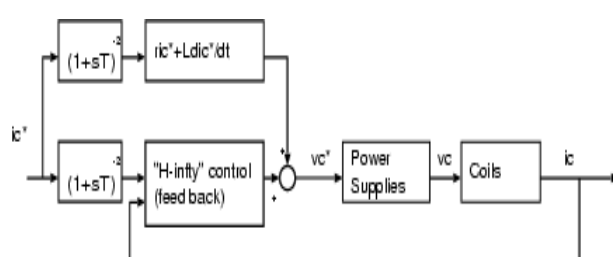


図3. 3. 1-4 H_∞ 制御系

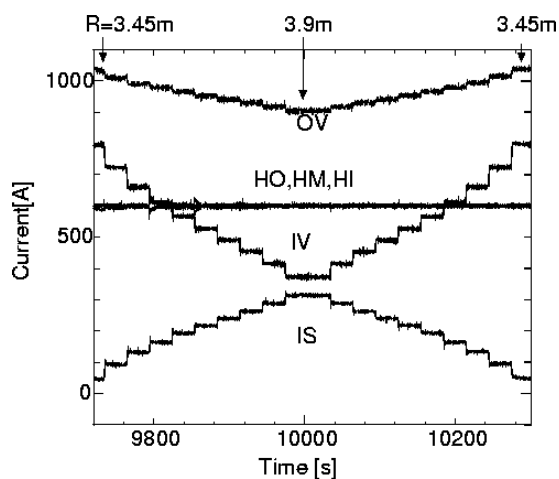


図3. 3. 1-5 P 制御による磁気軸制御

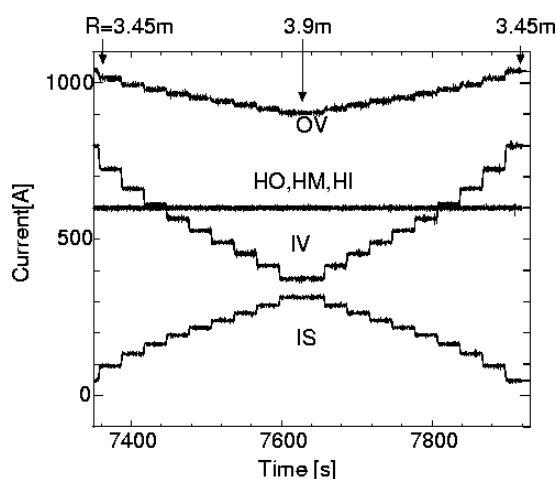
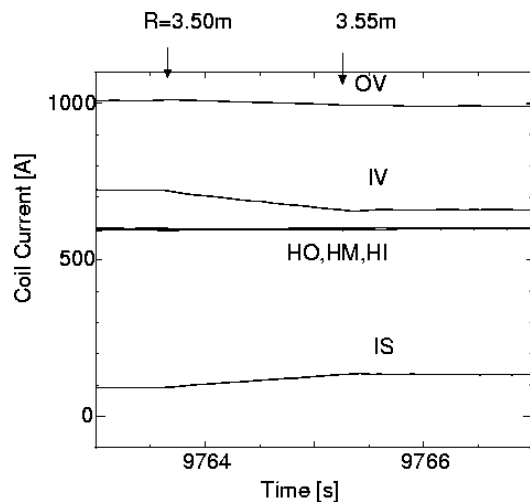
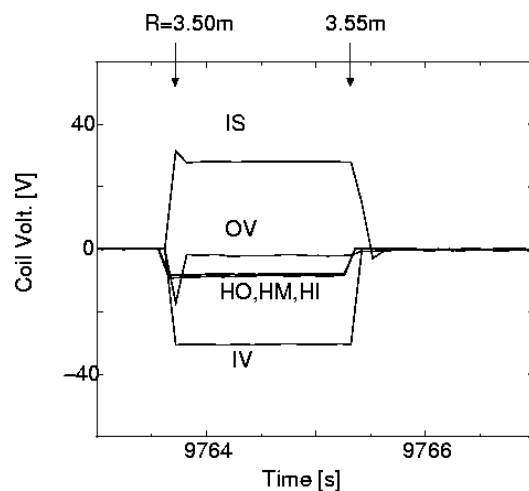


図3. 3. 1-6 H_∞ 制御による磁気軸制御

両制御を比較すると、 H_∞ 制御では制御系のロバスト制を確保するためにコイル電流指令値の変化率を制限するフィルタを使用しており、そのため電流変化開始時のコイル電圧立上りがやや遅れる。その結果として、コイルに印加される電圧の立上りが滑らかであり、常伝導検出信号に混入するパルス性ノイズも P 制御の 25mV と比較して、 5mV と $1/5$ に抑えら

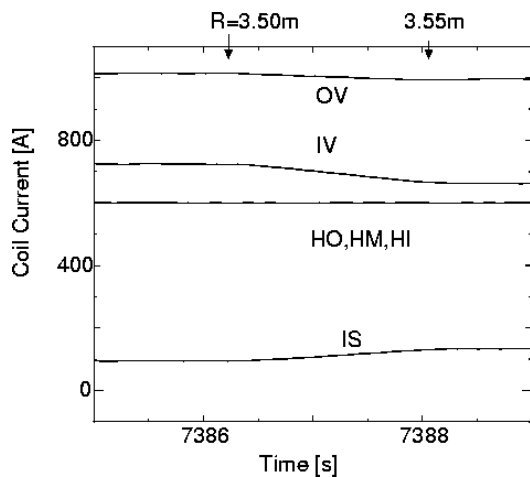


(a)コイル電流波形

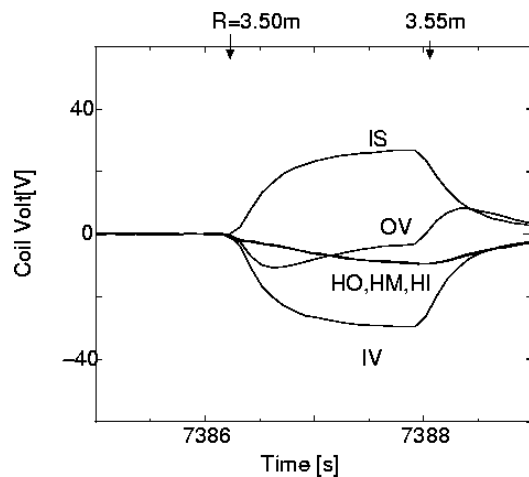


(b)コイル電圧波形

図3. 3. 1-7 P 制御を基にした電流制御時のコイル電流および電圧波形



(a)コイル電流波形



(b)コイル電圧波形

図3. 3. 1-8 H^∞ 制御による電流制御時のコイル電流および電圧波形

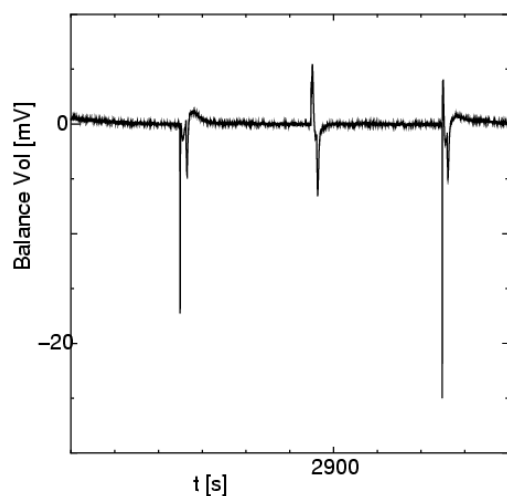


図3. 3. 1-9 P 制御時の誘導電圧

れている。

実際のパルス電源による磁気軸制御運転時には、この6倍の電圧が誘導する。そのレベルは H^∞ 制御時には 30mV であり、現在の常伝導転移判定レベル 200mV を十分下回っている。P 制御の場合には 150mV と判定レベルに近い値となるが、パルスの継続時間が 20ms 程度と短く、常伝導転移判定の継続時間 1 秒を下回っており、誤検出の危険性は少ない。

(図3. 3. 1-9, 10)

以上の結果より以下の結果を得た。

- パルス電源導入時にも現在の電流制御システムにより所定の手数でコイルの電流制御が可能である。
- バランス電圧への誘導電圧も常伝導検出の基準値よりも低く抑えられ、常伝導転移の誤検出の可能性が低い。

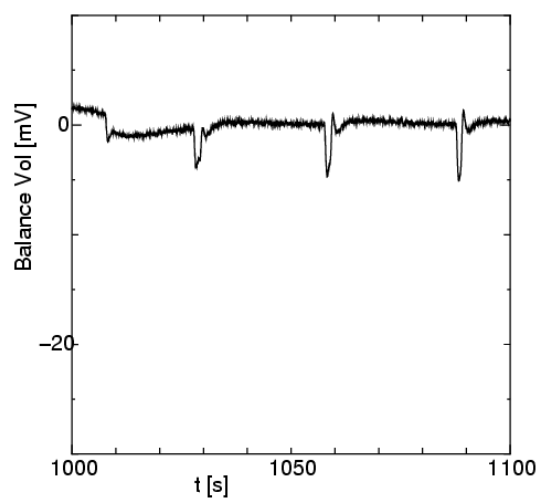


図3. 3. 1－10 H^∞ 制御時の誘導電圧

2) LHD ヘリカルコイルの過冷却 (サブクール) 改造

LHD のヘリカルコイル導体では、高い冷却安定性を確保するために安定化材に高純度アルミニウムが採用された。しかしながら、導体断面の大型化によって低抵抗の安定化材への電流拡散時間が長くなったことが原因で、定格電流値の約 90%の電流値において常伝導部の拡大伝播が起こり得ることが明らかとなり、それ以下の電流値(約 11.2 kA)で運転されてきた[9,10]。そこで、冷却安定性を改善して高磁場励磁を可能とするために冷媒温度を下げる改造を第 10 サイクル前に実施した。追加した過冷却システムが所定の性能を達成することを確認してから、サブクールされた状態での励磁試験を行い、11.5 kA までの励磁に成功した。

冷媒温度を下げる方法として、ヘリカルコイル全体を減圧する方法と入口側に減圧熱交換器を追加して圧力は変えずに過冷却状態にする方法の2通りを比較・検討して、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な後者の方式を選択した[11]。図 3.3.1-11 に示すように、低温排気圧縮機を採用することによってコンパクトな設計が可能となり、設置空間の問題は解決された。また、既設ヘリウム冷凍機の能力で供給可能な 3.0 K の過冷却ヘリウムは約 50 g/s と見積もられており、ヘリカルコイルの定常侵入熱が約 100 W であることから、この場合のヘリカルコイル出入口の平均温度は約 3.5 K まで低下できることになる。この改造による改善効果を定量的に調べるため、同一仕様の導体で製作されたモデルコイルを用いて過冷却ヘリウム中の冷却安定性試験を実施した[12]。モデルコイルの冷却方式は、できるだけ実機を模擬するため低温排気圧縮機を用いた冷却システムを新しく準備した。モデルコイルは内半径が 200 mm で 24 列×12 層のレイヤー巻コイルであり、最大経験磁界がヘリカルコイルと同じである。導体間に等間隔で配置されている絶縁スペーサに挿入されたヒータによって局所的に常伝導部を発生させて、導体長手方向の電圧タップにより伝播の有無を判定した。飽和ヘリウム中では、

電流値が閾値（動的な最小伝播電流 $I_{(\text{mp})}^*$ ）である 10.6–10.7 kA を超えると 1 ターン以内の片側伝播が始まり、さらに電流値を上げると 1 ターンを超えて低磁場領域までの片側伝播、両側伝播と回復、クエンチと変化した。片側伝播は LHD ヘリカルコイルでも観測されており、その原因には超伝導線から

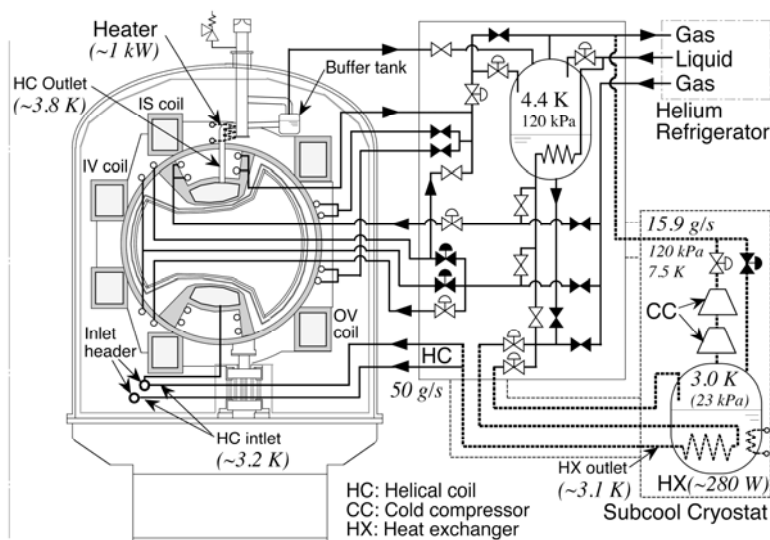


図3. 3. 1-11. ヘリカルコイル冷却システムの過冷却改造

アルミニウム安定化材に電流が転流する際に外部磁界を横切ることによる電磁現象が関与していると考えられている。また、1ターン以内で伝播が止まる原因は、導体の姿勢に伴う沸騰熱伝達の変化と考えられる。一方、過冷却ヘリウム中では、過冷却度に比例して $I_{(mp)}^*$ が上昇し、3.5 K では 11.7 kA まで上昇した。ヘリカルコイルで常伝導伝播が発生している場所が3層目と推定されることを考慮すると、図 3.3.1-12 に示すように、LHD ヘリカルコイル内の温度を 3.5 K 程度に下げることによって 12 kA の励磁が期待できることになる[13]。

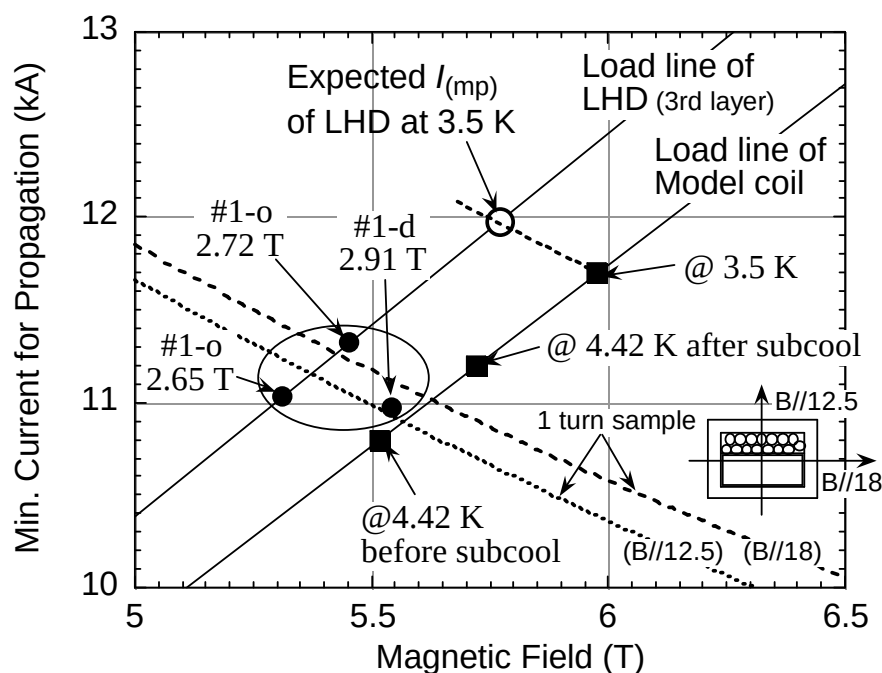


図3. 3. 1-12. モデルコイルとヘリカルコイルの動的な最小伝播電流

第 10 サイクル実験前に、大型ヘリカル装置のヘリカルコイルの冷媒供給側に減圧熱交換器を追加する改造を実施した。まず、追加した過冷却システムの性能試験を行い、図 3.3.1-13 に示すように、ヘリカルコイルの入口と出口を各々 3.2 K と 3.8 K に低下させることに成功した。モデルコイルを用いた安定性試験では、最小伝播電流がサブクール度にほぼ比例して高くなる結果が得られており、低い温度を保持することが重要であるため、励磁に伴う温度上昇を評価した。この図から分かるように、励磁速度が速くなるほど、結合損失と構造物の渦電流損失が増大して温度上昇が大きくなる。評価の結果、通常の 1/2 の電流変化率 3.5 A/s であれば、励磁に伴う発熱の約 2/3 がヒステリシス損失となり、11 kA までの励磁においてもコイル出口温度を 4.0 K 以下に保つことができることを確認した。

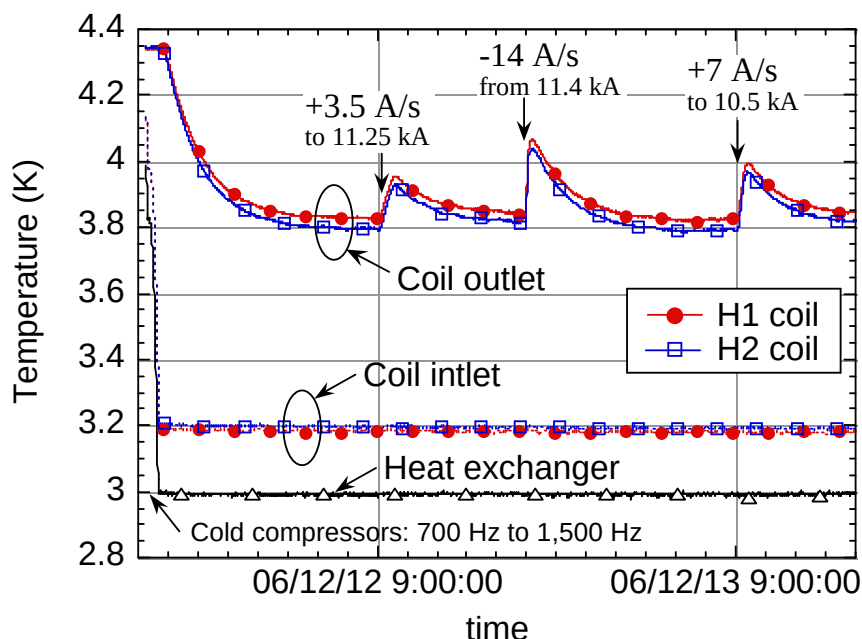


図3. 3. 1－13. 過冷却運転時のヘリカルコイル出入口の温度変化

ヘリカルコイルのサブクール冷却改造を行った結果、ヘリカルコイル入口温度を3.2 K、出口温度3.8 K、供給流量約50 g/sの条件で通電を行うことが可能となった。コイル巻線の実際の温度については、上記の条件より数値解析を用いて計算を行っており3.5 Kに近いものと推測している。この条件において超伝導コイルの冷却安定性が改善されることを利用して、高磁場励磁を実施した。第10サイクルの装置工学実験において、まず#1-oモード磁気軸中心磁場強度2.76 T（電流値11.5 kA）までの励磁に成功したが、電圧波形およびピックアップコイル信号を詳細に解析した結果、磁場2.75 Tに至る直前に短い常伝導伝播が生じていたことが判明した。ここで、#1-oモード2.75 Tは、第2サイクル途中にクエンチを経験した点であり、同年中にクエンチなしで一度到達しているものの、それ以降の励磁は行われてこなかった。図3. 3. 1－14(a)において、電流値11.44 kA（グラフで時刻ゼロ）でH2コイルに常伝導伝播が生じており、このときに観測された最内層ブロック（H-Iブロック）のバランス電圧波形から常伝導抵抗成分のみを抽出したものを図3. 3. 1－14(b)に示す。これより、約0.2秒の短い時間ではあるが常伝導部が発生していることがわかる。また、ヘリカルコイルに沿って配置したピックアップコイルの電圧出力より、常伝導部の発生位置はH2コイルの#8セクター最上部付近であり導体の長手方向に沿って常伝導部が伝播したことが確認される（図3. 3. 1－15(a)）。ここで、H-IおよびH-Mブロックのバランス電圧の差信号とH-Mのバランス電圧信号の積分値とを比較することにより常伝導成分が抽出できるが、このとき差信号を求める係数が1.2であることより、HC断面内の常伝導伝播発生位置が最内層から4層目の左端であると推察される。この場所における磁場強度は1～3層目より低いため、これまでの導体試験やモデル

コイル試験で得られているサブクール液体ヘリウム中の導体特性とは異なっていると考えられる．しかも発生した位置より磁場が高くなる内周側で伝播が止まっていることがピックアップコイルの信号から確認できるため，導体の温度が一様でなかった可能性が示唆される．現在，巻線導体の温度分布の詳細な解析と併せてさらに議論が続いている．一方，常伝導伝播の機構についてもサンプル導体を用いた実験や数値解析によって研究を進めている（共同研究：京都大学，白井康之准教授，北海道大学，野口聡准教授）．その結果，導体の長手方向に非対称な伝播速度を伴って常伝導部が伝播する様子が再現できるようになり，理解が進展している[14, 15]．

常伝導転移を発生させる擾乱については，巻線導体に働く電磁力によって導体が瞬間的に動くことで生じるものと考えられ，導体と絶縁スペーサとの間で生じる摩擦発熱による導体温度の局所的な上昇によって常伝導転移が生じるものと理解できる．このため，巻線導体に生じる機械的擾乱について定量的に調べることも重要である．図 3. 3. 1 – 15 (a) の常伝導転移が生じた時刻について，バランス電圧信号の高周波数領域までの測定波形を図 3. 3. 1 – 15 (b) に示す．この波形では，10 kHz までの信号を取得している．同時に示している 10 Hz のローパスフィルターを通した波形との比較により，常伝導転移が生じた直前に観測されているスパイク信号は，巻線の機械的擾乱をとらえたものと考えられる．この図では，超音波領域の音響信号を測定した A E 信号も同時に示している．測定に用いている A E センサは，ヘリカルコイル容器の表面に合計 4 個取り付けられているが，常伝導転移を引き起こしたと考えられる機械的擾乱が発生した時点では，第 7 セクターの A E 信号が最大強度を検出しているとともに，この信号がもっとも早い時刻で現れている．上述のようにピックアップコイルによる測定では，常伝導転移が第 8 セクターで生じたことを示しているが，A E 信号の観測はこのことと整合性のある結果となっている．

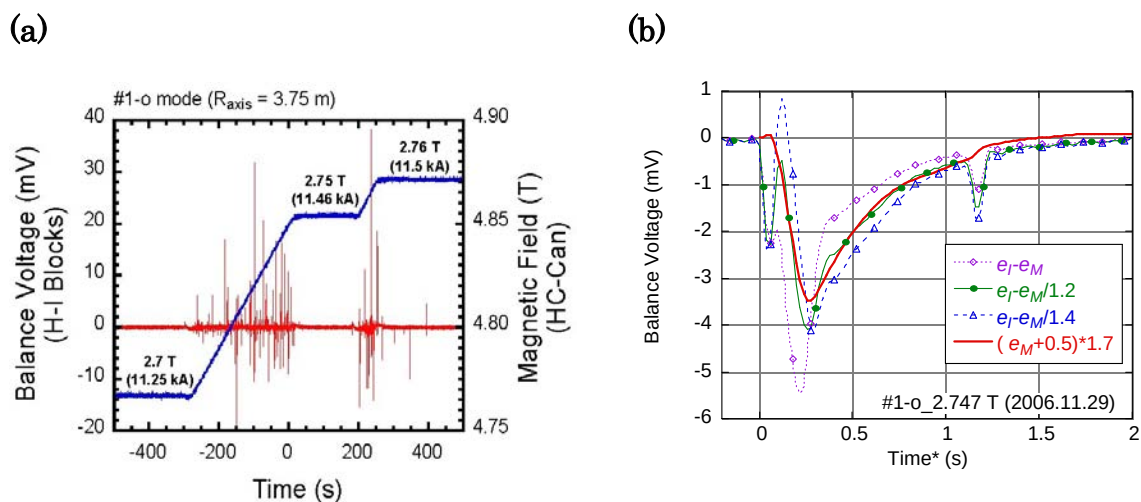


図3. 3. 1 – 14. (a)サブクール液体ヘリウム冷却による#1-o モード 2.76 T 励磁時の H-I ブロックのバランス電圧波形. (b)常伝導転移時におけるバランス電圧から抽出した常伝導抵抗成分.

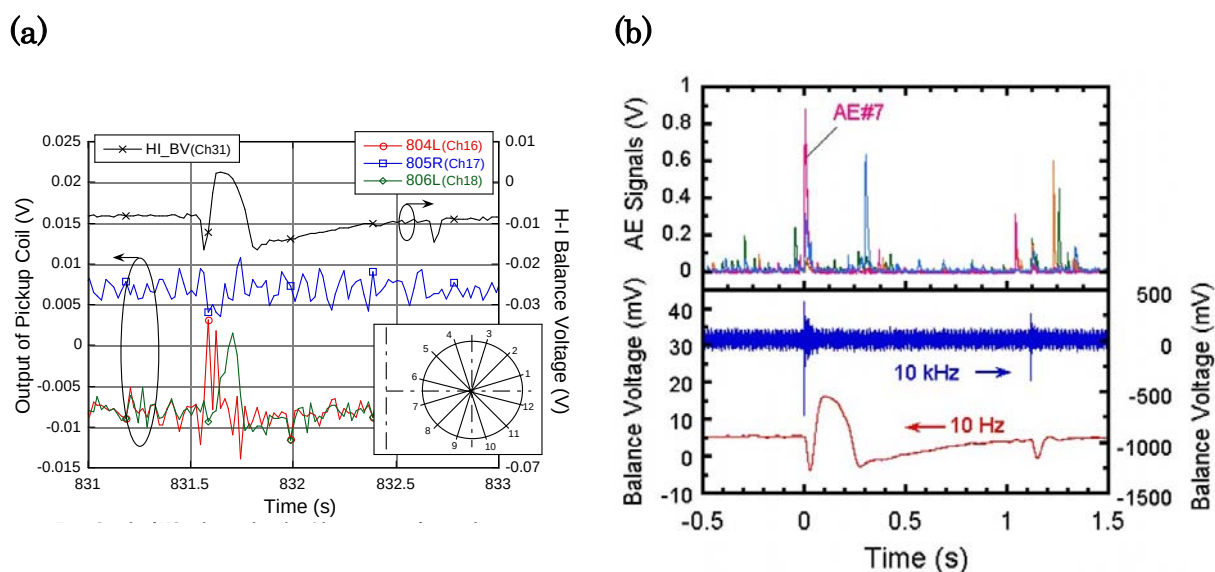


図3. 3. 1－15. (a)常伝導転移時のピックアップコイル出力波形. (b)常伝導転移時のAE信号とバランス電圧の高速波形および低速波形.

第10サイクルにおける通電では、図3. 3. 1－14に示した例以外に、プラズマ実験時の励磁において、もう一度短時間の常伝導伝播と回復が生じている。これらはいずれもモデルコイルから推定したものより低い電流値において観測されており、励磁に伴う交流損失によって局所的に温度が上昇しているために発生した可能性が高いと。このため、2回目の常伝導転移以後は、高磁場励磁前には11 kA付近で2時間以上保持するように励磁方法を変更し、11.5 kA相当までの励磁を合計5回行い、安定に励磁できることを確認した。これにより、第10サイクルの磁気軸位置3.6 m (#1-dモード)において、中心トロイダル磁場2.85 Tのプラズマ実験が可能となっている（従来は2.75 T）。この条件で電子サイクロトロン加熱プラズマ実験が行われた結果、以前より高い電子温度を得ることに成功している。

励磁・減磁に伴う交流損失によってヘリカルコイル内部の温度が上昇する。サブクールシステムが定格運転（熱交換器温度3.0 K，コイル流量50 g/s）の場合のコイル出口平均温度の時間変化を図3. 3. 1－16 (a)に示す。一旦、上昇した温度は約2時間の時定数で低下している。第11サイクルの冷却完了後の励磁試験では、11.5 kA相当（ヘリカルコイル3ブロックの電流値がH-0/M/I =11.8/11.4/11.4 kA）の励磁を行ったところ、#10セクターの最下部付近から常伝導伝播と回復が観測された。発生位置は3層目と推定され、飽和液体ヘリウム冷却において数回の常伝導伝播が同じ場所で観測されているため、これらとの比較を図3. 3. 1－16 (b)に示す。常伝導伝播速度が飽和液体ヘリウム中の11.0 kAの場合より遅くなっており、サブクールによって冷却安定性が改善されていることを示している。しかしながら、その改善効果は

モデルコイルによる予測よりも小さい。飽和ヘリウム冷却では、常伝導伝播がコイル最下部付近で始まり最上部付近で停止したことから、コイル下部ではH-Iブロックへの気泡の集積によって局所的に冷却が悪化していると推察されてきた。この部分の冷却を改善することが改造の目的であったが、依然、局所的にサブクール度が小さいことが推察される。現在、その原因およびモデルコイルとの差異について検討中である。また、サブクール運転におけるH-Iブロックの冷却安定な範囲を把握することができたため、この限度を超えないように、MおよびOブロックの電流値を増やした励磁法による高磁場励磁を進めている。これにより、第11サイクルの途中からは磁気軸位置3.6 m（#1-dモード）において、中心トロイダル磁場2.95 T（第10サイクルでは2.85 T）のプラズマ実験を可能にする計画である。また、この電流値は、磁気軸位置3.5 mでは、中心トロイダル磁場3 Tに相当する。

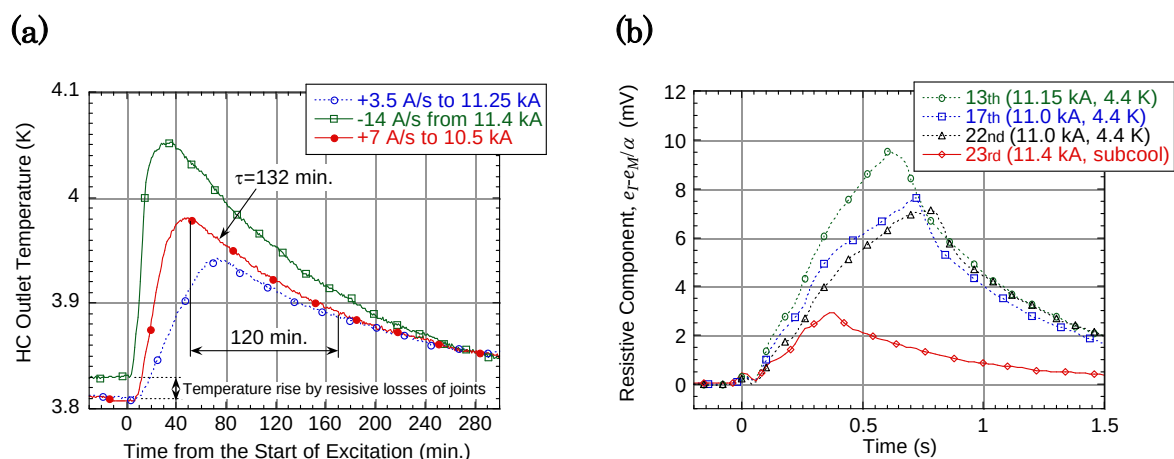


図3. 3. 1－16. (a)励磁に伴うヘリカルコイル出口における温度上昇. (b)飽和液体ヘリウム冷却時およびサブクール液体ヘリウム冷却時に観測されたヘリカルコイル#10セクターを起点とした常伝導転移時の常伝導抵抗成分波形.

- [1] Mito, T., Sagara, A., Imagawa, S. et al., “Applied superconductivity and cryogenic research activities in NIFS”, Fusion Engineering and Design, Vol.81, No.20-22 (2006) pp. 2389-2400.
- [2] Imagawa, S., Yanagi, N., Hamaguchi, S. et al., “Achievement of high availability in long-term operation and upgrading plan of the LHD superconducting system”, Nuclear Fusion, Vol.47, No.4 (2007) pp. 353-360.
- [3] Yanagi, N., Seo, K., Imagawa, S. et al., “Pulse height analysis on the balance voltage and acoustic emission signals for the LHD superconducting coils”, Fusion Engineering and Design, Vol.81, No.20-22 (2006) pp. 2561-2565.
- [4] Ishigohka, T., Tsuchiya, T., Adachi, Y. et al., “AE measurement of the LHD helical coils”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.15, No.2, (2005) pp. 1423-1426.

- [5] Ishigohka, T., Mito, T., Imagawa, S. et al., "Protection of LHD coils by intelligent observation of voltage signals", *Fusion Engineering and Design*, Vol.81, No.20-22 (2006) pp. 2567-2570.
- [6] Takahata, K., Mito, T., Chikaraishi, H., Imagawa, S., Satow, T., "Coupling losses in cable-in-conduit conductors for LHD poloidal coils", *Fusion Engineering and Design* 65 (2003) pp. 39-45.
- [7] Imagawa, S., Takahata, K., Yanagi, N., Mito, T., " Measurement of residual magnetic field by superconducting magnets of the LHD ", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 (2005) pp. 1419-1422.
- [8] Takahata, K., Imagawa, S., Yanagi, N., Chikaraishi, H., Mito, T., "Influence of magnetic hysteresis on quench-voltage detection in large superconducting magnets", *Fusion Engineering and Design* 81 (2006) pp. 2571-2575.
- [9] Imagawa, S., Yanagi, N., Sekiguchi, H., Mito, T., Motojima, O., "Performance of the helical coils for the large helical device in six years' operation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.14, No.2, (2004) pp. 1388-1393.
- [10] Yanagi, N., Imagawa, S., Hishinuma, Y., et al., "Asymmetrical normal-zone propagation observed in the aluminum-stabilized superconductor for the LHD helical coils", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.14, No.2, (2004) pp. 1507-1510.
- [11] Imagawa, S., Hamaguchi, S., Yanagi, N. et al., "Upgrading program for improving the cryogenic stability of LHD helical coils by lowering the operating temperature", *Fusion Engineering and Design*, Vol.81, No.20-22 (2006) pp. 2583-2588.
- [12] Imagawa, S., Yanagi, N., Hishinuma, Y. et al., "Results of stability test in subcooled helium for the R&D coil of the LHD helical coil", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.14, No.2, (2004) pp. 1511-1514.
- [13] Imagawa, S., Yanagi, N., Hamaguchi, S. et al., "Improvement in cryogenic stability of the model coil of the LHD helical coil by lowering the temperature", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 16, No.2, (2006) pp. 755-758.
- [14] Shirai, Y., Ohya, M., Ikuta, R., Shiotsu, M., Imagawa, S., "Transient stability of Large Helical Device conductor with and without aluminum stabilizer (2) – numerical results", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 (2007) pp. 2458-2461.
- [15] Noguchi, S., Kawawada, N., Igarashi, H., Ishiyama, A., Yanagi, N., Imagawa, S., "Asymmetrical normal zone propagation analysis considering Hall effect for large aluminum stabilized superconductor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 (2007) pp. 2490-2493.

3. 3. 2 加熱

1) 負イオン方式NB Iの高性能化

LHDには3台の負イオン方式の接線方向の中性粒子入射装置(NB I)が設置されており、LHDプラズマでの高イオン温度、高密度、高ベータなどのプラズマ性能向上に関する実験のみならず、TAE、高エネルギー粒子、イオン温度計測などの物理、計測実験に重要な役割を果たしている(参照3. 1章、3. 2章)。

LHD実験領域拡大とプラズマ性能向上には、NB Iの性能向上が必須となる。そのためには、NB Iの基幹装置である水素負イオン源の高性能化を行うことが、効率が高く合理的である。水素負イオン源高性能化のために必要な項目を以下に示す。

1. 水素負イオン電流の増大。
2. 耐高ビーム熱負荷型接地電極の開発。
3. 水素負イオンビーム輸送効率の改善。

NB Iの動作が安定したLHD実験第8サイクル以降では、上記高性能化の3項目に重点を置き改良を進めた。

負イオン源から引き出されるイオン電流を増加させるためには、(1) LHD-NB I用負イオン源で用いられている250mm×1250mmという広い電極領域からの負イオンビームの均質化、(2) 負イオン生成効量増加のためにアークプラズマに添加されるセシウムの状態の把握が重要となる。項目(1)の負イオンビームの均質化の改善は、イオン源負イオン生成室内のアークプラズマ密度分布の均一化と、負イオン生成面であるプラズマ電極の温度制御に大別される。前者に関して、NB I 3号機ではアークプラズマ密度均一化のために、フィラメント電源とアーク電源を12

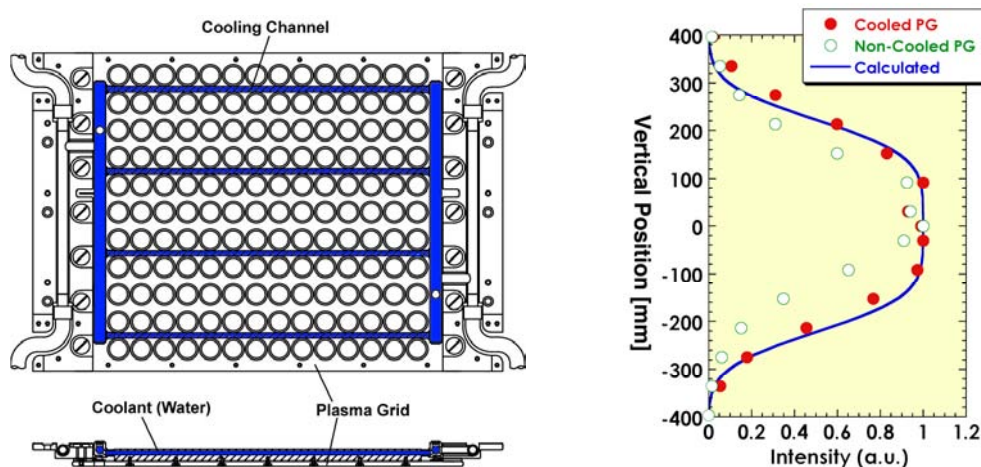


図3. 3. 2. 1-1 プラズマ電極温度調整用冷却系構造体(左、青部)と、同電極より引出された 高均一ビーム分布(右、赤点)

分割し、それぞれ独立に制御可能となっている。これにより高いアークプラズマ密度のバランスを得ている。また、後者に関して、NB I 2号機は第8サイクル時に、温度制御のために図3. 3. 2. 1-1左に示すような冷却構造体をプラズマ電極上に設置し、広い電極領域から今までに無い均一な負イオンビームを得ており(図3. 3. 2. 1-1右)、今後ビーム入射の高パワー化と長パルス化に向けての同方式の展開を目指している。

項目(2)に関して、NB I 3号機では第10サイクルよりイオン源中に導入されたセシウム量と負イオン生成量の相関と、イオン源内のセシウムのダイナミクスの解明を目的とした分光測定を開始した。図3. 3. 2. 1-2に、負イオン生成室内のセシウム添加時プラズマからの典型的な分光スペクトルを示す。青枠で囲った波長460nmのセシウム正イオン(Cs II)に着目すると、図3. 3. 2. 1-3に示したようにアーク放電時と比べビームを引出している時間帯ではセシウム正イオンの発光強度が増加することを見いだした。これは、負イオンビーム引出しにイオン源下流に生成されるビームプラズマからの正イオンの逆流(バックストリーミング)によりイオン源負イオン生成室内に付着したセシウムがたたき出されことに起因している。現在、同分光測定では、負イオン生成室内に測定位置を増やし、同室内のセシウム正イオンの空間分布と時間変化について調査を行い、負イオン生成室内のセシウムのダイナミクスと負イオン生成量との相関についての研究を行っている。

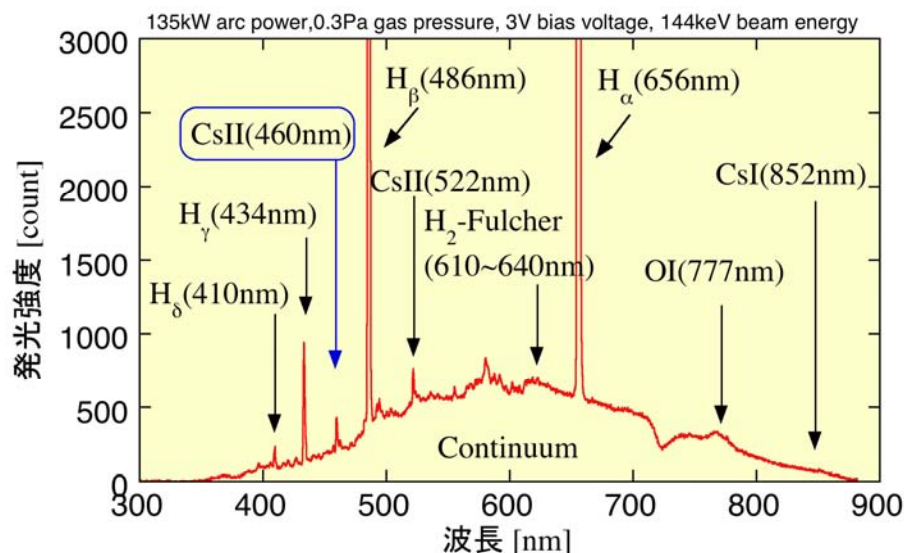


図3. 3. 2. 1-2. 負イオン生成室内のセシウム添加時プラズマからの典型的な分光スペクトル

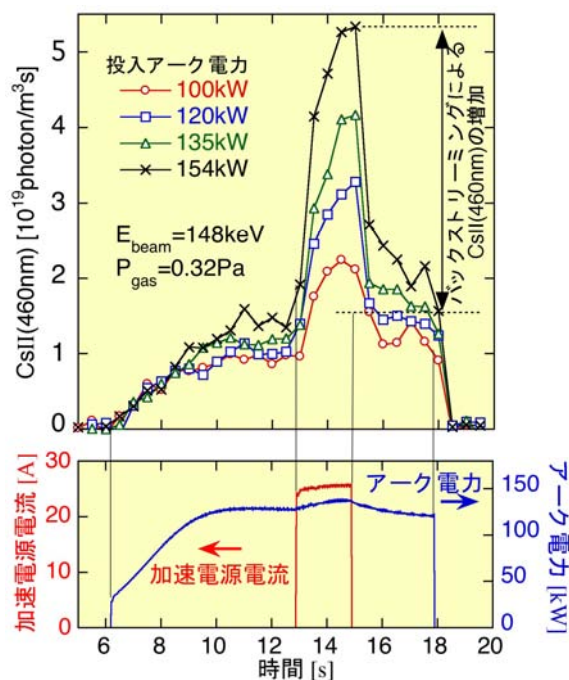


図3. 3. 2. 1-3.
セシウム正イオン・スペクトルの時間変化(上)、アーク放電波形とビーム引出し時を示す加速電源波形(下)

系を用いており、第9サイクルでは、図中3枚の電極のうち接地電極の孔径を14mmから16mmに増加させることでビームの透過率を上げ、同電極への熱負荷を低減している。図3. 3. 2. 1-5はNB I 2号機の第8サイクル以降の最大ビーム入射電力と最大エネルギーであるが、接地電極の改造後に入射電力は30%以上増加し、ビームエネルギーも上昇させることが可能になった。

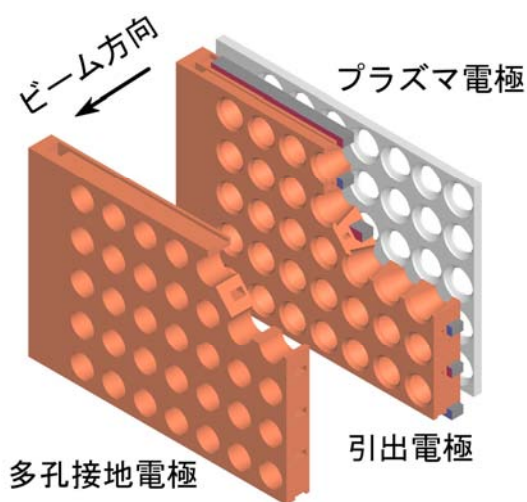


図3. 3. 2. 1-4 円孔型多孔電極系

負イオン電流の増加に伴い、ビーム加速電極群、特に最終段電極である接地電極へのビームによる熱負荷は増大する。負イオンビーム加速では、加速中の負イオンビームがイオン生成室内からの水素ガスと衝突することによって生ずる剥離電子が電極へ熱負荷を運ぶ。水素負イオン生成にはプラズマ放電を使うため、この現象は免れない。このため、我々は接地電極のビーム透過率を上げることにより、電極間ガス圧を低減しつつ剥離電子を含むビームの透過率を上げている。

NB I 2、3号機は、図3. 3. 2.

1-4に示すような円孔型の多孔電極

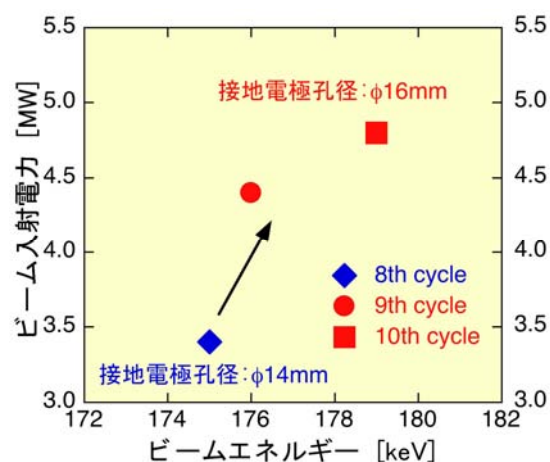


図3. 3. 2. 1-5 接地電極孔径の拡大とビーム入射電力
接地電極孔径 14mm (青点)、16mm (赤点)。

一方、NB I 1号機には、第6サイクルから入射ビーム高出力化のために核融合科学研究所で独自開発した新加速電極系を用いている。この加速電極系は図3. 3. 2. 1-6に示すように、最終段の接地電極に高ビーム透過率に特化した多スロット状電極孔を取付けており、この加速電極系によって、第7サイクルまでにビームライン当り4 MWから5 MW以上のビーム入射電力を得ることができるようになった。しかし、この加速系はスロット電極とその上流側の円孔型ステアリング電極という電界対称性が違う電極の組み合わせのために両電極近傍のビーム収束特性の相違があり、水平・垂直方向のビーム収束条件が一致しないという問題があった。この問題点を解消するために、第10サイクルからステアリング電極の孔形状を円孔からレーストラック孔に置き換えた。両ステアリング電極形状での水平・垂直方向のビーム最小幅を、ビーム収束パラメータである加速・引出電圧比に対してプロットしたものを、それぞれ図3. 3. 2. 1-7に示す。円孔を用いたステアリング電極の場合（左）に比べ、レーストラック孔を用いた場合（右）、水平・垂直方向の最小ビーム幅が、ほぼ同じ電圧比で得られることを見いだした。

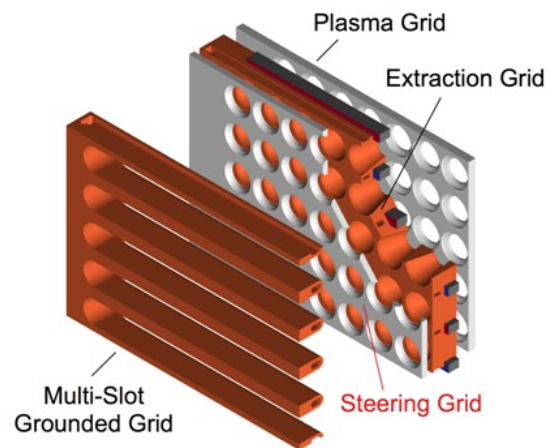


図3. 3. 2. 1-6 新電極系

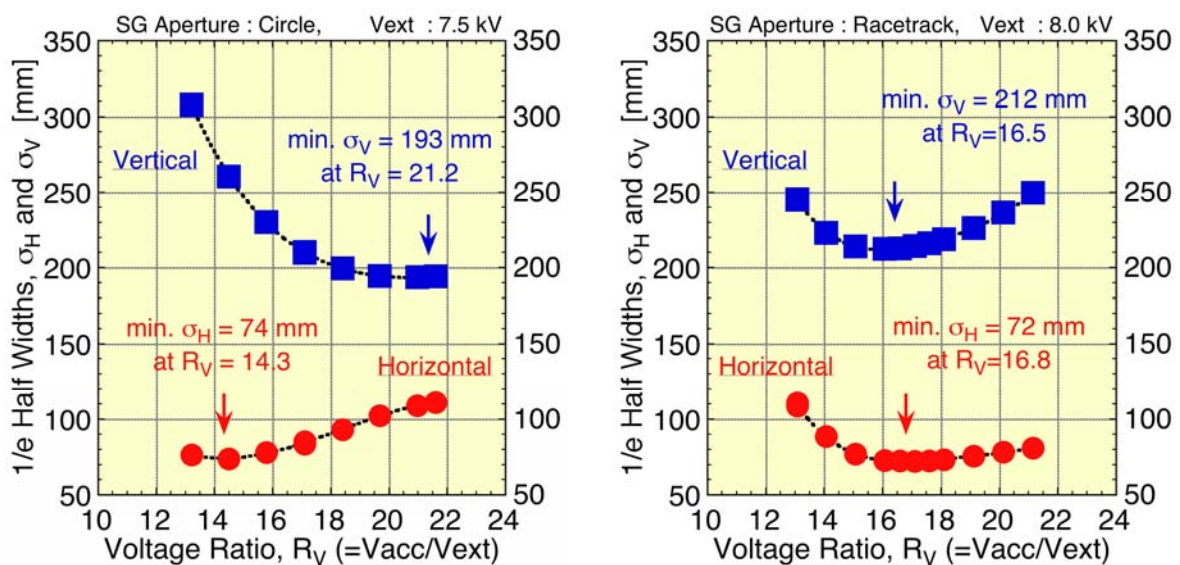


図3. 3. 2. 1-7 円孔型ステアリング電極を用いた加速系(左)とレーストラック孔型ステアリング電極を用いた加速系(右)での、ビーム幅の加速・引出電圧比に対する変化

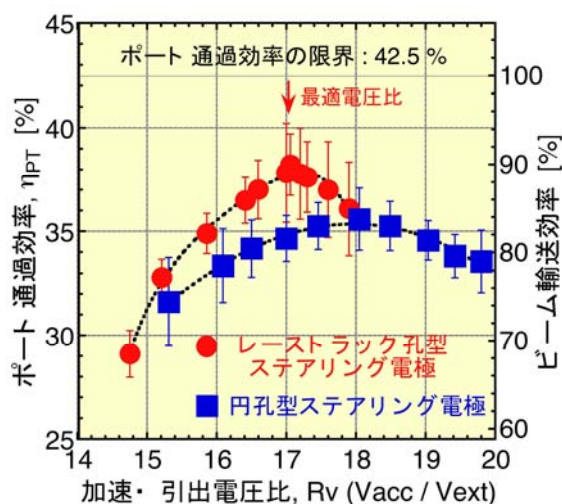


図3. 3. 2. 1-8 加速・引出電圧比に対する
ポート通過効率
赤●:第10サイクル、青■:第9サイクル。

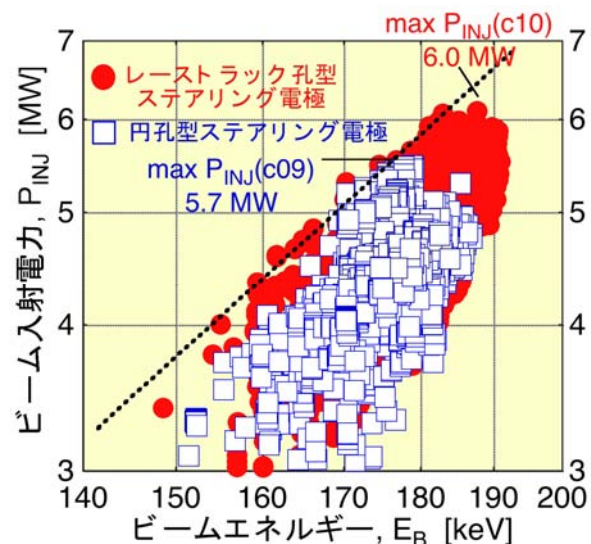


図3. 3. 2. 1-9 ビームエネルギーに対する
ビーム入射電力。
赤●:第10サイクル、青□:第9サイクル。

水平・垂直方向のビーム収束条件の一致により、多スロット電極を用いた加速系でも多孔電極のみの加速系と同様に、入射ビームの38%～40%の高いポート通過効率を得ることができるようになった（参照、図3. 3. 2. 1-8）。この時の最大ビーム輸送効率は、約90%～94%に達する。結果として、多スロット接地電極を備える加速系の場合、図3. 3. 2. 1-9に示すように最大入射電力とビームエネルギーは、それぞれ6.0MWと187keVに到達している。

以上、負イオン方式NBI1号機から3号機までの高性能化の結果、図3. 3. 2. 1-10に示すように、入射電力の総和は第8サイクルでのビームラインのトラブルで一旦減少しているものの年度毎に上昇し、第10サイクルの間に入射電力は増加している。負イオン方式NBIによるビーム入射電力の総和は14MWに至り、第9サイクルから入射を始めた正イオン方式のNBI（参照、3. 3. 2. 2章）を加えると、全入射電力は20MWに到達している。

全入射電力の向上には、各NBIの安定性も重要であり、今後は長期にわたる実験期間でのNBIの安定動作も重要視していく。



図3. 3. 2. 1-10 全NBI入射電力の進展

2) 低エネルギーNBIの開発

【目的と経緯】

LHDにおける低エネルギー中性粒子ビーム入射装置（NBI）の開発は、以下に示す項目を達成することを目的として、平成16年度より検討が開始された。

- ① 荷電交換分光法によるイオン温度&径電場分布計測をする際の中性粒子源として使用する計測用NBI。
- ② 磁場に対して垂直な方向に、その運動エネルギーの大部分を持つような粒子の閉じ込め評価を行う際のプローブビーム源。
- ③ 低エネルギーNBIによるLHDプラズマのイオン加熱源。
- ④ 大電流低エネルギービームによるプラズマ中心に対する粒子補給源。

平成17年度には、前年の検討結果をもとに低エネルギーNBI用のイオン源開発を行った。これと並行して、平成17年度には、計測用低エネルギーNBIをLHDに設置した。このことが、LHDの高イオン温度実験に対して良好な結果をもたらしたことを受けて、平成18年度に、その能力の増強を行った。

【NBIテストスタンドでの開発】

LHD用の低エネルギーNBIの仕様を表3.3.2.2-1に示す。この仕様を満たすイオン源開発を検討するに当たって、もっとも重要な事項は「プラズマ電極の材質及び厚さ」の選択であった。ここで、プラズマ電極とは、イオン源プラズマに面した電極のことであり、イオン源プラズマを生成・維持する為に必要なアーク放電電力の約1/2が、この電極に対する熱負荷となる。LHD用低エネルギーNBIイオン源は10秒程度のビームを引き出す仕様であるので、十分な除熱能力を持ったプラズマ電極が必要である。この為に、ビーム引出孔一列ごとに冷却水パイプを一列配置し、また材質は除熱能力が高く、冷却水などによる腐食に強い「無酸素銅」を使うこととした。

表3.3.2.2-1 LHD 低エネルギーNBIの仕様

イオン源の種類	正イオン
イオン源放電の様式	フィラメント・アーク放電
入射粒子種	軽水素(H)
入射エネルギー	40 [keV]
イオン源の数	4 [台]
入射パルス幅	10 [秒]
イオン源一台あたりのイオンビーム電流	75 [A]
ビーム引出領域	21 [cm] (W) x 55 [cm] (H)

電極構成	加速（プラズマ）・減速・接地電極系
焦点距離	8.3 [m]

イオン源から良質のビームを引き出すには、すなわち、良いビーム光学系を実現するには、プラズマ電極を極力薄くする必要があり、3. 3 mm程度の厚さに抑えることが望ましいと考えられた。一方、機械的及び熱的な強度を考えると、電極にはそれなりの厚さが必要となる。無酸素銅を材質として使用した場合に、電極強度の観点からは4 mmの厚さが必要であると考えられた。この矛盾を解決する為に、NBI テストスタンドにおいて実験を行い、適切な電極厚を決定する必要が生じた。

このことに関連して、イオン源のアーク効率をいかに良くするかということも重要な項目として挙げられた。アーク効率とは、イオン源プラズマの生成・維持に消費したアーク放電電力に対するビーム電流の割合を表す値であり、イオン源の性能を表す指標の一つである。正イオン源では0. 5 – 1 A/kW 程度が典型的な値で、アーク効率が 1A/kW を達成すると性能の良いイオン源とされている。要求されているビーム電流 7 5 A に対して必要なアーク放電電力は、想定するアーク効率によって 7 5 – 1 5 0 k W と大きく変わり、結果としてプラズマ電極に対する熱負荷も大きく変わる。つまり、イオン源のアーク効率がプラズマ電極厚の選択に大きく影響を及ぼす。

アーク効率の良いイオン源を実現する為に、複数の閉じ込め磁場配位形状を検討した。それらの中で、図 3. 3. 2. 2 – 1 に示される二つの配位 (Type-A 及び B) が最終的な候補となった。これらの配位に対して、フィラメント位置を出発点として、電子の軌道計算を行い、フィラメントから発生する一次電子の閉じ込めを評価したところ、「Type-A の配位は、一次電子の閉じ込めが良いという利点をもつ反面、プラズマ電極近傍での一次電子の量が少なく、一様性も悪い」ということが、「Type-B の配位は、その逆でプラズマ電極近傍での一次電子の量が多く、一様性も良いが、一

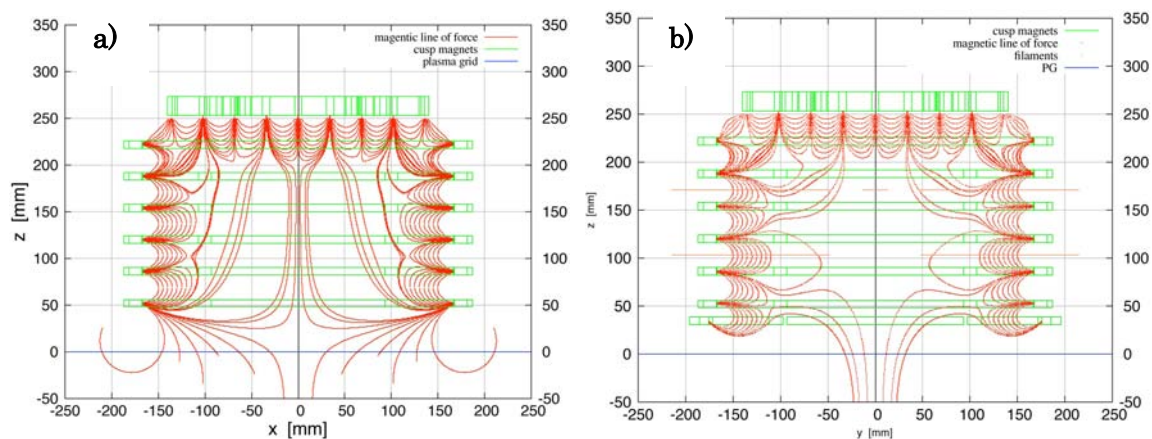


図3. 3. 2. 2 – 1 LHD 低エネルギーNBI 用イオン源の閉じ込め磁場配位の磁力線構造。(a)Type-A、(b)Type-B。図中、赤線は磁力線を表し、青線はプラズマ電極位置を表す。

次電子の閉じ込めが悪い」と言うことがわかった。これら2つの配位のどちらが、より良いアーク効率を実現するかは明確ではない為、同一のイオン源を用いて、2つの磁場配位を比較する実験をNBIテストスタンドにおいて行った。

図3. 3. 2. 2-2に、NBIテストスタンドで行った時の実験結果を示す。この時、プラズマ電極は4mm厚の物を使用した。NBIテストスタンドの電源の制約上、ビーム電流は40[A]に抑えられてしまう為、プラズマ電極のビーム引き出し面の半分をマスクして実験を行った。（この為、この実験でえられたアーク効率は、実際に使用するイオン源の半分程度となった。）この図より、Type-Aの磁場配位のほうが高いアーク効率を示すことがわかる。また、プラズマ電極周辺での一次電子の量よりも、一次電子の閉じ込め特性のほうが重要であることもわかった。この結果から、Type-Aの磁場配位を採用することに決定した。

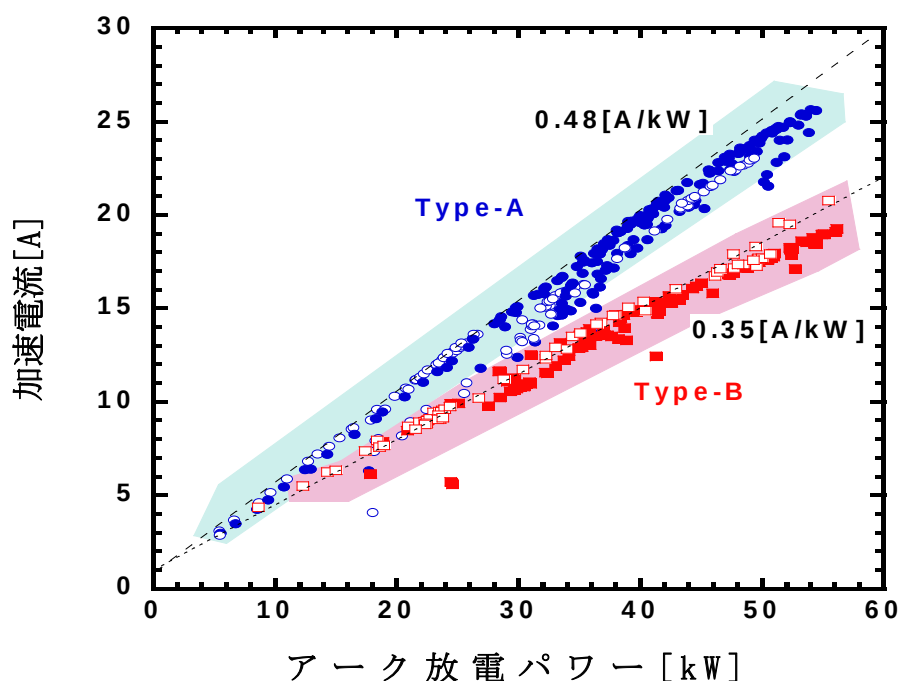


図3. 3. 2. 2-2 Type-A 及び Type-B 磁場配位を使用した時のビーム加速電流のアークパワー依存性。青点が Type-A 配位時の加速電流を表し、赤点が Type-B 配位時のそれらを表す。

Type-A の磁場配位のイオン源を用いて、上述した2種類の厚さ（3.3mm 厚と 4mm 厚）の電極の性能を比較する実験を、NBI テストスタンドのイオン源室カロリメータアレイを用いて行った。図3. 3. 2. 2-3に、その時の結果を示す。図3. 3. 2. 2-3の横軸は、パービアンスと呼ばれる量で表している。パービアンスとはビーム加速電流をビーム加速電圧の1.5乗で規格化したもので、チャイルド・ラングミュア則に従ったビーム電流の加速電圧による規格化を表している。ビーム幅が最小になるパービアンスのことを最適パービアンスと呼ぶ。LHD 低エネルギーNBI 用のイオン源の仕様は、加速電圧 40kV/ビーム電流 75A であるので、最適パービアンスは0.3

$A/kV^{1.5}$ 程度であることが望ましい（電極半分をマスクした場合は、 $0.15A/kV^{1.5}$ ）。図 3. 3. 2. 2-3 より、4mm 厚電極の最適パービアンスは $\sim 0.095A/kV^{1.5}$ であり、3.3mm 厚電極のそれは $\sim 0.11A/kV^{1.5}$ となっている。3.3mm 厚電極の方が目標値（ $0.15A/kV^{1.5}$ ）に近い。このことから、3.3mm 厚電極の方が、より優れたビーム光学系を持っており、また、今回開発した Type-A 磁場配位のイオン源と組み合わせて使用した場合において、3.3mm 厚電極を使用しても機械的及び熱的に十分な強度が得られてい

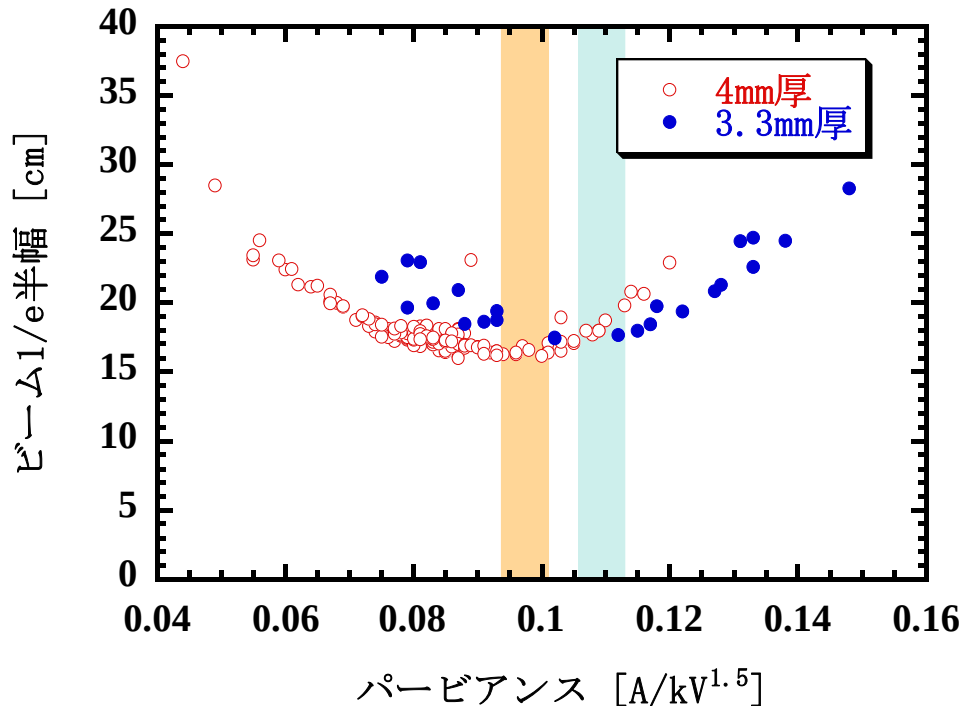


図3. 3. 2. 2-3 ビームプロファイル 1/e 半幅のパービアンス依存性。○印:4mm 厚電極使用時のビーム幅、●印:3.3mm 厚電極使用時のビーム幅。図中のバンドはそれぞれのビームプロファイル 1/e 半幅が最小になる領域を示す。

ることがわかった。ちなみに、3.3mm 電極を使用した時のプラズマ電極と減速電極間のギャップ間距離は 6.5mm であり、チャイルド・ラングミュア則の電極ギャップ間距離依存性（パービアンスはギャップ間距離の 2 乗に反比例する）を考慮にいと、ギャップ間距離を 5.5mm とすることによって、目標値である $0.15A/kV^{1.5}$ が到達しうることがわかる。

テストスタンドでは、電源の制約上、電極の半分をマスクして実験を行ったが、実機においては、一台の加速・減速電源で 2 台のイオン源を運転する仕様となっているので、この電源を用いてイオン源 1 台のみを運転することによって、今回開発したイオン源の最大ビーム電流値を評価することが出来る。図 3. 3. 2. 2-4 に、この時の結果を示す。この図に示されているように、今回開発されたイオン源はイオン源

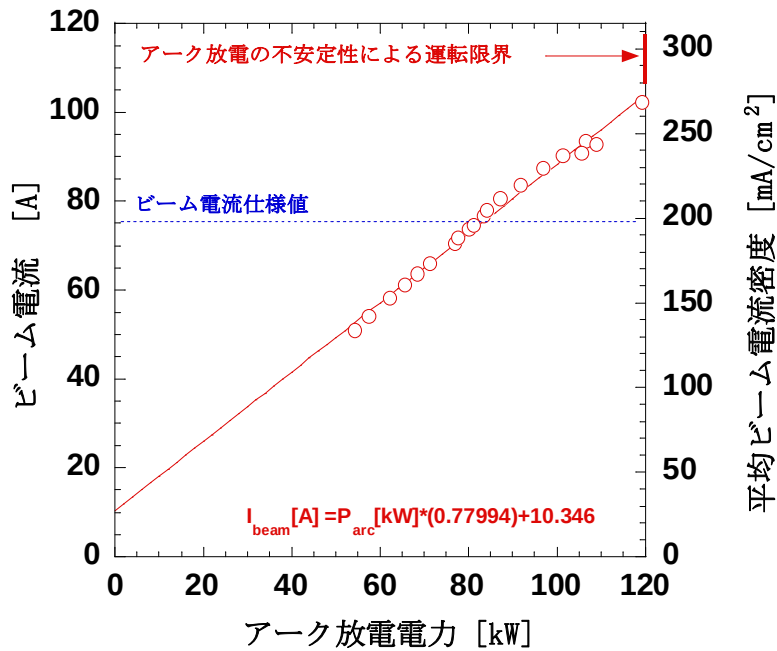


図3. 3. 2. 2-4 LHD 低エネルギーNBI 用正イオン源の
ビーム電流値のアーク放電電力依存性

1 台あたり最大 100 A までのビーム電流を取ることが出来ることがわかった。また、アーク効率が 0.78 A/kW であった。ビーム電流の最大値は、イオン源プラズマを維持する為のアーク放電の不安定性によって制限されている。この時に、並行して最適パービアンスを調べたところ、約 0.28 A/kW^{1.5} となり、ほぼ目標を達成していることがわかった。

【低エネルギービーム入射実験】

テストスタンドで試験されたイオン源の性能を基にビームラインの設計・建設が行われた。LHD5-O ポートから LHD トーラス中心に向けてビームラインを設置し、平成 17 年度には 75 A のイオン源を 2 台導入した。図 3. 3. 2. 2-5 にビームラインの全体写真を示す。第 9 サイクル実験から、低エネルギー NBI の入射が開始された。ビーム入射領域に視線を持つ荷電交換分光システムも同時に整備され、イオン温度の空間分布計測が可能となった。ポロイダル方向の視線では、中心部の発光強度が弱い場合に中心部の計測精度が不十分となることが明らかとなり、トロイダル方向の視線を持つ荷電交換分光システムが追加整備された。これらの計測系の整備により、垂直ビームによるプラズマ加熱の有効性が明らかにされた。特にイオン温度は、垂直 NBI 入射パワーの増加とともに上昇し、イオン加熱の有効性が確認された。さらに低エネルギービームは粒子供給率が高く、プラズマの密度やその分布形状の制御にも有効であることが示された。電子加熱が支配的である高エネルギー接線 NBI 加熱プラズマでは、ホローな密度分布になりやすい傾向があるが、低エネルギー垂直 NBI 加熱プラズ

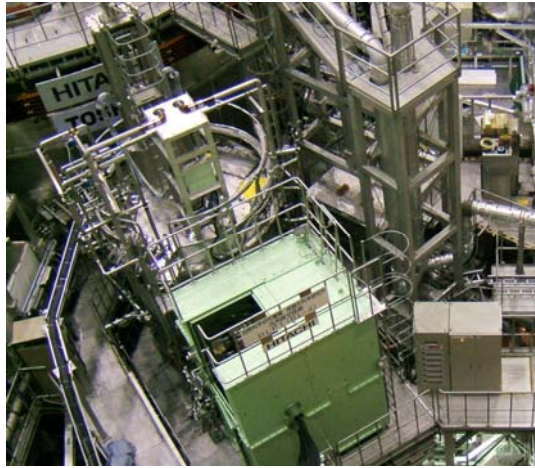
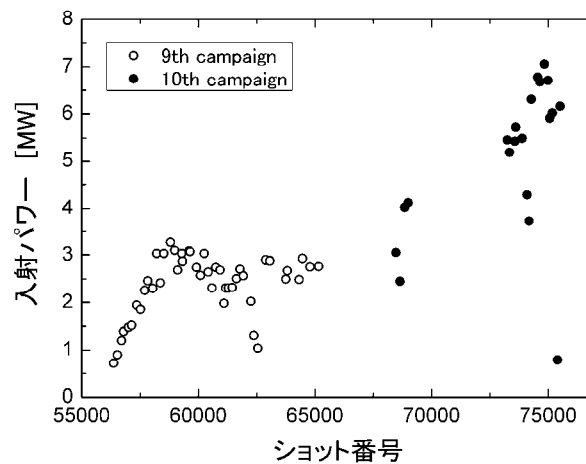


図3. 3. 2. 2-5 LHD 低エネルギーNBI 用ビームライン。緑色のイオン源用磁気シールドボックス内に4つのイオン源が搭載される。



が、中心加熱に適しておりイオン温度の上昇も顕著である。低エネルギー垂直 NBI を用いて中心ピークした密度分布を実現し、高パワー接線 NBI で追加熱することで、6keV を超える中心イオン温度が $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の密度で達成された。図 3. 3. 2. 2-7 に、このときのイオン温度分布を示す。大きなイオン温度勾配を伴う中心ピークしたイオン温度分布が実現されていることがわかる。このとき、中心電子温度は 4keV であり、イオン加熱が支配的である。高密度領域でもイオン加熱は有効であり、 $3.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の中心密度で 3keV の中心イオン温度が達成された。高イオン温度が実現するプラズマでは、イオンの異常輸送が改善されている。同時に非常に大きなトロイダル回転と不純物の吐き出しによる”impurity hole”の形成が観測されている。これらの特徴的な現象は、高イオン温度の実現によって初めて観測され、イオン輸送の研究が新しい展開を迎えている。

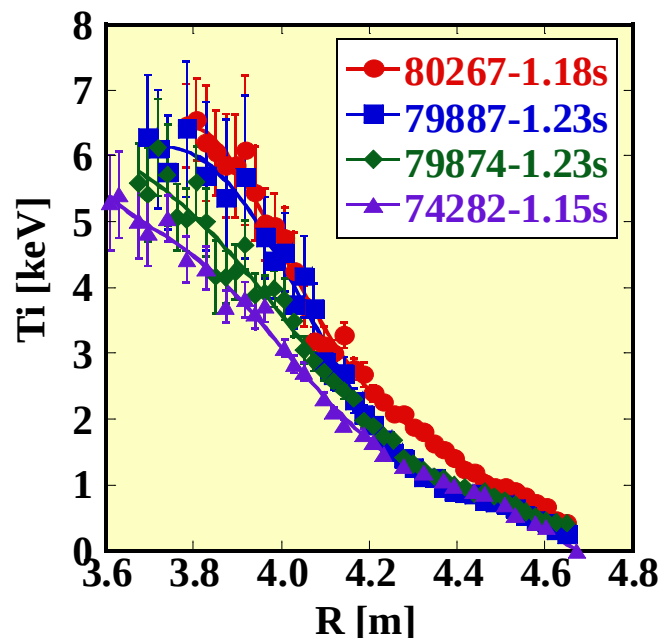


図3. 3. 2. 2-7 高いイオン温度を達成したショットのイオン温度分布。

3) ジャイロトロンと伝送系の改良

ジャイロトロンの改良

1. 平成14年度からジャイロトロン改良の一環として、無冷媒超伝導マグネットの導入を順次行った。冷媒としての液体ヘリウムを全く使わないため、従来のように液体窒素、液体ヘリウムの定期的な供給の必要なくなったことで、電子サイクロトロン波加熱装置に求められる日常運転の安定化に多いに寄与した。

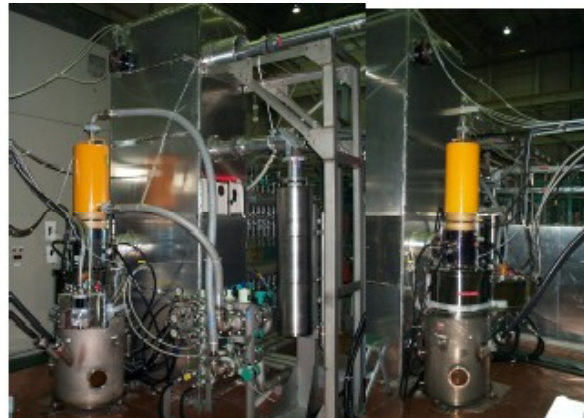


図 3.3.2-3-1 無冷媒マグネットの導入

さらに、この無冷媒型マグネットには永久電流モードスイッチが搭載されており、通常の運転時には、朝夕の立ち上げ、立ち下げ時以外は永久電流モードでジャイロトロンを運転することで、超伝導電源の切り離しを行い、それまで頻繁に起こっていたジャイロトロン高圧電源のサージによる超伝導マグネット用電源のダメージを回避できるようになった。この永久電流モードでの運転も日常運転の安定化、ひいては、マシンタイムの効率利用に寄与している。現在は同じタイプのマグネット(ボア径140mm)を5台導入しており、図 3.3.2-3-1 はこの内2台の運用状況を示す。平成18年度には、さらに、後述する77GHz高出力ジャイロトロン用に大口径ボアの無冷媒マグネットを導入して運用している。なお、原子力機構で開発されているITER用のジャイロトロン用にも同タイプの無冷媒型が採用されている。



図 3.3.2-3-2 77 GHz ジャイロトロン

2. 平成18年度には、筑波大学と共同で新たに77GHz、1MW、5秒(定常では0.3MW)のジャイロトロンを開発し、筑波大学での短パルスでの1MW出力確認を経て、平

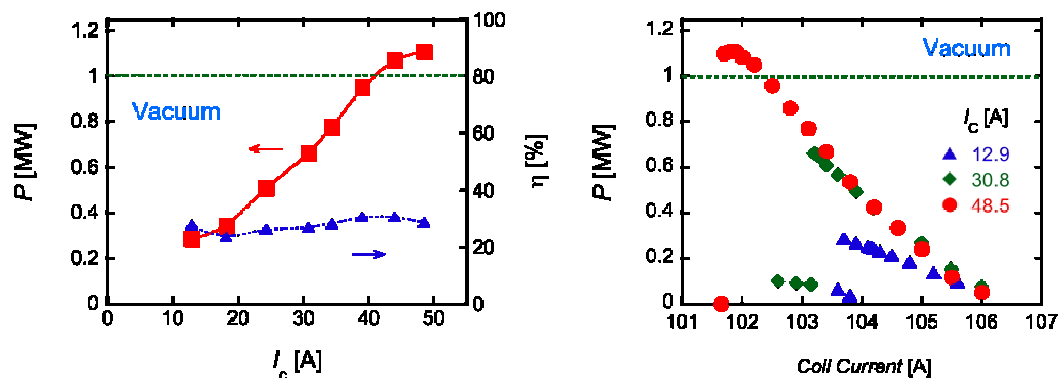


図 3.3.2-3-3 77GHz ジャイロトロンの a) 発振出力と発振効率のビーム電流に対する依存性 b)

平成 19 年度から核融合研に設置して長パルスへのコンディショニング及び LHD への入射を開始した。図 3.3.2-3-2 は、この 77GHz ジャイロトロンを既設ジャイロトロンタンクに搭載した様子を示しており、前述の大口徑無冷媒マグネットと組み合わせて使用している。図 3.3.2-3-3 は、このジャイロトロンの短パルスでの出力特性を示しており、a) には出力と発振効率のビーム電流に対する依存性、b) には各ビーム電流値での出力の磁場強度に対する依存性を示しており、磁場を最適化しながら、ビーム電流を増大させることで目標の出力 1MW 以上が達成されたことを示している。平成 19 年 10 月末までに、500kW ジャイロトロン出力で、5 秒をダミーロード負荷で達成し、LHD 実験に供しながら 800kW ジャイロトロン出力で、2 秒までの運転を達成している。これまでの所、大きな問題はなく、順調にコンディショニングが進んでおり、今後、1MW、5 秒および 0.3MW、1,000 秒までの実証を行ってゆく予定である。



図 3.3.2-3-4 導波管冷却の強化

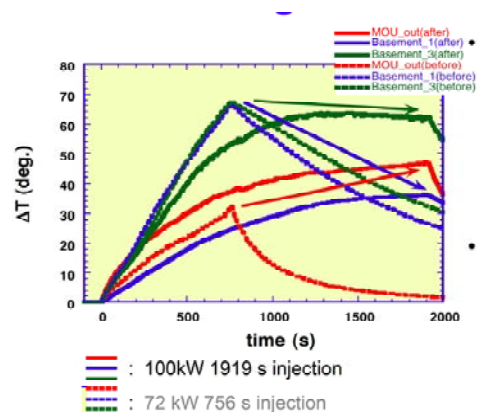


図 3.3.2-3-5 導波管内、および導波管両端の真空度上昇の比較 (点線：改良前、実線：後)

伝送系の改良

1. 熱損失の評価と対策

(A) 平成 15 年度に行った 756 秒入射時の導波管各部の温度測定データを元に、伝送系各部の冷却の強化を行った。冷却方式は、導波管外側から水冷銅パイプを巻き付けるもので、除熱効率と熱伝導の向上のため、銅板を導波管外側外壁に沿った半割のパイプ状に加工して、銅パイプを半田付けしたものをほぼ全経路にわたり巻き付けた(図 3.3.2-3-4)。この結果、測定を行った導波管外側表面の温度上昇は最大 70 度に抑えられ、2000 秒程度の時間で定常値に達した。平成 15 年度の 756 秒 72kW 入射時と平成 16 年度の 1919 秒 100kW 入射時の温度上昇の比較を図

3.3.2-3-5 に示す。これらの結果から、導波管の温度上昇は導波管壁からのアウトガス増大を引き起こし、導波管内の真空度劣化が入射可能なパルス幅を制限することが判明した。導波管内径の小ささから平成 15 年度まで行っていた 2 カ所からの排気では限界があるため、既設の排気ポートに加え、伝送導波管にさらに 9 カ所から排気ができるように、新たに導波管ギャップ型排気

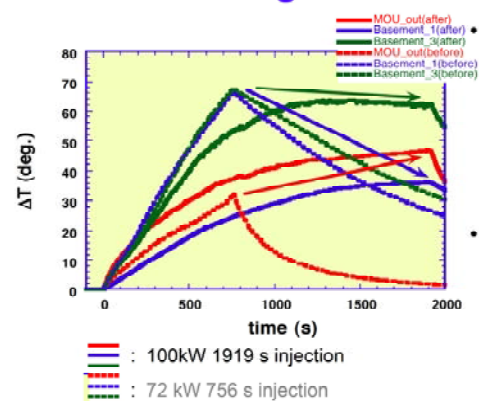


図 3.3.2-3-6 導波管内、および導波管両端の真空度上昇の比較 (点線：改良前、実線：後)

ポートを試作、開発して追加した。図 3.3.2-3-6 に示したのは、平成 15 年度の 756 秒 72kW 入射時と平成 17 年度の 3,900 秒 110kW 入射時の導波管内、ジャイロトロン側導波管真空排気口、および本体側導波管真空排気口の推移の比較であり、前述の冷却強化の効果と相まって特に、導波管内真空度はインターロックレベルより 2 桁低い 10^{-2} Pa でほぼ定常値に達していることがわかる。

(B) このような伝送系の改良、改善を行った結果、LHD 第 8 サイクル中に入射電力 110 kW で長時間入射し、中心温度 1.5keV 電子密度 $1.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ のプラズマを 3,900 秒維持することに成功した (図 3.3.2-3-7)。密度の制御に関しては、より少量のガスを精度よく制御して導入するため、マスフローメータを用いたガス導入システムに切替えて実験を行った。2,000 秒以降、電子密度が上昇し、電子温度が低下しているのは高い電子密度を達成するため、ガスの導入量を増加させた結果である。維持時間はデータ取り込みのための設定時間に達したため手動で停止したものであり、この入射電力、プラズマパラメータにおいては、すべてのシステムは安定、正常に動作し、結果的に LHD の一時間以上の定常プラズマ維持を初めて実証した[3.3.2-3-2]。

参考文献

- [3.3.2-3-1] KUBO, S. et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 47(5A), 2005, pp. A81–A90.
- [3.3.2-3-2] YOSHIMURA, Y et al., Journal of Physics: Conf. Series, 25, 2005, pp. 189-197.

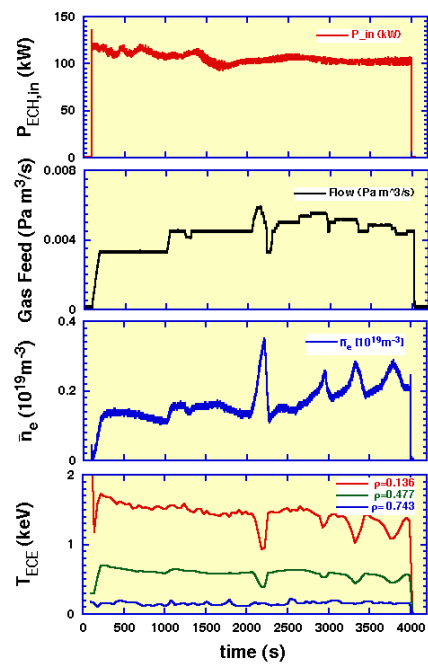
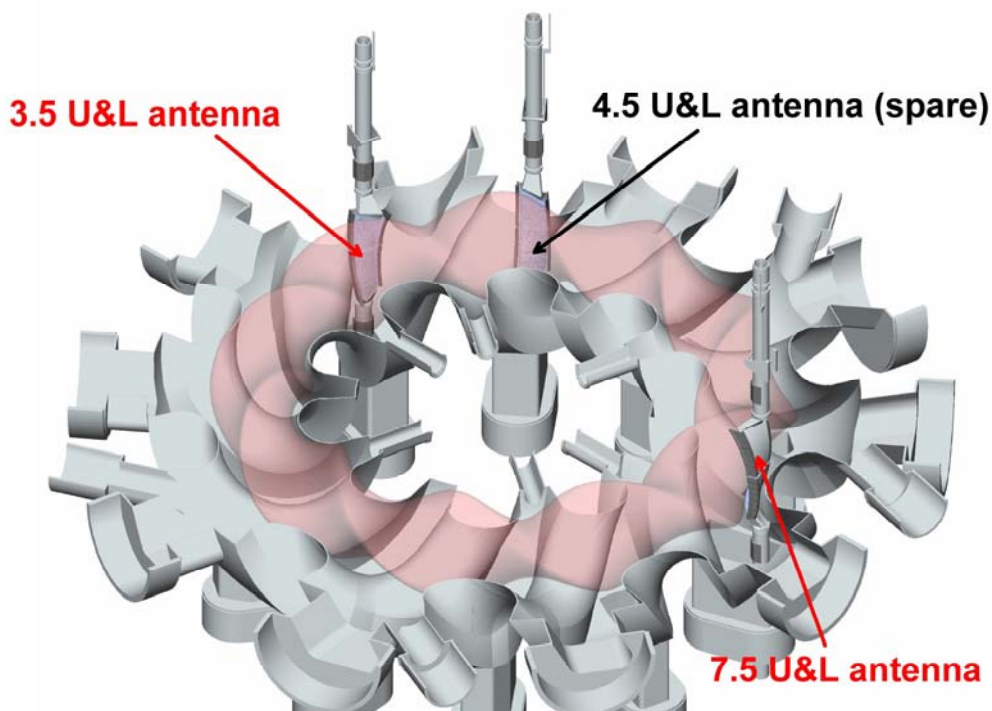


図 3.3.2-3-7 . 110 kW 3,900 秒入射で維持したプラズマの時間推移。上から、入射電力モニター、ガス導入量、プラズマ密度、代表的な ECE による電子温度

4) ICRFアンテナ改良と定常化

LHDにおいてICRF加熱実験を遂行する上で、アンテナ及び高周波伝送路は必須なコンポーネントである。現在3組6本の速波励起用ループアンテナがLHDに挿入されている。図3.3.2.4-1にLHDに搭載されたアンテナの配置図を示す。同時運転可能な現有高周波発振器が4台であることから、3.5及び7.5ポートに挿入された2組4本のアンテナを各発振器に接続し加熱実験に使用している。これらは定常実験での使用も見越して設計・製作されたものであるが、実際に定常実験が進展して行くのに際し不具合が生じたり、また、実験の効率化や安全性を考えて改良が加えられてきた。それらの点について項目毎にその内容について記述する。

図3.3.2.4-1 LHDに設置したICRFアンテナの配置図



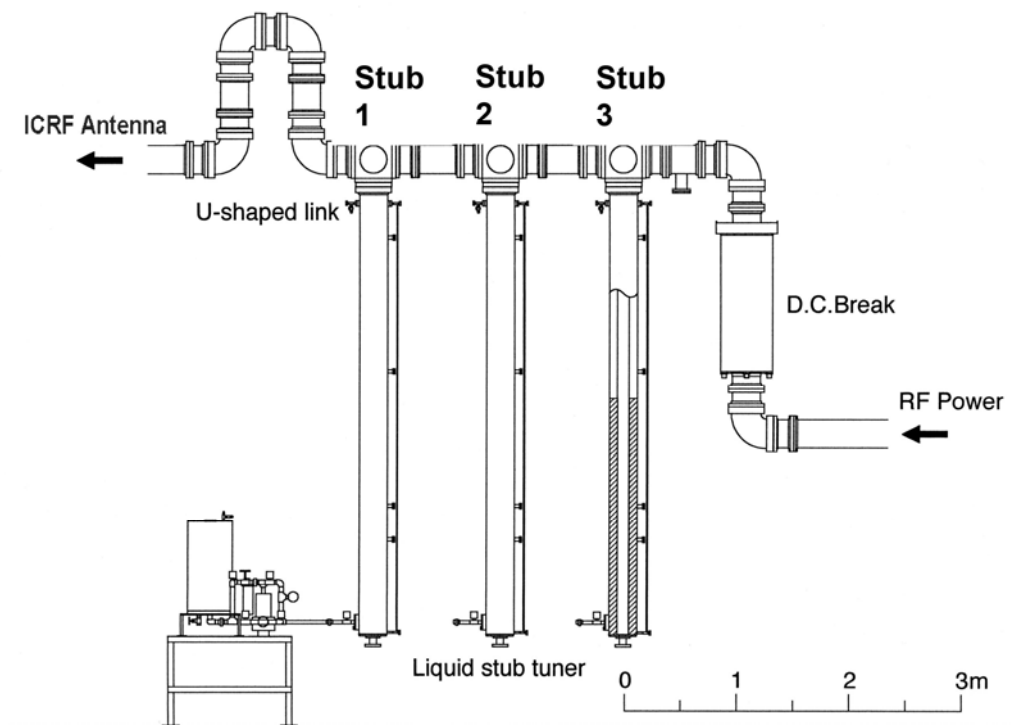
(1) アンテナ放射部及びフィードスルー部の冷却

図3.3.2.4-1は、真空容器内に据え付けられたアンテナの写真である。アンテナは水平方向に可動構造となっており、アンテナ及び同軸伝送路は定常運転時の熱除去のために水冷却している。アンテナ放射部においては、表面に見える静電遮蔽のためのファラデーシールドがSUSパイプでできており、当初は全てのアンテナでその内部を冷却水が流れる構造となっていた。実験終了後の大気開放時の点検により、これらのファラデーシールドのパイプ部分に損傷が認められた。ファラデーシールドの内側と電流ストラップとの間で放電が起き、表面に放電痕が見られた。一番長く使

用している 3.5U,L アンテナにおける損傷が、他のアンテナと較べて特に顕著であった。この対策として、3.5U,L アンテナについては、パイプの肉厚を 1mm から 2.2mm へ厚くするように改造することとした。また、4.5U,L 及び 7.5U,L アンテナについては、SUS パイプの中に銅棒を入れ绞り込んだクッラド材にし、銅の熱伝導により冷却を行う方式を採用した。銅の根元の部分は冷却水により冷やしているが、ファラデーシールド部には水を使わない構造となっており、プラズマに一番近い部分に水を使わないと言うことで、水漏れの危険性を緩和した方式である。従来型の水循環式ファラデーシールドである 3.5U,L アンテナと比べて、加熱の性能が落ちると言うことも見られていない。

アンテナはセラミックフィードスルーを介して LHD の真空容器内に導入されている。セラミックが真空封じ切りに使用されており、発振器側の同軸管内には内導体と外導体の間の耐電圧特性を高めるための絶縁ガスとして窒素ガスが充填されている。定常実験中に、一度 3.5L アンテナにおいてセラミックが過熱されクラックが発生し、窒素ガスのリークが生じた。セラミック直接の温度測定は為されていないが、外導体部の温度で 60〜80℃あり、セラミック部はかなりの高温になったと推測される。窒素ガスは、通常は封入されているだけであるが、外導体に設けてあるノズルを用いて、定常実験時は窒素ガスの吹き付けによりセラミックを直接冷却するように改

図 3. 3. 2. 4-2 液体スタブにより構成されたインピーダンス整合器

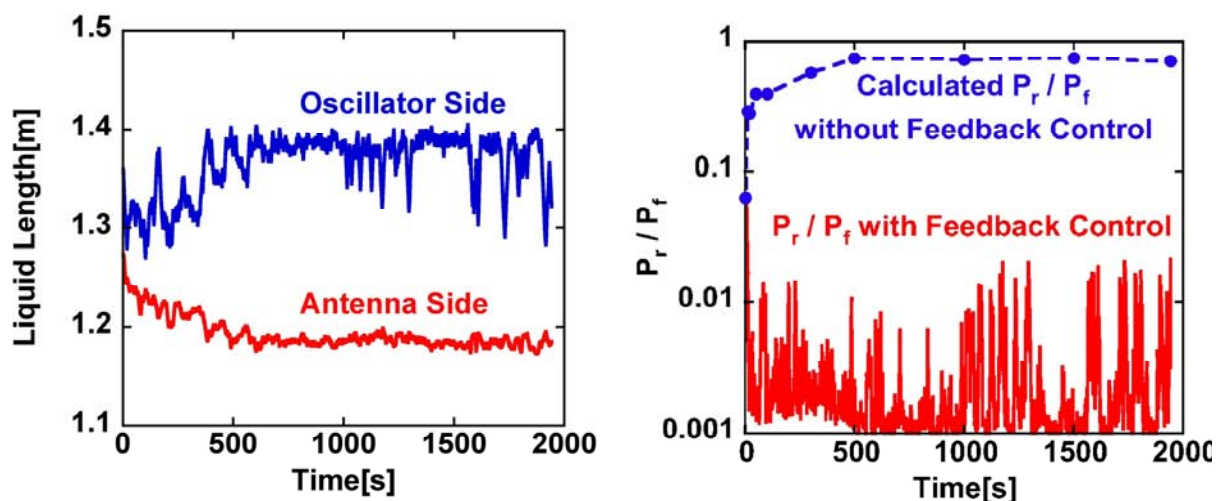


良した。この冷却方式の有効性は研究開発試験により確認済みである。

(2) インピーダンス整合の制御性の向上

定常実験において安定して加熱電力を入射し続けることは大変重要である。長時間 I C R F 電力を入射し続けると、始めは少なかった反射電力が次第に増大し、反射インターロックにより発振が停止することになる。そこで、アンテナ通電中にインピーダンス整合を取る必要がある。従来方式のスタブ整合器は、電気長を変えるための摺動部の構造として、金属が機械的に接触している部分があるため、通電しながらスタブを動かしインピーダンス整合を取るのは容易ではない。図 3. 3. 2. 4-2 に示す様に L H D におけるシステムは、摺動部に液体を採用しているため、通電中に液長を変化させることができ、容易にインピーダンスを変えることができる。インピーダンス整合器は、2 本または 3 本のスタブにより構成されており、液長はポンプとシリンダーの二つの方式により制御されている。当初は手動で液長を変えていたが、コンピューター制御に変更し、完全に自動制御によりインピーダンス整合を取るように改良した。このシステムでは、インピーダンス整合を計算するのに必要な入射・反射電力及び液長のデータを取り込み、整合点を計算して液長の変更を行う。この過程を I C R F 電力が入射されている間繰り返す。図 3. 3. 2. 4-3 は、長時間放電における液長の時間変化と、電力反射率の時間変化を示している。約 2000 秒の I C R F 電力入射の間、液長は約 0.1m 変化している（左図）。電力反射率は、最初 7%程であったが、直ちに 1%以下に減少し、その後は概ね 1%以下に抑えられている。参考にイ

図 3. 3. 2. 4-3 スタブ液面位置と電力反射率の時間変化

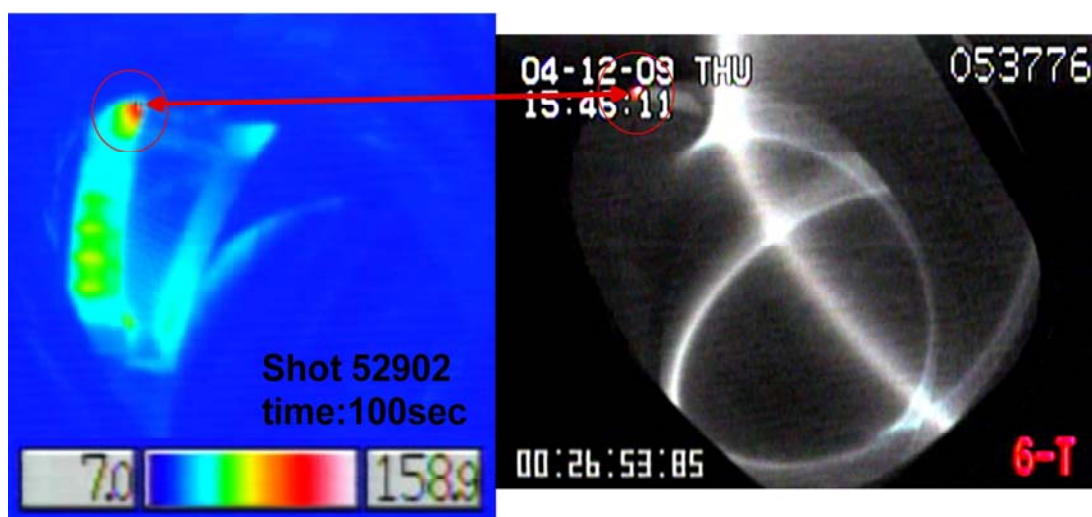


ンピーダンス整合の制御をしなかった場合の電力反射率も示しているが、直ぐに 50%程に上昇し、500 秒以降は約 80%が反射電力となる。システムに改良を更に加え、0.1 秒ほどの短パルスであっても制御できるようになってきている。

(3) アンテナ監視等の強化

実験中のアンテナの健全性を確認する上で、カメラによる目視は大変有効である。CCDカメラを用いた監視は当初から行っていたが、IRカメラを用いた温度測定も追加した。図3. 3. 2. 4-4は、IRカメラによる温度測定の実例である。同様な視線で監視しているCCDカメラの画像も比較として示している。視線は、ほぼ赤道面上で接線方向に7.5Uアンテナを見ている。アンテナのカーボンサイドプロテクターの先端の温度が非常に高くなっているのが観測され、CCDカメラの画像ではホットスポットらしき赤点が同様の位置に見られている。

図3. 3. 2. 4-4 IRカメラ及びCCDカメラにより観測されたアンテナのホットスポットの画像



ICRFアンテナは、当初より大電力定常運転を見越して開発をし、実機的设计・製作をしたが、実際にプラズマ実験に使用しないと分からない点も多く、改良を重ねながら問題点を克服してきた。特に、ICRF加熱の定常運転を本格的に行っている研究所は他にはなく、ITER及び核融合炉でのICRF加熱に対して貴重な技術的な蓄積が為されていると言える。

3. 3. 3 計測

1) トムソン散乱計測器の高性能化

LHDトムソン散乱装置はLHD第2サイクル実験から稼動を始め、1998年9月30日に最初の電子温度分布データ（ショット番号#2819）を提示した。以降、LHD基幹計測機器の一つとしてほぼ全ショットの電子温度・密度分布のデータをルーチ的に取得している。LHDトムソン散乱装置は種々の改良、機器の増強を積み重ね、現在においても世界的にも第一級の性能を有する。現在のLHDトムソン散乱装置の主な緒元を表3. 3. 3. 1-1に示す。

表3. 3. 3. 1-1 現在のLHDトムソン散乱装置の緒元

観測領域	$R = 2.4 \sim 4.9$ [m]
測定空間点	144 [点]
空間分解能	12 $\sim$ 25 [mm]
時間分解能	10 $\sim$ 180 [Hz]
測定温度領域	0.02 $\sim$ 20 [keV]
測定密度領域	$10^{18} \sim 10^{21}$ [m ⁻³]
高エネルギーレーザー	3 [台] SAGA 230
高繰り返しレーザー	3 [台] NY-50

LHDトムソン散乱は当初パルスエネルギー0.5 J/50 Hzの高繰り返しYAGレーザーを用いた測定から開始したが、パルスエネルギー2 Jの高エネルギーレーザーも逐次導入してきた。平成16年度に合計3台の高エネルギーレーザーが整い、以降高エ

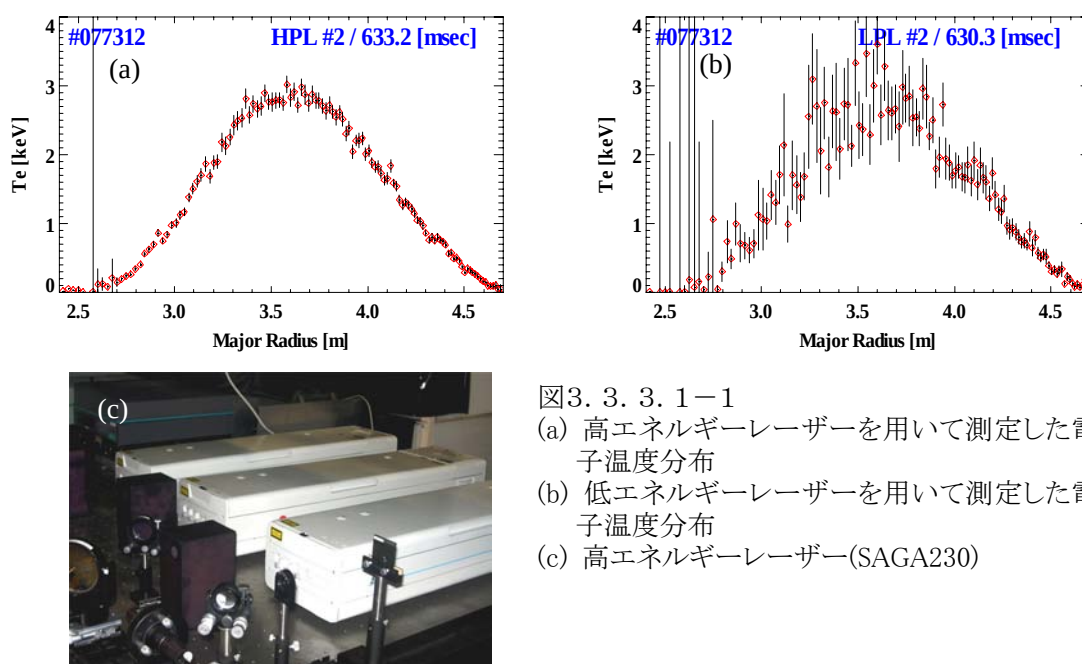


図3. 3. 3. 1-1

- (a) 高エネルギーレーザーを用いて測定した電子温度分布
- (b) 低エネルギーレーザーを用いて測定した電子温度分布
- (c) 高エネルギーレーザー(SAGA230)

エネルギーレーザー30 Hz 相当の運転を基本運転モードとしている。高エネルギーレーザーを用いた測定は高繰り返しレーザーのそれと比べてS/N比と統計が向上し、電子密度にもよるが、データの品質も約4~5倍以上向上する。また、測定可能な密度の下限も引き下げることができた。これにより、電子温度・密度分布に現れる微細な構造の研究や周辺プラズマの研究にいっそう貢献できるようになった。(図3.3.3.1-1)

電子温度はトムソン散乱スペクトルの相対測定から決めることができることに對し、電子密度計測には絶対較正が必要になる。LHDトムソン散乱装置ではこれまでに窒素ガス(または乾燥空気)のラマン散乱を利用した絶対較正を行ってきた。このラマン較正に加え、

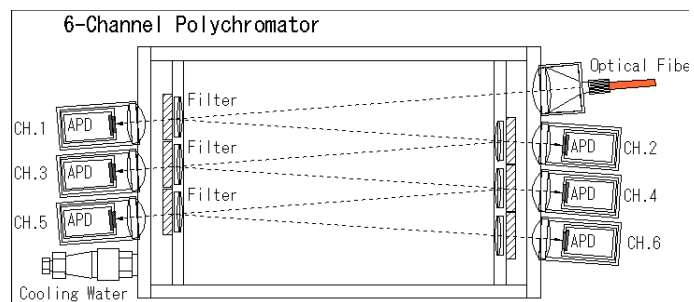


図3.3.3.1-2 6CHポリクロメーター
レイリー較正用にチャンネル6を増設した。

平成18年度に、より精度の高い較正係数が得られることが期待できるレイリー散乱を用いた較正手法の確立のための予備実験を行い、良好な試験結果を得た。この成果を受けて平成19年度には144台全てのポリクロメーターにレイリー較正用のチャンネルを増設した。(図3.3.3.1-2) 加えて、密度測定の長期間にわたる信頼性を検証するために、レーザービームの能動制御システムとビーム監視システムを平成19年度までに構築した。

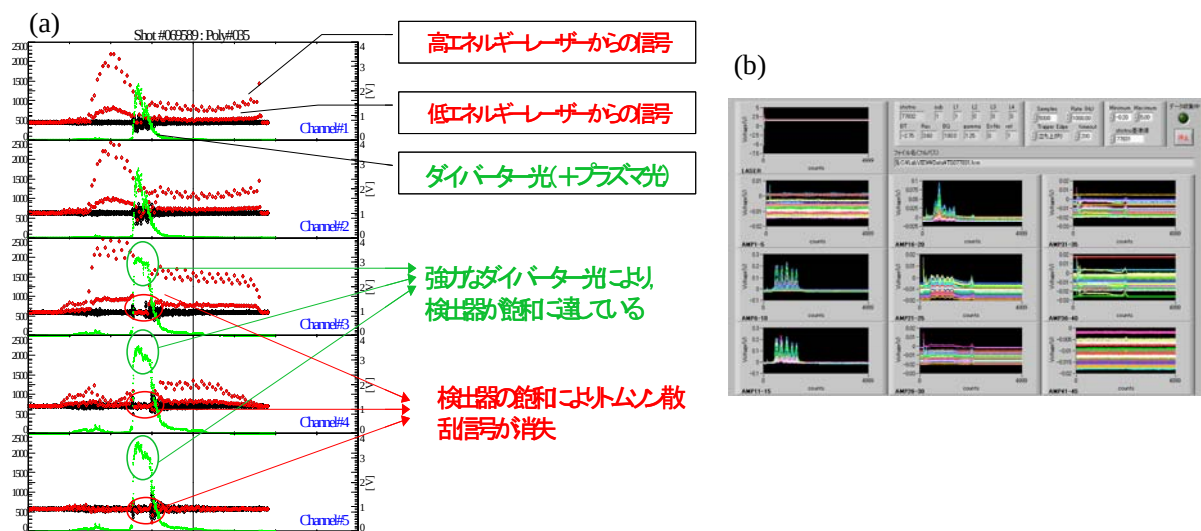


図3.3.3.1-3 (a) トムソン散乱とダイバータ光の生信号, (b) プラズマ光監視システムの画面

近年LHDプラズマの高性能化に伴い、以前では問題にならなかった現象も観測されるようになった。その一つが強力なダイバータ光の影響である。ダイバータ板を見込むポリクロメーターが強力なダイバータ光に晒されることで光検出素子が飽和し、

正しいトムソン散乱信号が得られない現象が起きる。そこで、720 個の光検出器全てにプラズマ光監視システムを取り付け、光検出器が定格以内で動作していたか否かを確認してデータの信頼性の判定を行っている。このシステムは平成17年度に完成し、平成18年度からルーチン的に稼動している。(図3. 3. 3. 1-3)

以上のように、LHDトムソン散乱装置は基幹計測機器の一つとしてLHDプラズマの電子温度・密度分布をルーチン的に測定するとともに、LHDプラズマの高性能化やプラズマ物理研究からの期待に応えるべく、高性能化に努めている。

2) 炭酸ガスレーザー計測を用いた密度/揺動計測

3. 3. 3. 2-1 イメージング干渉計による密度分布計測

LHD は高密度運転に優れた装置である。既存の遠赤外線レーザー (波長 $119\mu\text{m}$) は、密度勾配による入射レーザービームの屈折の影響で信号強度が減少し、位相がジャンプする位相ジャンプという現象が起こり $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ 以上の密度で計測が困難になる。そこで、高密度でも安定して計測が可能な新しい計測手法として屈折の影響をほとんど受けない波長 $10.6\mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザーを用いた新しい炭酸ガスレーザーイメージング干渉計を開発した[1,2]。図 3. 3. 3. 2-1 に計測システムを示す。3本のシート状のビームを入射し、それぞれのビームを多チャンネル検出器で計測するシステムである。32チャンネルの検出器を2台、16チャンネルの検出器を1台用いて、合計80チャンネルの多チャンネルシステムを実現した。本システムはイメージング光学系を採用し、球面収差による像のボケが最小になるように光学部品的位置を最適化した。また、短い波長を使うため遠赤外線レーザー干渉計では問題とならなかった機械的振動の影響による計測誤差が生じ、これを補正するために炭酸ガスレーザービームと同軸に YAG レーザー干渉計を設置して振動を計測し振動補正を行った。トムソン散乱でも密度分布の計測は可能であるが、トムソン散乱は散乱光強度から電子を決定するため、レーザー光の揺らぎや、プラズマからの放射光に影響を受けやすい。一方、干渉計は計測量が位相変化の計測であり、レーザーの出力変化や、プラズマ放射光の影響を受けず、計測精度が高いこと、および連続的な計測 (平成 18 年度は $100\mu\text{sec}$ 時間分解で運転、平成 19 年度は $1\mu\text{sec}$ 時間分解で運転を予定) が可能であるという特徴がある。図 3. 3. 3. 2-2 に計測断面での計測ビームパスを示す。

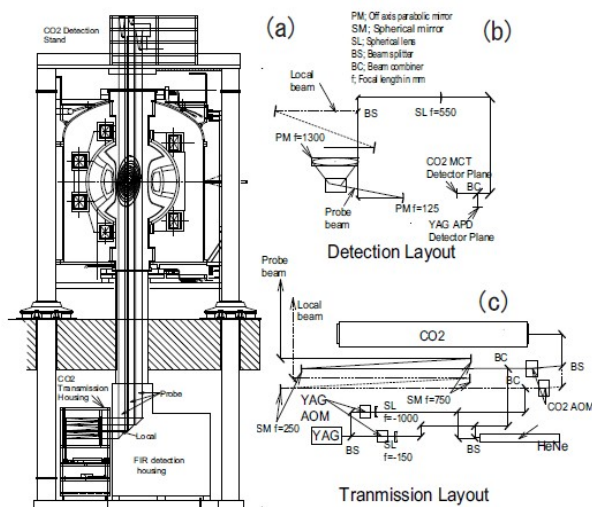


図3. 3. 3. 2-1
炭酸ガスレーザー干渉計
(a) システム全体図(b)レーザー部(c)検出部

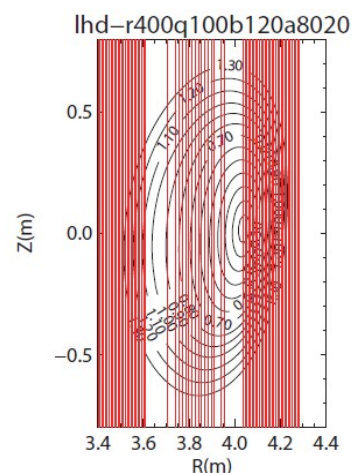


図3. 3. 3. 2-2
測定断面と計測コード

図に示すようにプラズマの全領域の計測が可能である。測定コードの間隔は両サイドの 32 チャンネルのビームでは 7.5mm 間隔、中心の 16 チャンネルのビームでは 15mm 間隔である。図 3. 3. 3. 2-3 に積分密度の計測例を

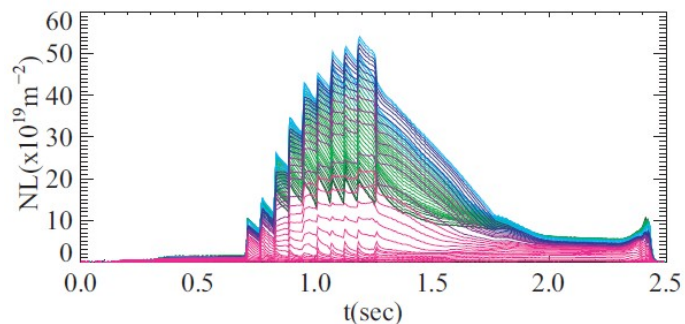


図 3. 3. 3. 2-3 積分線密度の測定例

示す。図に示すようにプラズマが存在しない領域には計測チャンネルを設置することによりプラズマの密度がゼロとなる位置を実験的に精度よく決定できる。図 3. 3. 3. 2-3 は 2 本のシートビームを用いて 64 チャンネルで計測したものである。図に示すように位相ジャンプがまったく起こらず安定して計測されていることがわかる。

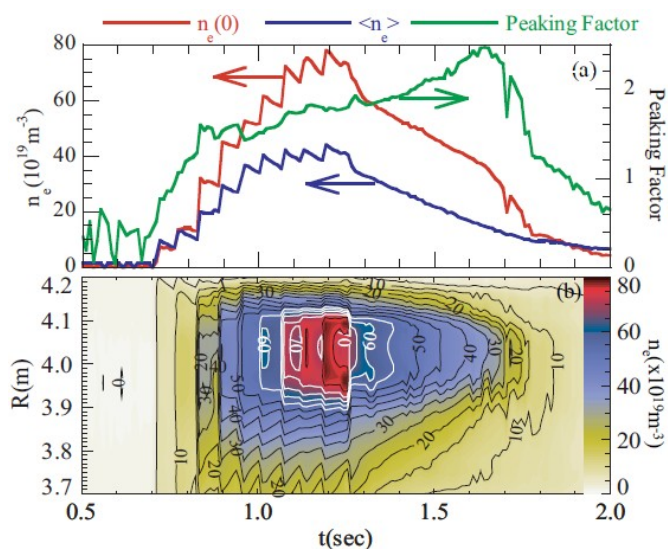


図 3. 3. 3. 2-4 (a) 中心密度、体積平均密度、peaking factor の時間変化 (b) 赤道面上の密度分布の時間変化

図 3. 3. 3. 2-4 に図 3. 3. 3. 2-3 のデータをアーベル変換して求めた密度分布の時間変化と、中心密度、体積平均密度（最外殻磁気面内の体積で平均）、およびその比（中心密度/体積平均密度）で定義した peaking factor の時間を示す。1.2sec まで連続ペレットが入射され、中心密度が $8 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ に達した。1.2sec 以降中心密度体積平均密度は減少するが peaking factor が増大し、1.7sec 付近

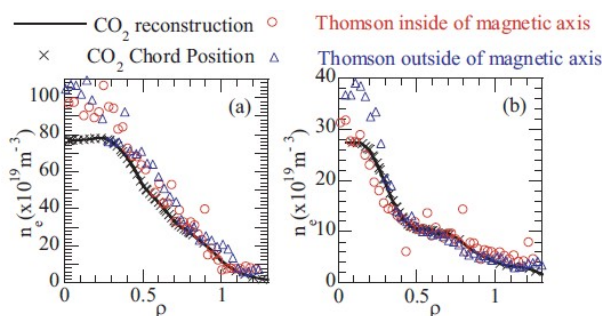


図 3. 3. 3. 2-5 炭酸ガスレーザー干渉計とトムソン散乱の密度分布の比較 (a) $t=1.2\text{sec}$ (b) $t=1.7\text{sec}$

で最大値に達した。図 3. 3. 3. 2-5 に $t=1.2\text{sec}$ と $t=1.7\text{sec}$ の密度分布のトムソン散乱計測との比較を示す。トムソン散乱は絶対比較正されておらず、信号強度分布が密度分布に比例するとし、絶対値をトムソン散乱のレーザービームのパスと同等なパスをもつ、マイクロ波干渉計と比較することにより決定した。図に示すように両者の分布形状は類似しているものの、プラズマ中心付近の密度に差がある。この差は

トムソン散乱の校正係数、炭酸ガスレーザー干渉計のアーベル変換に用いた平衡データの磁気軸付近の誤差による可能性があり、その両者について現在検討を進めている。

3. 3. 3. 2-2 位相 コントラストイメージング による電子密度揺動計測

LHD ではほとんどの運転領域で閉じ込めは乱流が支配する異常輸送で決まっている。実験的に乱流揺動の物理的特徴とパラメータ

一依存性、および閉じ込め性能との相関を明らかにすることが必要である。そこで、炭酸ガスレーザー干渉計のレーザービームを分岐し図 3. 3. 3. 2-6 に示すようなレーザー位相コントラストイメージングにより乱流揺動の計測を行った[3,4,5]。この手法はプラズマ中にレーザーを入射し、プラズマ中の電子密度揺動による散乱光と散乱しない透過光を混合検波することによって高感度の電子密度揺動計測を行う手法である。炭酸ガスレーザーを用いるので、散乱体積の長さがプラズマサイズより長くなり、通常の散乱計測では局所情報を得ることができない。そこで、乱流揺動が磁力線に対して垂直方向には、イオンまたは電子のラーモア半径程度であるのに対し、磁力線と平行方向には波長が極めて長く連結間距離程度になること、および、LHD では磁力線の方法が空間的に大きく変化することを利用し、48 チャンネルの 2 次元検出器を用いて局所情報を取得することに成功した。位相コントラストイメージングの結像倍率を変えることにより波長が 2mm から 60mm の乱流揺動の計測が可能である。

図 3. 3. 3. 2-7 に乱流揺動の計測例を示す。局所的な周波数スペクトルと波数スペクトル

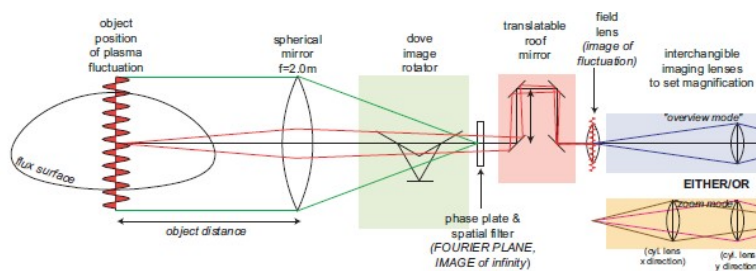


図3. 3. 3. 2-6 2次元位相コントラスト干渉計システム

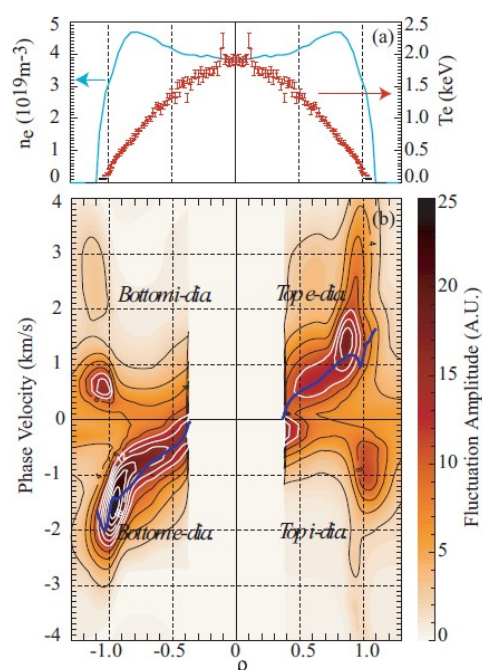


図3. 3. 3. 2-7 (a) 電子密度、温度分布 (b)乱流揺動の空間分布。青線は ExB 回転速度

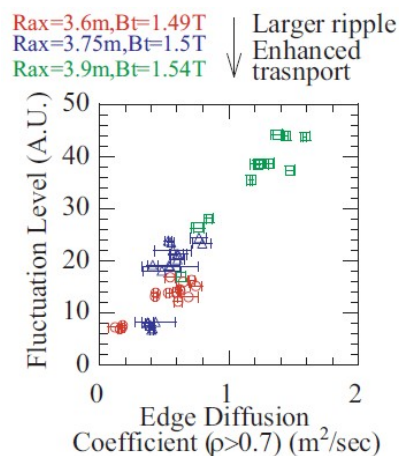


図3. 3. 3. 2-8 周辺揺動レベルと周辺拡散係数

が計測できるのでそれから局所的な乱流の位相速度の計測が可能となる。図に示すように規格化位置(ρ)が 0.4 から 0.9 程度までは位相速度が増大し、 $E \times B$ 回転速度とほぼ一致する。 $\rho=0.9 \sim 1.1$ 付近にかけて位相速度は電子の反磁性方向からイオンの反磁性方向に大きく変化する速度シヤを形成している[6]。図 3. 3. 3. 2-8 は磁気リップルの大きさが異なる三つの磁場配位でのイオンの反磁性方向の乱流揺動の揺動レベル(揺動振幅/電子密度)と周辺の粒子輸送係数の相関を示す。揺動レベルは図 3. 3. 3. 2-7 のイオンの反磁性方向に進行している成分の振幅と $\rho=0.7 \sim 1.1$ における平均電子密度の比で定義した。それぞれの磁場配位で中性粒子ビームの加熱入力を変えることにより粒子閉じ込め性能を変えた。図 3. 3. 3. 2-8 に示すように拡散係数が増大するにしたがって揺動レベルも増大する[7]。また、ヘリカル磁気リップルの大きい外寄せ配位になるにつれて拡散が増大し揺動レベルも増大する。磁気軸が外寄せになるほど新古典輸送は増大する。しかし、実験では粒子輸送係数は新古典輸送係数より一桁以上大きい異常輸送である。図 3. 3. 3. 2-8 の結果は新古典輸送が大きくなると乱流揺動が増大し異常輸送も増大することを示している。

1. K.Tanaka, C. Michael, L. Vyacheslavov, A. Sanin, K.Kawahata, S. Okajima, T. Akiyama, "Improvements of CO2 Laser Heterodyne Imaging Interferometer for Electron Density Profile Measurements on LHD" Plasma and Fusion Research 掲載予定
2. K. Tanaka, A. L. Sanin, L. N. Vyacheslavov, T. Akiyama, K. Kawahata, T. Tokuzawa, Y. Ito, S. Okajima, "Precise Density Profile Measurements by using a Two Color YAG/CO₂ Laser Imaging Interferometer on LHD", Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, (2004) pp.3429-3433
3. A.L. Sanin, K. Tanaka, L.N. Vyacheslavov, K. Kawahata, T. Akiyama, "Two-dimensional Phase Contrast Interferometer For Fluctuation Study on LHD", Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, (2004) pp.3439-3441
4. L.N. Vyacheslavov, K. Tanaka, A.L. Sanin, K. Kawahata, C. Michael, T. Akiyama "Imaging of Turbulence Structure on LHD Using 2D-Phase Contrast" IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.33. (2005) pp.464-465
5. C. A. Michael, K. Tanaka, L. Vyacheslavov, A. Sanin, K. Kawahata, and S. Okajima, "Upgraded two-dimensional phase contrast imaging system for fluctuation profile measurement on LHD", Rev. Sci. Instrum. Vol. 77, (2006) pp.10E923-1-10E923-5
6. K.Tanaka, K.Kawahata, C. Michael, L.N. Vyacheslavov et al., "Experimental study of particle transport and density fluctuation in LHD" Nuclear Fusion Vol 46v(2006) pp. 110-11
7. K. Tanaka, K.Kawahata, T. Tokuzawa, M.Shoji et al., "Effect of magnetic configuration on density fluctuation and particle transport in LHD" Fusion Science and Technology VOL. 51, (2007) pp.97-111

3) 6 MeV HIBPの開発

重イオンビームプローブ(HIBP)は磁場閉じ込め高温プラズマ内部の電位を計測することができる計測装置である。この装置では、高エネルギーに加速された重イオンを磁場閉じ込めプラズマ中に入射し、プラズマ内で電離が1つ進んだイオンを取り出す。入射したイオン(1次ビームと呼ぶ)と取り出したイオン(2次ビームと呼ぶ)のエネルギー差は、そのイオンが電離した位置のポテンシャルエネルギーに相当するので、このエネルギー差を測定することによってプラズマ内の電位を測定できる。また、原理的に高い時間分解能を得やすいことから、電位の動的な振る舞いを調べることができる可能性を持つ。さらに、2次ビームの電流量はプラズマの密度に依存するため、その変動を調べることで密度揺動を同時に計測できる可能性も併せ持っている。このため、プラズマ中の輸送現象を理解するための強力な計測器である。一方、大型装置に適用する場合、プローブ用ビームの高エネルギー化(LHD用HIBPの場合は6MeV)、プラズマ中でのビームの減衰の増大などが克服すべき課題として存在する。このためLHD計画開始の初期から開発研究が開始され[1]、平成15年度末にLHD真空容器内にビームを入射することに成功した。

平成16年度の実験において、ビーム強度の減衰に対応するために検出器にマイクロチャンネルプレート(MCP)を採用した。MCPはこれまでに筑波大学のタンデム型装置GAMMA-10における約10keVのビームプローブにおいて採用されているが、MeV領域の重イオンビームに対しての使用は初めての試みであった。実機におけるテスト後検出器として使用し、2次ビームの検出に初めて成功した。実験結果を図3.3.3-1に示す。この実験では放電中にビームの入射、停止を1Hzで繰り返している。ビーム入射時のみ2次ビーム信号が得られており、プラズマ中で生成された2次ビームを検出できたことが初めて確認できた。この段階では2次ビーム信号強度が10pA程度であり、信号強度を増加させることが依然重要であることが再確認された。また、エネルギー分析器の調整等も必要であったため、電位計測までは行えなかった。

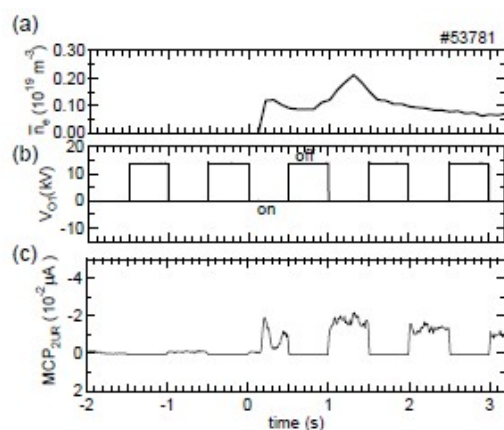


図3. 3. 3-1(a)線平均電子密度、(b)ビームの入射方向制御用電圧。0kV の時間帯にビームがプラズマに入射される。(c)2次ビーム強度信号(MCP の出力電流)。

平成17年度に、後述するように前年度から開発を進めていた高出力イオン源を実機に導入することにより、入射ビーム強度の増加と安定した運転が可能となった。また、18年度にHIBPシステム全体を通してのエネルギー分析の確認試験を行うことができた[2]。その結果を図3.3.3.3-2に示す。この実験ではエネルギーをわずかに変化させた1次ビームを入射した時、2次ビームのエネルギー分析によってその変化を分析できるかどうか調べた。図に示すように入射エネルギーの変化に相当するエネルギーの変化が分析できおり、この結果から原理的にこのHIBPによりLHDプラズマの電位計測が行えることが確認できた。

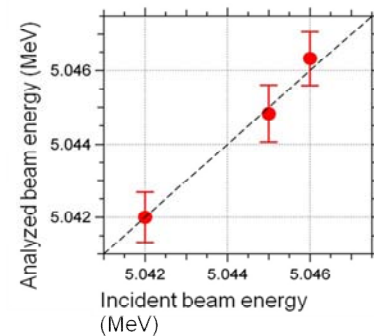


図3.3.3.3-2 エネルギー分析試験結果。横軸は入射ビームエネルギーの設定値、縦軸は分析した2次ビームのエネルギー。

これらの成果に基づき、プラズマ電位分布の計測を試みた。その結果線平均電子密度 $0.5 \times 10^{19} (\text{m}^{-3})$ 程度の低密度プラズマ内部の電位は真空容器電位に対して正になっていることが観測された。この正電位は、この放電が低密度であることから電子ルートによる電場が形成されていることを示していると考えられる。しかしながら新たに、ECH重畳時に信号が検出できなくなることや、ビーム強度信号の振る舞いが予想と大きく異なるという問題点が明らかになり、電位分布の評価までは至らなかった。

後者の問題点に関しては、ビーム軌道及び発散角の制御が不十分であることが原因として考えられた。このため平成18年度においては入射ビームラインにビームの入射角度検出器を新設し、入射角度の調整精度を上げた。また発散角の制御に関しても入射ポート直前に設置したビームプロファイル検出器とビーム光学に基づく軌道解析を組み合わせる最適化する手法を整備した。これらによりビーム軌道制御の精度が向上し、2次ビーム信号強度分布も予測される形状の分布が得られるようになった。

図3.3.3.3-3にECH重畳による電子内部輸送障壁形成時のプラズマ中心近傍における電位分布の変化の計測例を示す。図3.3.3.3-3(b)に示す電子温度分布から、ECH重畳時間帯において図中 $R=3.4\text{m}$ 、 3.9m 近傍に電子温度勾配の急峻化が見られており、ここで輸送障壁が形成されていることが分かる。この時HIBPによって計測された電位分布の変化を図3.3.3.3-3(c)に示す。ただし、プラズマ電流の変動に伴うポロイダル磁場の変動が引き起こすプローブビームの動きにより、電位分布形状の見積もりに大きな誤差が生じてしまうという問題が生じたため、その影響を軽減するためにここではECH重畳前の電位分布からの変化量を示し

ている。ECHを重畳することにより正の電位が形成されている。また電子温度分布勾配の急峻化が見られている場所に対応する $Z \sim 0.35\text{m}$ 近傍に電位勾配の変化が見られており、ここで電場シアが形成されていることが示唆される。この結果は、異なる磁場配位であるが過去に荷電交換分光(CXS)によって計測された結果と定性的に一致している。また電位分布が電子温度分布と関連していることを示す観測結果も得られている[3]。

さらに、HIBPの高時間分解能という特性を生かし、電子輸送障壁形成時の障壁内部における電位の時間変化を調べた結果を図3. 3. 3. 3-3(d)と(e)に示す。障壁形成後、電位信号に間欠的な負のスパイクが現れる現象が観測された。このような

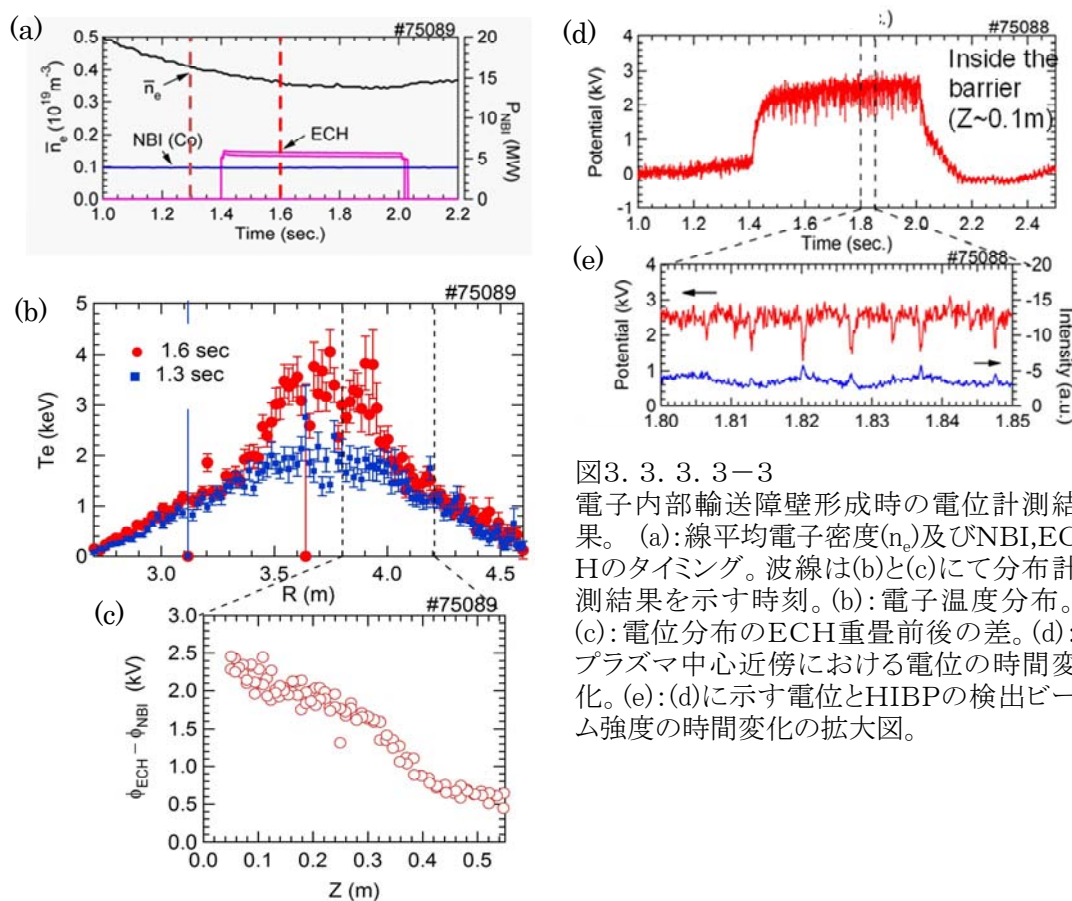


図3. 3. 3. 3-3
電子内部輸送障壁形成時の電位計測結果。(a):線平均電子密度(n_e)及びNBI,ECHのタイミング。波線は(b)と(c)にて分布計測結果を示す時刻。(b):電子温度分布。(c):電位分布のECH重畳前後の差。(d):プラズマ中心近傍における電位の時間変化。(e):(d)に示す電位とHIBPの検出ビーム強度の時間変化の拡大図。

現象はCHSにおいても観測されており、**Pulsation** と名付けられて報告されている。CHSの実験結果からは、**Pulsation** は新古典論に基づく電場分岐に起因するものであると結論されている。現在、LHDにおいて観測された現象が新古典論によって説明可能か否か解析・検証を進めている。いずれにしても、プラズマ・パラメータの異なるLHDにおいて類似の現象が観測されたことは、これまで構築された電場構造形成に関する理論モデルの検証・精密化を行い、さらに核融合炉におけるプラズマ輸送の予測精度を向上させるという観点から、重要な進展であると考えられる。

また、限られた放電ではあるが、プラズマ密度・温度揺動を反映する2次ビーム強度信号にも約20kHz近傍にコヒーレントな揺動が観測された。まだその特性は明らかにできていないが、今後の改良によりHIBPを揺動計測にも適用できる可能性があることを示唆している。

平成19年度は、前年度明らかになったプラズマ電流変動の電位計測へ影響を低減するために、ビームライン機器の再調整を行った。また、イオン源、加速器、検出器等の地道な改良を進めた結果、全体として信号強度を10倍程度あげることが出来た。

図3.3.3.3-4にこれらの改良後の電位分布計測の結果を示す。NBIにより生成、維持されたプラズマにECHにより中心加熱を行っている。ECHを重疊することにより電位が正に変化しており、電位勾配(電場)に注目すると $r > 0.3$ の領域でECH重疊後、大きな正電場が形成されていることが分かる。この電場の変化はCXSによる結果と一致していることが確認できており、プラズマ電流の影響を受けずに電位分布計測が正しくおこなえていることが確認できた。

現在、様々な磁場配位における計測に対応するためのデータ収集と制御系の整備、揺動計測のためのS/Nの改善を進めている。

HIBPによる電位計測の精度を向上させ、さらにプラズマ閉じ込めを乱流計測の面から議論を進められるようにするためには、信号強度の増大が必要不可欠である。このため、ビームライン整備、電位計測実験を行うのと並行してイオン源の開発も重点的に進めてきた。

従来のHIBPではシングルエンド型静電加速器が使用されてきたが、LHD用H

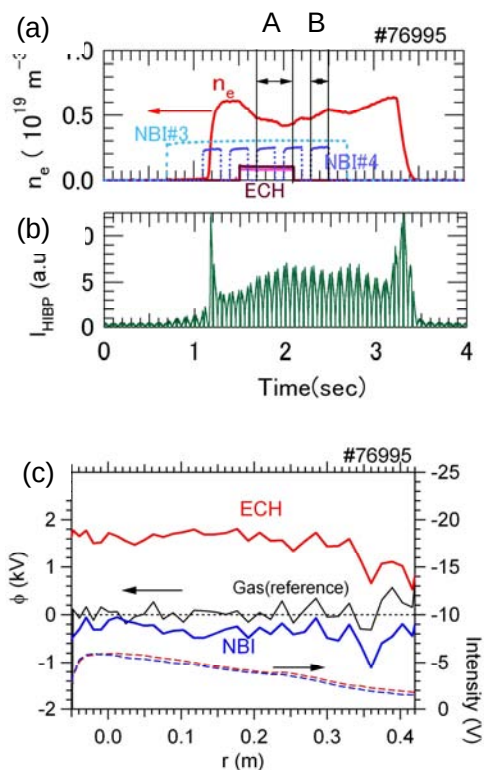


図3.3.3.3-4
電位分布計測結果。(a):線平均電子密度と加熱(NBIとECH)のタイミング。A,B は電位分布計測のタイミング。(b):2次ビーム強度。分布計測のために10Hz でビームの入射方向を掃引している。(c):計測された電位分布。横軸はプラズマ中心からの距離。黒実線が基準電位(真空容器電位)、青実線がNBI単独加熱時間帯、赤実線がECH重疊時間帯の電位分布。波線は2次ビーム強度分布(色は実線のそれに対応)。

I B Pは最大 6MeV まで加速する必要があるので、耐電圧、加速効率を考慮してタンデム型加速器を採用している。このため負イオン源が必須となり、その開発が重要な課題の一つとして、H I B P開発開始当初からスパッター型負イオン源の開発が進められてきた。研究開発の初期に製作された1号機はテストスタンドにて最大約 40 マイクロ A の出力を得ることができた[4]が、イオン源内の放電が不安定であった。またイオン源の熱除去処理が施されていないという欠点も持っていた。そこで、平成16年に、これまでに得られたデータをもとに新規イオン源（2号機）の設計開発とシミュレーションによる最適化に取り組んだ(同志社大学・和田教授との共同研究)。2号機の運転領域とビーム出力特性を調べた結果を図3. 3. 3. 3-5に示す。その結果、金ビームで $65\mu\text{A}$ 、銅ビームで $125\mu\text{A}$ を得ることができている[5]。比較のために従来機と新型イオン源の主要諸元と性能を表3. 3. 3. 3-1に掲載する。

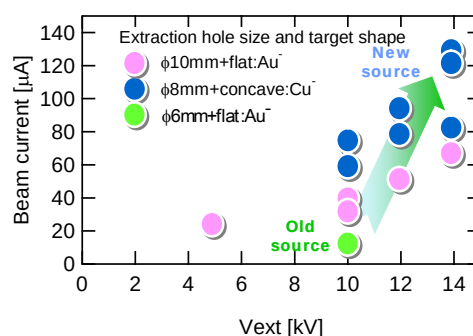


図3. 3. 3. 3-5 金負イオン源の引き出しビーム電圧に対するビーム出力特性の従来機と新型イオン源の比較

表3. 3. 3. 3-1 従来機と新型金負イオン源の諸元表

	従来機	新型イオン源
Plasma volume (cm ³)	346	1057
Target size (cm)	φ 1.4	φ 2.0
Extraction hole (cm)	φ 0.5	φ 0.8
Au ⁻ current (μ A)	6.75 at 9.8 keV	65 at 14 keV
Target voltage and current	300V, 15mA	600V, 10mA

平成17年度にこの新型イオン源を実機に組み込みプラズマ電位計測を開始した。これによる成果は前述のとおりである。現在、出力ビーム特性の改善、ビーム輸送効率の改善を進めている。

また、前述のようにビームエネルギーが高いため、衝突電離過程においてビームイオン自体の速度も無視できない可能性が高く、その検討も重要である。そこで、平成18年度からは原子過程の面からプローブビームの特性を明らかにするための検討を開始した。(マケドニア大学 Janev 教授、自然科学研究機構分野間連携国際研究拠点形成事業による招聘)。プラズマ中での Au⁺ビーム減衰は、初期検討では考慮されなかったイオン衝突によるイオン化とLHD周辺部の中性粒子によるイオン化が重要であることが明らかになった。またこの検討過程で、これまで世の中に存在しなかった金イオンの電子損失断面積を求めた[6]。

平成19年度は電子損失・電子捕獲断面積を新たに導出し、タンデム加速器での Au^- から Au^+ への変換効率の評価を行った (Lebedev 研究所 Shevelko 教授、自然科学研究機構分野間連携国際研究拠点形成事業による招聘) [6]。これらの検討は今後 H I B P による電子密度揺動計測の解釈や新しい電子密度計測手法の開発を進める上でも重要な寄与をするものである。

- [1] A.Fujisawa, H. Iguchi, A. Taniike, M. Sasao, and Y. Hamada, “A 6 MeV heavy ion beam probe for the Large Helical Device”, IEEE Transactions on plasma Science, Vol.22, 1994, p.395
- [2] T. Ido, and A. Shimizu, and M. Nishiura, and A. Nishizawa, and S. Kato, and T. P. Crowley, and K. Tsukada, and M. Yokota, and H. Ogawa, and T. Inoue, and Y. Hamada, and the LHD Experimental Group, “A 6 MeV heavy ion beam probe on Large Helical Device”, Vol. 77, 2006, p.10F523
- [3] A. Shimizu, T. Ido, M. Nishiura, H. Nakano, I. Yamada, K. Narihara, T. Akiyama, T. Tokuzawa, K. Tanaka, K. Kawahata, H. Igami, Y. Yoshimura, T. Shimozuma, S. Kubo, K. Nagaoka, K. Ikeda, M. Osakabe, K. Tsumori, Y. Takeiri, O. Kaneko, S. Kato, M. Yokota, K. Tsukada, H. Ogawa, A. Nishizawa2), Y. Hamada and LHD group, Plasma Fusion Res. SERIES to be published (2007).
- [4] M. Sasao, K. A. Connor, K. Ida, H. Iguchi, A. A. Ivanov, M. Nishiura, D. M. Thomas, M. Wada, M. Yoshinuma, “Ion sources for Fusion Plasma Diagnostics” IEEE transactions on Plasma Science, Vol. 33, Issue6, Part I, 2005, Pages 1872-1900.
- [5] M. Nishiura, T. Ido, A. Shimizu, S. Kato, K. Tsukada, A. Nishizawa, Y. Hamada, Y. Matsumoto, A. Mendenilla, and M. Wada, “Optimization of negative ion sources for a heavy ion beam probe” Rev. Sci. Instrums. 77(2006)03A537.
- [6] M. Nishiura, T. Ido, A. Shimizu, R. K. Janev, T. Kato, S. Kato, K. Tsukada, M. Yokota, H. Ogawa, T. Inoue, H. Nakano, Y. Hamada, and LHD Experimental Group, “Electron Loss Cross Sections for a Heavy Ion Beam Probe”, Plasma and Fusion Research 2007, in press.
- [7] M. Nishiura, T. Ido, A. Shimizu, H. Nakano, V. P. Shevelko, R. K. Janev, T. Kato, S. Kato, Y. Hamada, M. Wada, and LHD experimental group, “Status of the heavy ion beam probe system in the Large Helical Device”, Submitted to Review of Scientific Instruments, 2007.

4) トレーサ内蔵ペレット (TESPEL/TECPEL) の開発

核融合科学研究所では、プラズマ中の粒子輸送をこれまでの手法と比較してより高い精度で計測する手法、すなわち内層が本来プラズマ中に存在しないトレーサ粒子で、外層が別種の固体であるトレーサ内蔵固体ペレットを用いる手法を提案、開発した。この手法の主な特徴として、(ア) プラズマ中においてトロイダル方向、ポロイダル方向ともに局在化したトレーサ配置が可能なこと、(イ) トレーサ粒子数を正確に把握しておくことができること（これにより、トレーサ粒子密度の絶対量を決めることができる）、(ウ) 現状、固体であればトレーサ粒子として使用可能であること（これにより、質量依存性の研究が非常に容易となる）などが挙げられる。これらの特徴により、例えばプラズマ中に局在する磁気島中にトレーサを配置することができるので、磁気島中の粒子輸送研究といった画期的な研究が可能となる。

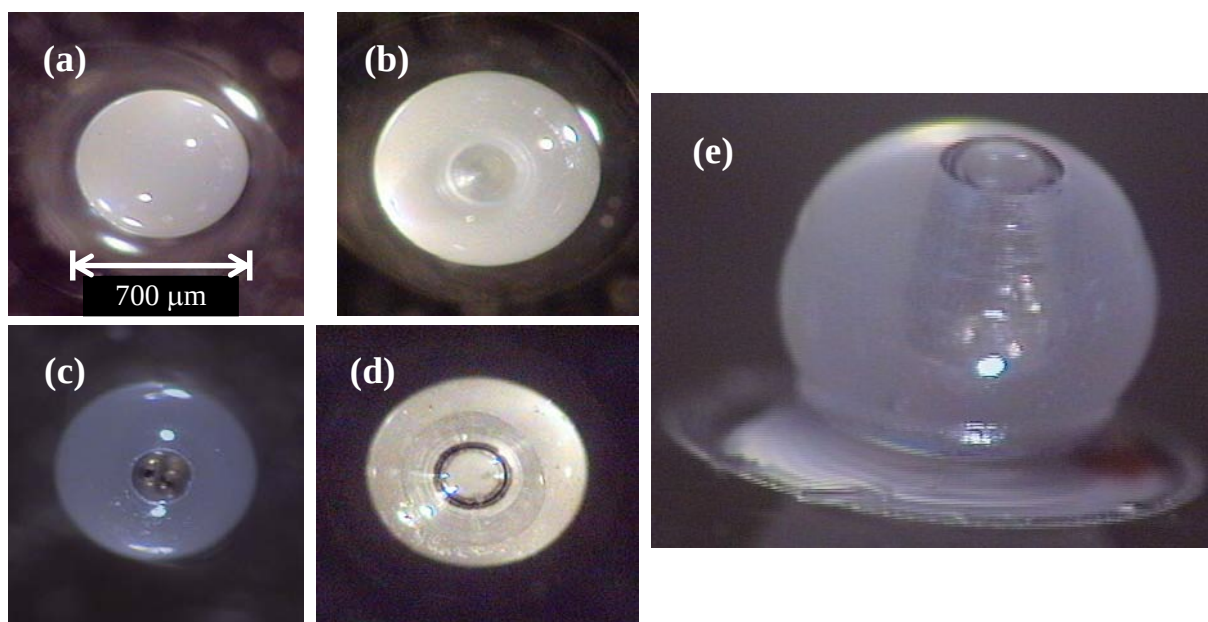


図 3.3.3.4-1 TESPEL が完成するまでの様子。右の写真は完成した TESPEL。

トレーサ内蔵ペレットの開発は、まず外層部を炭素と水素のみの有機化合物であるポリスチレン ($-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)\text{CH}_2-$) (大阪大学：乗松孝好教授、長井圭治助教) としたトレーサ内蔵固体ペレット (TESPEL : Tracer-Encapsulated Solid PELlet) において成功した。図 3.3.3.4-1 に TESPEL が完成するまでの写真と完成した TESPEL を示す。まず、図 3.3.3.4-1(a) に示すポリスチレン球（ここでは直径 $700\text{ }\mu\text{m}$ 。実験内容に応じて、 $500\text{ }\mu\text{m}$ から $900\text{ }\mu\text{m}$ の間から選択する。）に典型的直径 $250\text{ }\mu\text{m}$ のマイクロドリルにより穴を開ける（図 3.3.3.4-1(b)）。この穴の中に、トレーサ粒子（ここではチタン微小球、その典型的直径は $100\text{ }\mu\text{m}$ 。）を入れる（図 3.3.3.4-1(c)）。最後に、トレーサが飛び出さないように、ポリスチレン球で蓋をする。さらに、この蓋となっているポリスチレン球が飛び出さないように、特殊な接着剤で糊付けをする（図 3.3.3.4-1(d)）。完成し

た TESPEL の写真を図 3.3.3.4-1(e)に示す。LHD の TESPEL 入射装置は一回の放電につき 1 回の TESPEL 入射が可能となっており、一日最大 59 個の TESPEL を入射することができる。

この TESPEL の原理検証実験は、CHS において行われ、世界で初めて磁場閉じ込め高温プラズマ中へのトレーサ粒子の局所配置及びトレーサイオンに対する荷電交換分光計測による局所輸送係数の測定に成功した。LHD においては、平成 11 年度より入射実験を開始しており、多くの実験成果を生み出している。平成 16 年度以後の成果で言えば、TESPEL 入射後にプラズマ中に発生するコールドパルス伝播から動的熱輸送研究が行われており、様々なプラズマの動的熱輸送係数が評価された。最近では、TESPEL 入射直後にプラズマ中心部の電子温度が上昇する、いわゆる非局所輸送現象が観測されるようになったことから、電子熱輸送の非局所性に関する研究も行われている。また、プラズマ中に存在する高エネルギー粒子が TESPEL 溶発雲内で荷電交換反応を起こし、プラズマ外に出てくるのを中性粒子分析器で計測する手法、ペレット荷電交換粒子計測法により高エネルギー粒子の空間分布が測定できることから、これにより高エネルギー粒子が持つ空間構造の研究が行われており、高エネルギー粒子の局在分布などが示されている。無論、不純物トレーサによる不純物輸送研究も進められており、様々なプラズマにおける不純物輸送特性が評価されている。さらに、種々の要請（例えば、分光計測における特定元素からの発光強度の強化）に従い、様々な元素をトレーサとしてプラズマ中に入射する実験も行われている。こうした結果が示しているように、現在 TESPEL は LHD 実験に欠かせない実験ツールとなっている。

TESPEL に続いて、外層部が固体水素であるトレーサ内蔵極低温ペレット（TECPEL : Tracer-Encapsulated Cryogenic PELlet）の開発について最近成功した(ロシア国立サンクトペテルブルク工科大学(露):I. Vinyar 氏) [1]。TECPEL では外層部を固体水素とすることで、結果的に TESPEL の外層部に存在した炭素が取り除かれており、プラズマ内に持ち込む不純物量を減らすことができる。図 3.3.3.4-2 に開発した生成装置内における TECPEL 生成過程の各段階を示す。まず、バレル内のペレット生成部温度を 8~9K に下げた後に少量の水素ガスを導入し、ペレット生成部に固体水素膜を作る（図 3.3.3.4-2(a)）。次にトレーサ装填用ニードルを装填予定トレーサのすぐ下の位置まで下げた

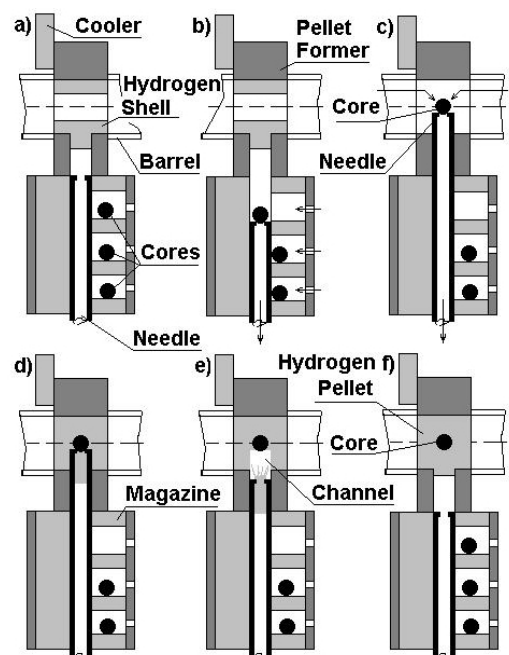


図 3.3.3.4-2 生成装置内における TECPEL 生成過程の各段階

後、トレーサの後方からガスを導入することでニードル上にトレーサを配置する（ニードル先端部には、トレーサが落ちない程度の径を有する穴が開いており、ガスはここから排気される。図 3.3.3.4-2(b)）。その後、ペレット生成部の温度を上昇させて、固体水素膜を蒸発させた後、バレル内にトレーサを導入する（図 3.3.3.4-2(c)）。再びペレット生成部温度を 8~9K に下げて水素ガスを導入して、ニードルを包み込んだ固体水素ペレットを作る（図 3.3.3.4-2(d)）。最後に固体水素ペレット中心部にトレーサを残してニードルをゆっくりと引き抜く（図 3.3.3.4-2(e)）ことで、TECPEL が完成する（図 3.3.3.4-2(f)）。平成 17 年 11 月に今回開発した TECPEL 生成・射出装置の LHD への取り付けを行い、同年 12 月に LHD プラズマへの TECPEL 入射に成功した。この時のトレーサは、炭素微小球（直径約 0.2 mm）とした。図 3.3.3.4-3 に、LHD プラズマへの TECPEL 初入射実験時におけるプラズマパラメータの時間変化の一例を示す。図中の縦破線は TECPEL の LHD プラズマへの侵入時刻を表している。図 3.3.3.4-3 より TECPEL が LHD プラズマに侵入した直後、電子密度や各種線スペクトルの発光強度が大きく上昇しているのが分かる。このことは、TECPEL が射出後壊れることなくプラズマ中に侵入していることを示している。ここで C III (97.7 nm) の発光強度上昇はトレーサの炭素微小球によるものと考えられるが、そのすぐ近くに H I (97.3 nm) が存在するため、その影響を受けている可能性もある。実際、粒子供給用の固体水素ペレット入射後に、この C III (97.7 nm) の大きな上昇が観測される場合がある。したがって、今後 LHD プラズマ中への TECPEL によるトレーサ供給の確認を発光計測により行う場合には、トレーサとしてチタンなどを用いたほうが明確になると考えられる。続く平成 18 年度では、鉄微小球（直径約 0.2 mm）をトレーサとした TECPEL の LHD への入射実験を行った。鉄トレーサ入り TECPEL が LHD プラズマへ健全な形を維持したまま入射されたのは、入射実験を実施した 14 ショット中 6 ショットであった。残りはプラズマに侵入する前に壊れてしまっていた。壊れた理由について、ガイド管軸のアライメント不足や不適切な加速ガス圧などが考えられるが、少ないながらも成功ショットがあったことは、鉄微小球が TECPEL のトレーサとして使用可能であ

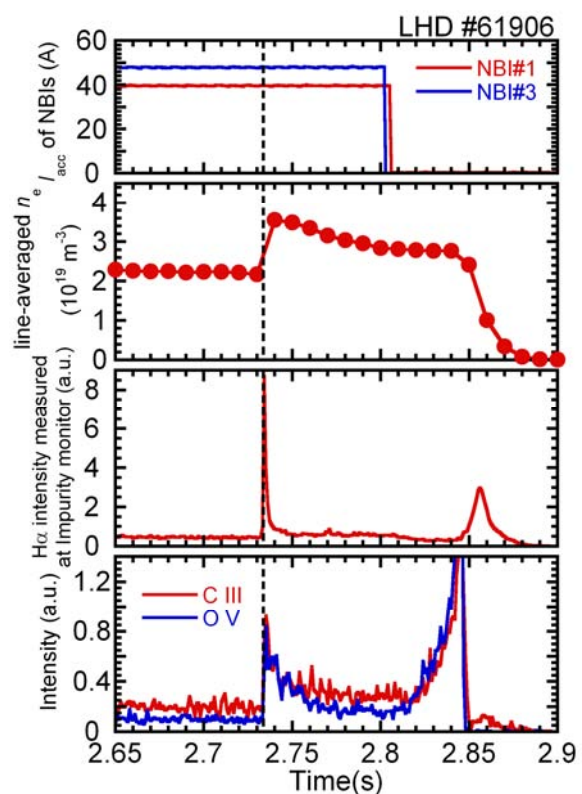


図 3.3.3.4-3 TECPEL 入射前後のプラズマパラメータの時間変化

ることを示している。今後、さらに異なる元素のトレーサを封入した TECPEL 入射実験を行う予定である。

- [1] S. Sudo et al., “Tracer-encapsulated pellet injector for plasmas diagnostics” , Review of Scientific Instruments, Vol. 76 (2005) pp. 053507-1~053507-7.

5) C X S の改良

CXS は平成 1 1 年度に計測を開始したが、平成 1 6 – 1 9 年度において、以下に示すような大幅な改良がなされ、その性能を飛躍的に向上させた。

平成 1 6 年度 (2004 年) (第 8 サイクル) 真空容器内ミラーの設置

平成 1 7 年度 (2005 年) (第 9 サイクル) 40keV 中性粒子ビームの導入

平成 1 8 年度 (2006 年) (第 1 0 サイクル) 接線視線の導入

平成 1 9 年度 (2007 年) (第 1 1 サイクル) ペリスコープの導入

荷電交換分光(Charge exchange spectroscopy CXS)とは、プラズマ中の完全電離不純物と中性粒子ビームとの荷電交換反応を利用して、ビームと視線の交点のイオン温度と回転速度をドップラー幅とドップラーシフトから計測するものである。中性粒子ビームを見る視線の方向を選ぶことで、ポロイダル回転速度、またはトロイダル回転速度を計測できる。LHD には 150-180keV の負イオン源中性粒子ビーム(Negative neutral bema injector: N-NBI)が 3 台 (BL1,BL2,BL3) と 30-40keV の正イオン源中性粒子ビーム(Positive neutral bema injector: P-NBI)が 1 台(BL4 2005 年度より)設置されている。図 3. 3. 3. 5 – 1 に示されるように、2004 年度までは上下ポートから N-NBI を垂直に見込むことで、イオン温度とポロイダル回転分布を計測していたのに対し、2005

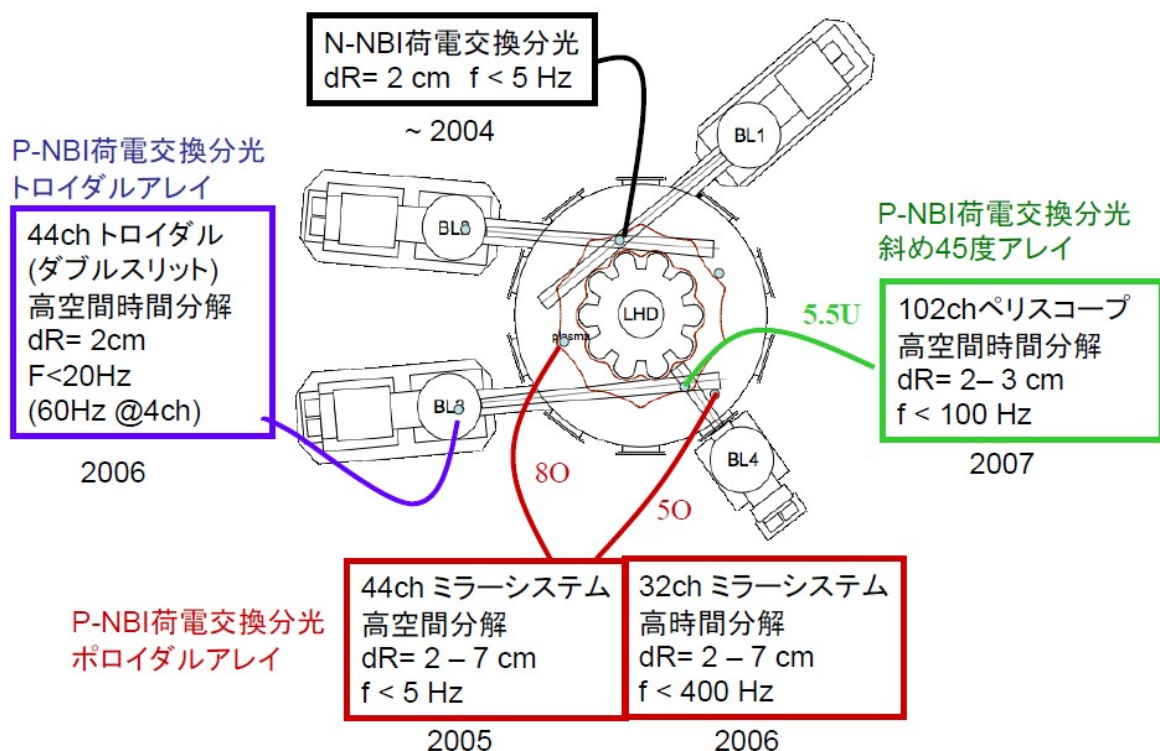


図3. 3. 3. 5 – 1 荷電交換分光システムのセットアップ

年度以降は P-NBI をさまざま方向から見込むことで、イオン温度、ポロイダル回転速度、トロイダル回転速度を計測できるようになった。

図 3. 3. 3. 5-2 で示されるように、荷電交換反応の断面積は 40-50keV をピークとして、エネルギーが大きくなると減少していく。したがって N-NBI による荷電交換分光は、荷電交換断面積が大きく、かつバックグラウンド（プラズマ周辺部の励起状態の中性ガスと不純物との荷電交換によるもの）が小さいネオンで利用して行なわれきた。その為に、イオン温度を計測するのにネオンガスをパフする必要が生じた。高密度ではネオンパフが放射崩壊を引き起こす等、実験上の制約があった。これに対し、P-NBI による荷電交換分光は荷電交換断面積が 4 倍程度、ビーム電流が 5 倍程度大きいので、1 桁以上大きい荷電交換光の信号が得られ、プラズマ中に存在する炭素での計測が可能となった。

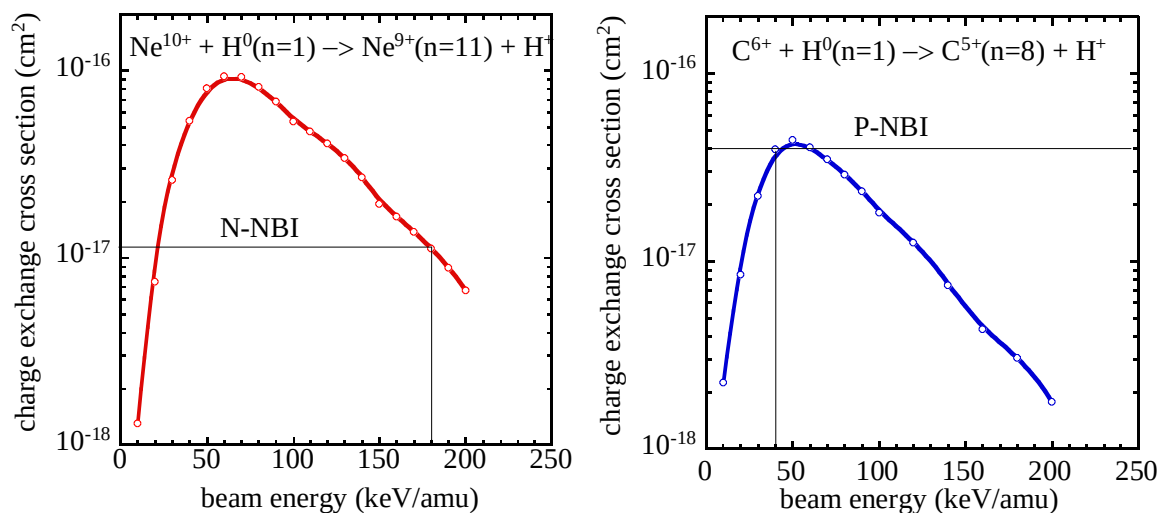


図3. 3. 3. 5-2 炭素とネオン不純物に対する荷電交換断面積のエネルギー依存性

第8サイクル実験（2004年）

P-NBI は垂直入射なので、ヘリカルコイルがある為に直接プラズマを垂直に見込むことができない。そこで、真空容器内にミラーを入れて視線を折れ曲げることで、垂直に見る方式が考えられた。第8サイクル実験では P-NBI の導入の前に受光システムのテストとして、真空容器内にミラーを設置した。ミラーを壁コンディショニング中のグロー放電やチタゲッターによるミラー反射率低下を防ぐ為のミラーとプラズマとの間にシャッターを設置する必要がある。ミラーが真空容器の内部奥深くにある為に、駆動棒が挿入できず、シャッターに流す電流とプラズマ閉じ込め用の磁場が作る電磁力で、開閉するシャッターを製作し、テストを行った。図 3. 3. 3. 5-3 は真空用内に設置されたミラーシャッターの写真と、ミラーの設置場所とプラズマとの位置関係を示す LHD のポロイダル断面図である。

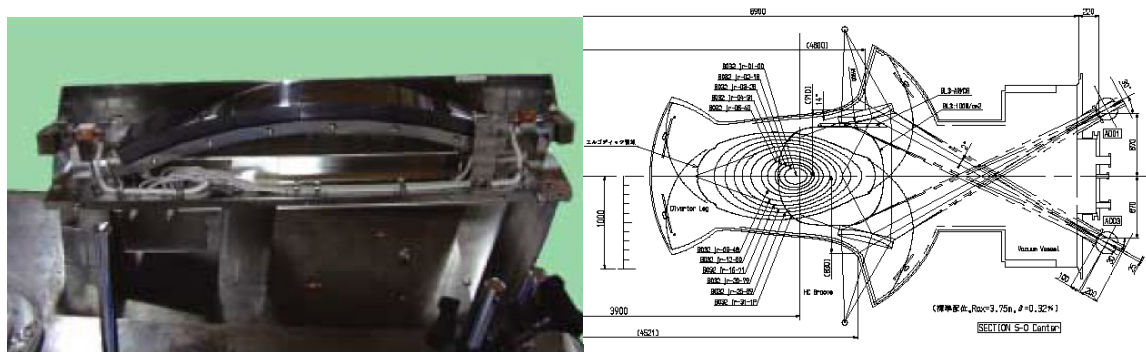


図 3. 3. 3. 5-3 真空容器内ミラーと真空容器内の設置位置

第 9 サイクル実験 (2005 年)

ビームエネルギー 40 keV (入射電力 3 MW) の垂直入射正イオン源 NBI の導入により、CXS によるイオン温度分布計測の性能を大幅に向上させることができた。図 3. 3. 3. 5-4 は垂直入射正イオン源 NBI を使った荷電交換分光で計測したイオン温度とポロイダル回転の空間分布である。NBI 加熱パワーの上昇に伴いイオン温度が時間と共に上昇しているのが計測できた。ポロイダル回転分布も同時に計測できた。プラズマ周辺部ではポロイダル回転はイオンの反磁性方向で、電場が正になっているのがわかる。視線が少しトロイダル方向にも傾いている為に、プラズマのコア部では、トロイダル回転の影響を受けている。

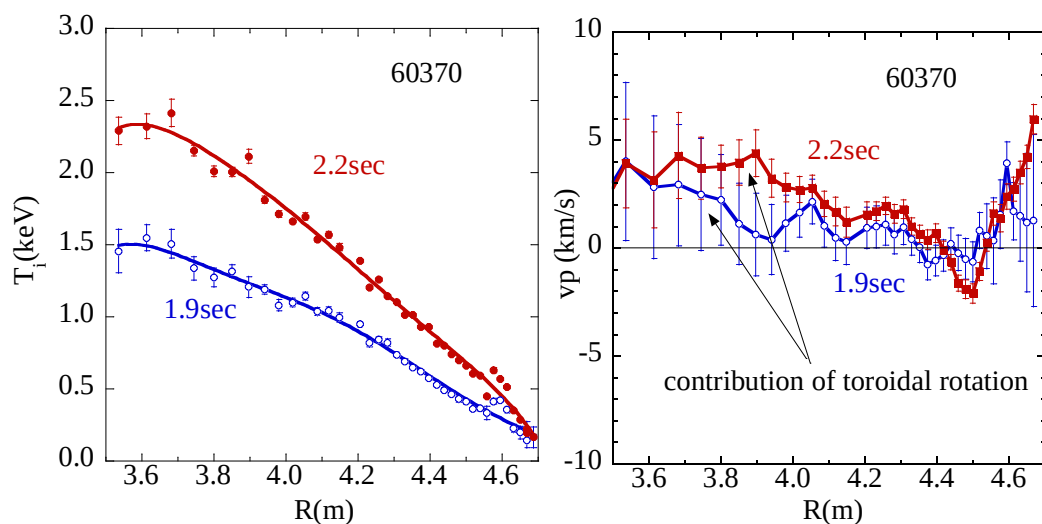


図3. 3. 3. 5-4 イオン温度とポロイダル回転の空間分布 (2005/11/25)

第 10 サイクル実験 (2006 年)

2005 年までのイオン温度計測は空間分解能は 44 ch と高分解能であったが、フレームレートが 20 Hz 以下と時間分解能が十分でなかった。そこで、電子増倍機能付きの

CCD を新たに採用することにより、時間分解能を最大 400Hz まであげることができた。この改良により、プラズマのイオン温度の高速応答を研究することが可能となった。図 3. 3. 3. 5-5 はペレットを入射に対応したイオン温度の変化を示したものである。ペレットは周辺部 ($\rho = 0.9$) でアブレーションしているにもかかわらず、プラズマ周辺部よりもむしろ中心部において大きなイオン温度の減少が観測された。ペレット入射直後 ($t=3.96\text{sec}$) のイオン温度の減少 ($1.23\text{keV} \rightarrow 0.83\text{keV}$) は 30% を超えており、密度上昇では説明できない。ペレットを入射することにより周辺部の温度勾配を変化させ、その回復のタイムスケールから閉じ込めを評価することができると考えられる。

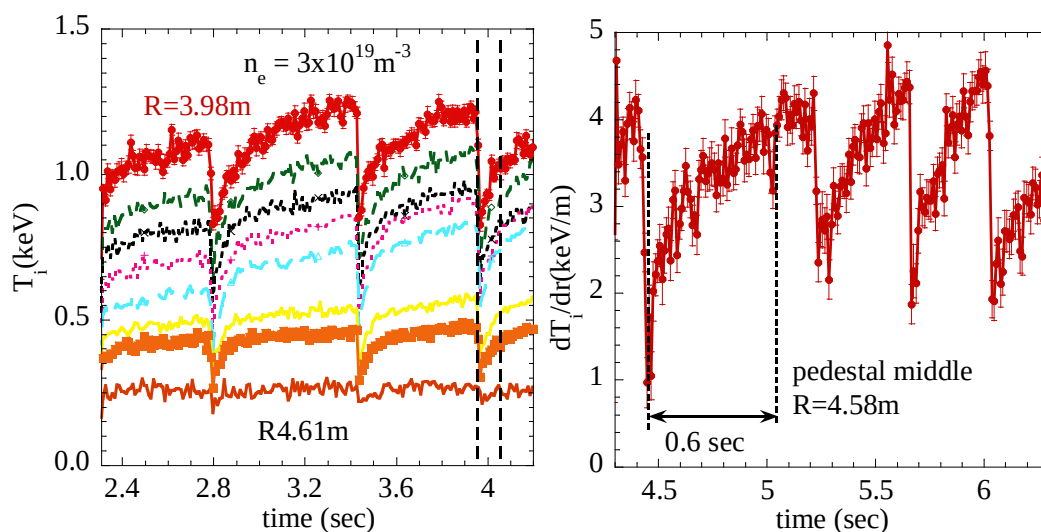


図 3. 3. 3. 5-5 高速荷電交換分光システムで計測したイオン温度の時間変化(2006/11/23)

ポロイダル回転（電場）計測の重要性を鑑みて、ポロイダル視線の設置がトロイダル視線の設置に先んじて行なわれた。しかしながら、ビームの直径がプラズマ小半径の半分程度と大きい為、プラズマの小半径方向に横切るポロイダル視線は、プラズマの中心部において積分効果が無視できないことがわかっていった。この効果は、イオン温度が平坦で、計測している炭素の密度分布が中心ピークしている場合には、大きな問題とはならない。ところが、加熱パワーの増加に伴い、ピークしたイオン温度分布、ホローな炭素密度分布が得られるようになると、視線の積分効果が無視できない問題となってきた。そこで、新たにトロイダル視線の荷電交換分光を導入した。図 3. 3. 3. 5-6 に示されるようにポロイダル視線からの計測では中心のイオン温度はトロイダル視線のイオン温度に比べ低めの温度を示している。これは、周辺部の低いイオン温度成分がポロイダル断面の視線の積分効果によって見かけ上の温度が低くなっているためである。特に、ホローな炭素密度分布の場合には、積分効果によって

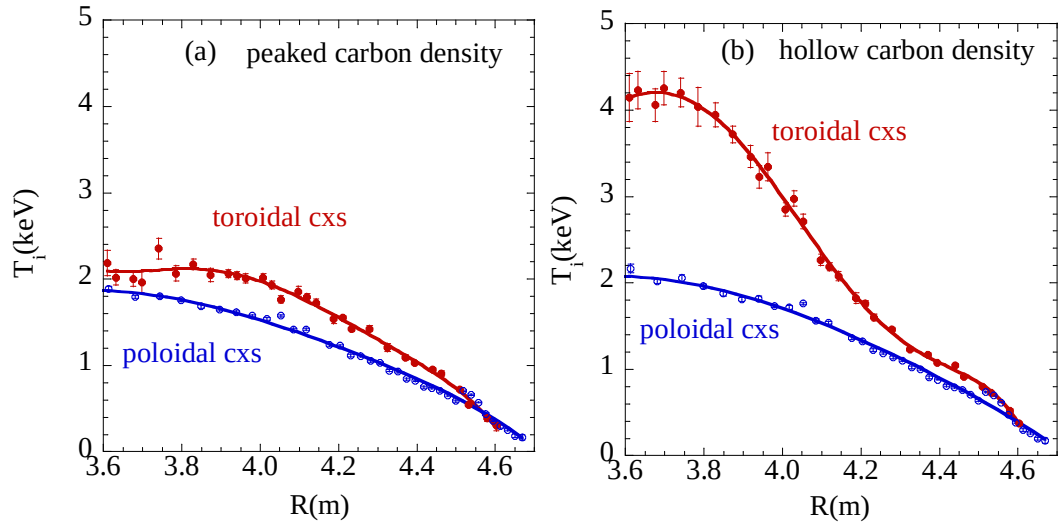


図3. 3. 3. 5-6 トロイダルアレイとポロイダルアレイで計測したイオン温度分布(2007/1/30)

見かけ上のイオン温度が半分程度に下がっていることがわかった。

トロイダル視線の導入により、ポロイダル回転速度のみならず、トロイダル回転速度も計測できるようになった。図3. 3. 3. 5-7はCo及びctr方向の接線NBI入射時のトロイダル回転であるが、パワーの増加に伴い、時間と共に中心部においてNBI入射方向のトロイダル回転速度が増加していることが解る。Co及びctr方向の接線NBI入射時の分布形状に違いがあるには、プラズマの中間部 ($R=4.2\text{m}$) におけるco方向の自発的トロイダル回転の影響である。

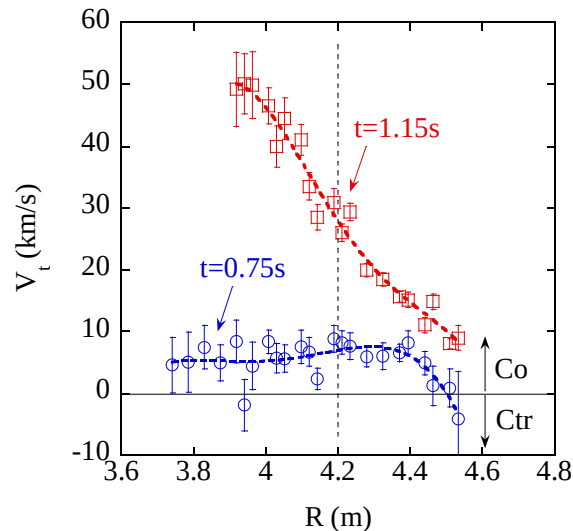


図3. 3. 3. 5-7 Co及びctr方向の接線ビームによるトロイダル回転分布の変化(2006/1/30)

第11サイクル実験 (2007年)

トロイダル視線は、接線NBIのビームラインに沿って計測を行なうために、アクセ

スが限られている。将来、新たに導入される正イオン源 NBI の計測においては、アクセスできるポートがないと考えられる。2007 年においては、上下ポートからのイオン温度計測の可能性を調べるためにペリスコープを導入した。このペリスコープは多数のリレーレンズからなる光学系で、比較的アクセスが容易な上下ポートから、成分効果が小さい計測を行なうために考えられたものである。ペリスコープで得られたイオン温度と、トロイダル視線で得られたイオン温度分布を比較することにより、ペリスコープによる計測の有効性をチェックする予定である。

6) Super SINET を用いた遠隔計測

核融合実験は高度になるにつれて大型化・集中化するので、全国に広がる核融合研究者からは遠隔実験参加が強く望まれる。そこで核融合科学研究所は日本の中核的共同利用機関として、遠隔実験参加システムの構築に積極的に取り組んでいる。具体的には、平成 13 年度より国立情報学研究所が運営する学術研究のための超高速ネットワークを利用して、核融合研究のためのバーチャルラボラトリを構築し運営している。この超高速ネットワークは平成 13 年度にスーパーSINETという名称で開設され、全国の主要研究拠点間を幹線速度 10Gbps、拠点間速度 1Gbps で接続してきた。核融合研では当初 2 点間の専用回線として利用を開始し、平成 15 年度に LHD の遠隔実験参加システムが稼働を開始した。さらに、平成 17 年度の CSI 事業参加により、全日本 ST 研究プログラムおよびスーパーコンピュータ遠隔利用システムが新たに付加され、核融合研究のためのバーチャルラボラトリへと進化した。

ネットにはウィルスやハッカーなど危険要素が多い。したがって遠隔実験のもっとも肝要な点は安全の確保である。SINET の構成を図 3.3.3.6-1 に示す。SINET は核融合研側のルータと遠隔地側のルータを用いて、MPLS-VPN (Multi Protocol Label Switching Virtual Private Network) 接続を行い、SINET3 および学内回線を用いながら、独立したネットワーク (SINET) を構築する。SINET はバーチャルには核融合研の所内ネットワークである。安全上、各大学の学内ネットワークとは直接接続せず、インターネット経由での接続となる。インターネットへは核融合研のファイアウォールを経由して接続される。さらに SINET 管理人が常駐し、通信確認とトラフィック監視をするだけでなく、障害や要望、申請にも速やかに対処している。それゆえ SINET は安全であるとして

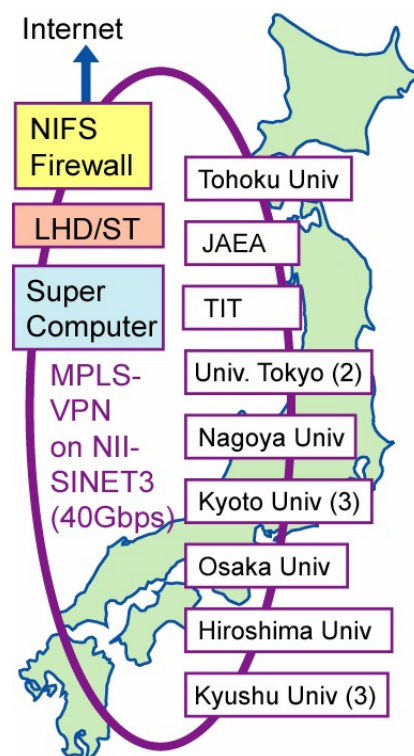


図 3.3.3.6-1 SINET の構成 (平成 19 年 10 月現在)

LHD ネットワーク (LHD-LAN) に直結し、共同研究者は各遠隔ステーションから自由に LHD-LAN 上の資源 (コンピュータ, サーバ, プリンタ) と接続でき、LHD 実験データを自由に閲覧・計算処理できるだけでなく、LHD 本体室内の計測機器をも自由に制御できる。



図 3.3.3.6-2 九州大学産学連携センター（間瀬研究室）における LHD 遠隔ステーション。

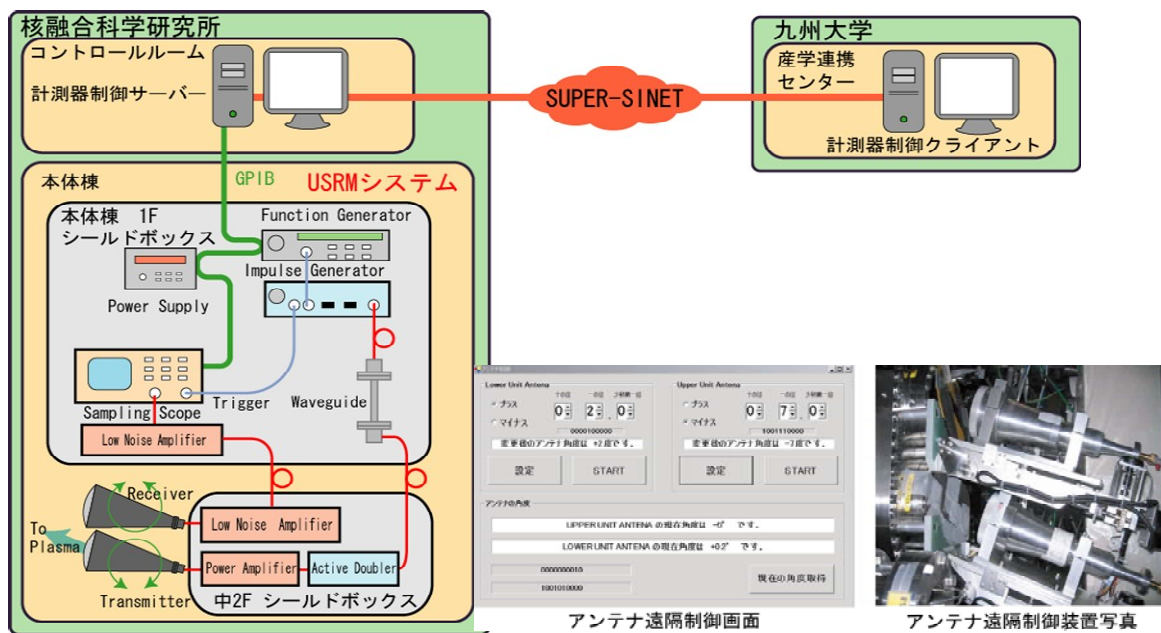


図 3.3.3.6-3 九州大学産学連携センターでの超短パルス反射計実験の遠隔操作。

図 3.3.3.6-2 に LHD 遠隔ステーションの典型例として九州大学産学連携センター（間瀬研究室）における LHD 遠隔ステーションを示す。まさに LHD 制御室と同じ機能を持つミニ制御室となっている。実験者は大型モニターに表示される LHD プラズマ映像を見、制御室のアナウンスを聞き、プラズマデータをモニターし、九州大学に居ながら臨場感あふれる実験ができる。また TV 会議システムを用いて制御室と議論することもできる。図 3.3.3.6-3 に遠隔計測の典型例として九州大学産学連携セン

ターでの超短パルス反射計実験の遠隔操作を示す。実験ではプラズマの状態に応じて LHD 本体の観測ポートに取り付けられている超短パルス反射計のアンテナの方向を非磁性の超音波モーターによって調節する。超音波モーター制御器は LHD 制御室に置かれ計測制御サーバーコンピュータと接続している。九州大学から SNET を通して計測制御サーバーコンピュータをアクセスし、超音波モーターを調節する。データは本体室に置かれたサンプリングスコープで採られ、九州大学に置かれたデータ解析コンピュータによりリアルタイムで解析される。

このように、SNET は世界初の計測機器を自由に制御できる遠隔実験参加システムを提供する。遠隔制御される計測器は、超短パルス反射計、ECE イメージング、超高速テレビカメラ、ダイヤモンド高エネルギー粒子検出器などである。また、高速性を生かして、周辺プラズマ揺動や密度揺動などのデータ解析が遠隔ステーションにおいてリアルタイムで行われている。

遠隔実験参加システムにおける大問題は、TCP/IP の性格上、長距離伝送では転送速度が帯域幅の 1/20 以下に落ちることである。実際、SNET では帯域幅 1Gbps に対しデータ転送速度が 50Mbps 以下となっていた。平成 19 年度の成果として核融合研と九大間で転送速度 300Mbps を達成した。これはフランスの ITER から六ヶ所村の ITER 遠隔実験センターへのデータ転送に道が開けたという意味で画期的である。さらに LHD データ収集システムによる九州大学の ST 実験装置のデータ収集試験に成功した。従来の伝送速度では実用にならなかったものである。これによって SNET には新たな可能性が生まれ、さらなる発展が期待されている。

新たな SNET 参加は共同研究委員会により募集、採択される。運営は SNET 規則に基づいてネットワーク管理者と共同研究者の代表からなる SNET タスクが行い、セキュリティと利便性の両立を図っている。そのため SNET は共同研究者の要望を汲みながら絶えず進化している。SNET を用いた LHD 遠隔実験には日本の中核的な研究者が続々と参加し、現在、東大（本郷，柏），京大（吉田，宇治），東工大，東北大，名大，九大，広島大，阪大へと広がっている。図 3.3.3.6-4 に SNET に接続する遠隔ステーションの数の変化を示す。

スーパーSINET は平成 19 年度には、多くの大学を接続する学術情報ネットワーク(SINET)を包含し、幹線速度 40Gbps の

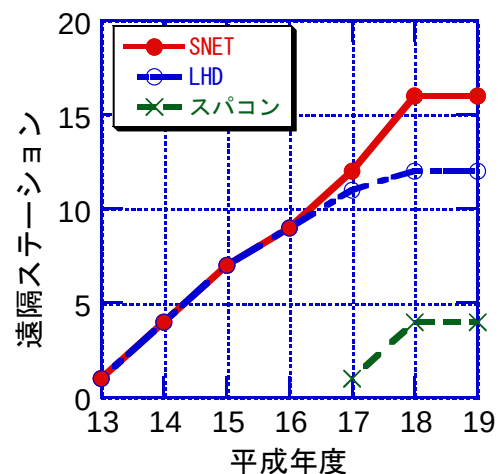


図 3.3.3.6-4 SNET 遠隔ステーションの数の変化。○は LHD 実験遠隔ステーション，×はスーパーコンピュータ遠隔ステーション，●は総数。

SINET3 へと発展している。SNET はスーパーSINET から格段に増えた SINET3 のノードを利用することで、さらに多くの全国の核融合研究者が接続可能となった。このように SNET は ITER を先取りした形で、世界の最先端で遠隔実験参加の分野を開拓している。

これらの成果の一部は、平成 19 年 6 月に愛知県犬山市で開催された、第 6 回「核融合研究における制御・データ 収集・および遠隔実験」についての IAEA 専門家会議（IAEA-TM）で発表され、注目された [1]。

- [1] Y. Nagayama, et al.: “Control, Data Acquisition, Data Analysis and Remote Participation in LHD”, (Plenary Talk), to be published in Fusion Engineering and Design.

7) 大容量データ処理システムの構築

LHDの大容量データ処理システム開発では、平成9年の実験開始当初から、PCサーバ・クラスタ技術を全面的に利用して、フレキシブルな構成変更・増強が可能で、小規模から大規模までスケラブルに性能を伸張できる並行分散システムの構築を行ってきた[1,2]。また、LHDの定常プラズマ実験に向けて、同計測データ収集系（通称、LABCOMシステム）の実時間化・定常運転対応の研究開発に平成12年頃から取り組みを続け[3,4]、平成15年からの定常実験本格化にあわせて実動を開始した[5]。

その結果、平成15年度LHD第7サイクル実験において、一回の実験あたり3.16 GBの計測生データを収集し、核融合実験での世界記録を達成した。特に、平成16年度からは、CompactPCI規格デジタイザをベースに、一計測で最大80 MB/秒の超広帯域実時間データ収集・転送技術を新たに開発、投入して[6]、高解像度カメラの連続データ集録にも対応するなど飛躍的な稼動実績を上げ[7]、同年度に84 GB、17年度は90 GBと三年連続で世界記録の自己更新を果たした。（図3.3.3.7-1参照）

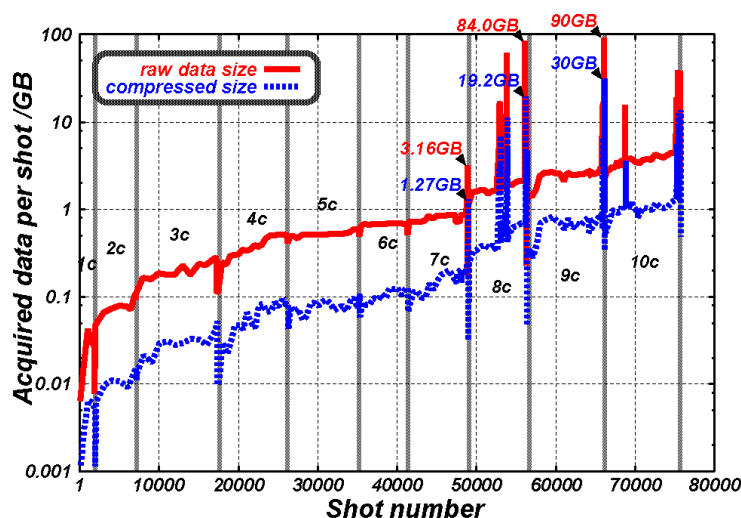


図3.3.3.7-1 LHD実験1回当たりの計測データ収集量の推移

LHDは大型装置でありながら一日に170回以上も放電を行うなど、世界で最も密度の濃い実験を遂行している。その大多数を占める三分間隔で行われる10秒以下の短パルス実験においても、一回あたりの計測データ量がおおよそ6.6 GB（平成19年現在）となっており、そのデータ生成率は世界の核融合実験の中でも群を抜いている。こうした計測データの増加は、LHD計測の堅調な進捗そのものを如実に表す指標といえる。

次の図は、平成15年度のLHD第7サイクル実験と平成19年度（第11サイク

ル) における LHD 計測数の変遷を示している。(図 3. 3. 3. 7-2 参照) 計測数自体も、32 から 74 へと 2 倍強になっているが、従来のデファクト・スタンダードであった一括 (バッチ) 収集の CAMAC 規格デジタイザは 3 割程度の増加に留まっている。これに対し、実時間収集が可能な PXI (CompactPCI) および WE7000 の新デジタイザは、CAMAC からの移行と新規計測での採用急増により、平成 19 年現在、全計測の半数を占めるに至っている。

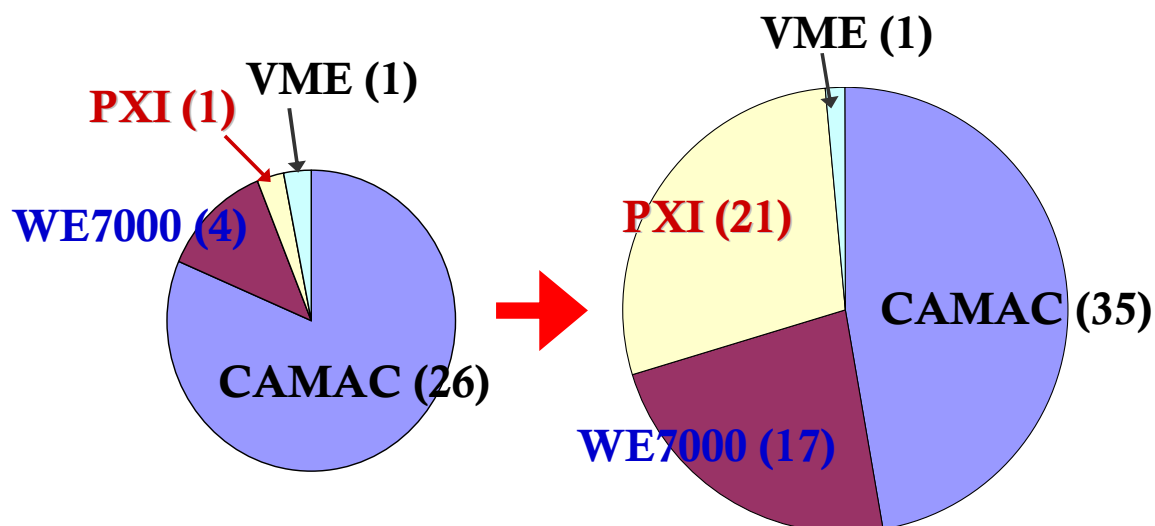


図3. 3. 3. 7-2 LHD計測における利用デジタイザ数の推移:左側が平成15年度の第7サイクル (全計測数 32)、右が19年度第11サイクル(全計測数 74)

新デジタイザ規格は、実時間収集機能だけでなくデータ伝送帯域も CAMAC より改善、またコスト的にも大幅に低価格になっているなど、計測数、データ量増加の両方に大きく寄与している[8]。(表 3. 3. 3. 7-1 参照)

表3. 3. 3. 7-1 新旧デジタイザの動作モード、収集帯域とチャンネル単価の違い

デジタイザ規格	収集動作	収集帯域 (1 シャーシ当り)	チャンネル単価 (千円)
CAMAC	バッチ	1.2 MB/s	127.3
WE7000	バッチ、実時間	2.2 MB/s	50.6
PXI (CompactPCI)	バッチ、実時間	160 MB/s	34.5

日々成長を続ける計測データによって加速度的に増える LHD の全蓄積データを、より柔軟かつ継続的に取り扱うため、LABCOM データシステムは、データ所在データベースと複数のストレージ装置により冗長化され、かつ拡張性に優れた分散データストレージ構成をとってきた[9]。収集された計測データは、収集コンピュータ (短期保存) →磁気ディスクアレイ装置 (中期保存) →光記憶メディアライブラリ装置 (長

期保存)、と複製・移送されるため、データ量がステップ的に増えた平成16年度以降、中期・長期ストレージ装置は毎年の増強を余儀なくされている。(表3.3.3.7-2参照)

表3.3.3.7-2 LHDで導入した光(磁気)メディアライブラリ装置の変遷。ISO-130 は135×153×11 (mm)、通称5インチ MO サイズと呼ばれる。DVD-R 価格は両面メディアのもの。

	MO	DVD-R	UDO	BD-R
利用時期	1997～2005	2002～	2005～	2006～
メディア容量(GB)	4.8	4.7/9.4	15/30	50
書込速度(MB/s)	2.3/4.6	1.35×16 倍速	4/8	4.5×4 倍速
サイズ(mm)	ISO-130	φ 120×1.2	ISO-130	φ 120×1.2
メディア価格(円/枚)	3800	1500	6300	2500

その一方で、波形データ圧縮に採用していた **zlib** は、画像データで圧縮率が大きく悪化するため、波形信号に **zlib**、画像に **JPEG-LS** と組み込み圧縮法を動的に切り替える新方法を編み出し[10]、平成19年度から実動(奥村晴彦教授、三重大学教育学部)、保存サイズ削減努力も続けている。情報圧縮と表裏一体である有効情報抽出法を応用した、計測信号データベースにおける類似パターン検索の研究も、NIFS一般共同研究(宝珍輝尚教授、京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科)や日米科学技術協力事業(**J. Stillerman, T. Fredian**, 米国マサチューセッツ工科大学(**MIT**))などにより平成16年頃から進めている[11,12]。

多様化する実験情報を一元化する解析データベースも、平成16年より実験に付随する各種パラメータの自動取り込みを精力的に行い、実験情報の集中化を進めてきた[13,14]。また物理データの代表値登録機能を付け加えるなど、Web 経由の GUI 検索の利便性を拡充[15]、17年度には解析環境そのものを提供する計算サーバの設置と公開、18年度には解析データベースの仕組みを三層構造に改良、セキュリティ対策を施すなど、機能の充実を進めてきた。(図3.3.3.7-3参照)

上記のデータ処理システムはすべて、超高速共同研究 IP 網 **Super SINET** / **SINET 3** を経由してフル活用が可能になっており、遠隔データ参照・遠隔装置運転・遠隔コミュニケーションのすべてを備える臨場感あふれた LHD 遠隔実験環境を提供している[16]。

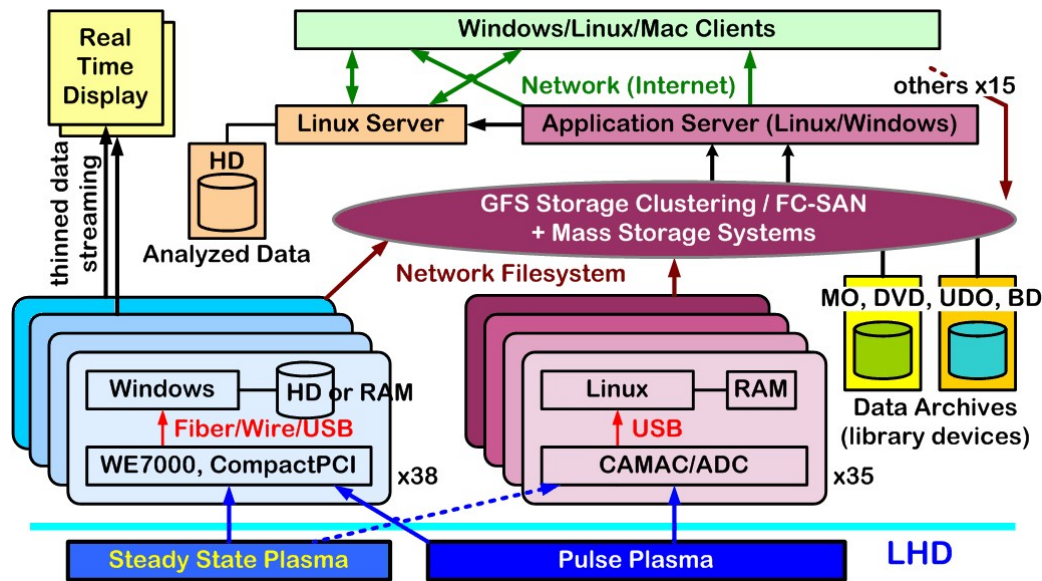


図3. 3. 3. 7-3 LHD大容量データ処理システム概略図: 右边が従来は CAMAC 収集、左辺が WE7000、CompactPCI の実時間収集系。実時間データ転送&モニタリングは、連続サンプルあるいは画像フレームを $1/N$ で間引いたストリーミングを行う。

- [1] H. Nakanishi, M. Kojima, S. Hidekuma, “Distributed processing and network of data acquisition and diagnostics control for large helical device (LHD)”, *Fusion Engineering and Design*, **43**, 3-4, (1999), pp.293-300.
- [2] H. Nakanishi, M. Emoto, M. Kojima, M. Ohsuna, S. Komada, LABCOM group, “Object-oriented data handling and OODB operation of LHD mass data acquisition system”, *Fusion Engineering and Design*, **48**, 1-2, (2000), pp.135-142.
- [3] H. Nakanishi, LABCOM group, “Design for Steady State Operation of LHD Diagnostics Control System”, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 1*, (1998), pp.409-413.
- [4] H. Nakanishi, M. Kojima, LABCOM group, “Design for real-time data acquisition based on streaming technology”, *Fusion Engineering and Design*, **56-57**, 1-4, (2001), pp.1011-1016.
- [5] H. Nakanishi, M. Kojima, M. Ohsuna, S. Komada, M. Nonomura, M. Yoshida, S. Imazu, S. Sudo, “Steady-state data acquisition method for LHD diagnostics”, *Fusion Engineering and Design*, **66-68**, (2003), pp.827-832.
- [6] 中西秀哉ほか, 「定常実験における超広帯域実時間データ収集」 *プラズマ・核融合学会誌*, **82**, (2006), pp.171-177.
- [7] H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, H. Okumura, Y. Nagayama, K. Kawahata, “Nonstop Lose-less Data Acquisition and Storing Method for Plasma Motion Images”, (to be published in *Plasma and Fusion Research*, 2007).
- [8] H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, S. Imazu, M. Nonomura, Y. Nagayama, K.

- Kawahata, "Portability improvement of LABCOM data acquisition system for the next-generation fusion experiments", *Fusion Engineering and Design*, **82**, 5-14, (2007), pp.1203-1209.
- [9] H. Nakanishi, M. Kojima, M. Ohsuna, M. Nonomura, S. Imazu, Y. Nagayama, "Multi-Layer Distributed Storage of LHD Plasma Diagnostic Database", *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES 7*, (2006), pp.361-364.
- [10] M. Ohsuna, H. Nakanishi, S. Imazu, M. Kojima, M. Nonomura, M. Emoto, Y. Nagayama, H. Okumura, "Unification of ultra-wideband data acquisition and real-time monitoring in LHD steady-state experiments", *Fusion Engineering and Design*, **81**, 15-17, (2006), pp.1753-1757.
- [11] H. Nakanishi, T. Hochin, M. Kojima, LABCOM group, "Search and retrieval method of similar plasma waveforms", *Fusion Engineering and Design*, **71**, 1-4, (2004), pp.189-193.
- [12] H. Nakanishi, T. Hochin, M. Kojima, LABCOM group, "Similar pattern search for time-sectional oscillation in huge plasma waveform database", *Fusion Engineering and Design*, **81**, 15-17, (2006), pp.2003-2007.
- [13] M. Emoto, et al., "Trial to Combine Heterogeneous Computer Systems in NIFS", *Fusion Engineering and Design*, **48**, 1, (2000), pp.83-89.
- [14] M. Emoto, Y. Iwadare, Y. Nagayama., "Immediate Data Access System for LHD Experiments", *Fusion Engineering and Design*, **71**, 1-4, (2004) pp.201-205.
- [15] M. Emoto, et al., "Development of a Flexible Visualization Tool", *Fusion Engineering and Design*, **60**, 3, (2002) pp.367-371.
- [16] M. Emoto, et al., "High-Quality Video Streaming System for Plasma Diagnostics using Super SINET", *Review of Scientific Instruments*, **74**, 3 II, (2003), pp.1766-9.

8) ITERを視野に入れた先進計測開発

大型ヘリカル装置の高性能化実験、ITERに代表される核燃焼実験を視野に入れて複数の計測機器の開発を進めている。ここでは、下記4件の計測開発について報告する。

- 1) Research and development of imaging bolometers for measurement of lost alphas and radiation from a reactor
- 2) 第一ミラー光学特性劣化とその対策
- 3) 高性能干渉偏光計測の開発
- 4) Cotton-Mouton 偏光計の開発

1) Research and development of imaging bolometers for measurement of lost alphas and radiation from a reactor

Imaging bolometers are a reactor-relevant alternative to resistive bolometers for the measurement of radiated power. The imaging bolometer known as the InfraRed imaging Video Bolometer (IRVB) consists of a metal foil in the plasma vacuum vessel which absorbs radiation from the plasma through a columnating aperture and which is then imaged through an IR vacuum window and IR optical system by an infrared camera located behind a neutron shield outside the vacuum vessel. An example of this is the IRVB installed on JT-60U in 2003 and 2004, shown in Figure 1 [1]. The shielding (from magnetic field, neutrons and gammas) was found to not be sufficient, therefore the shielding was increased in 2005. This resulted in the first two-dimensional measure (or

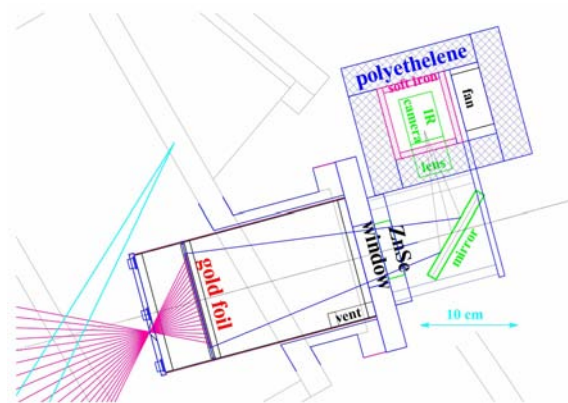


Figure 1 IRVB installed in JT-60U in 2003-2004.

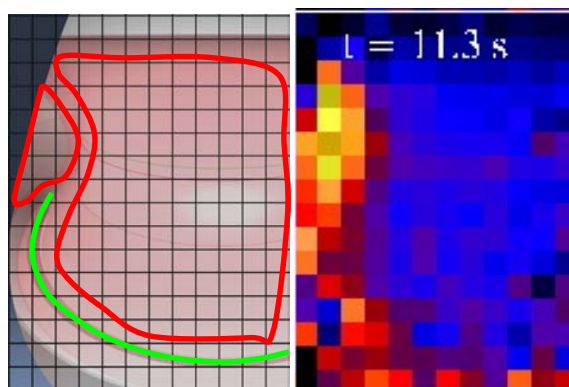


Figure 2 a) Computer Aided Drawing of IRVB semi-tangential field of view in JT-60U with divertor region indicated by green and core region indicated by red. b) Corresponding 12 x 16 channel brightness image from the IRVB in JT-60U at $t = 11.3$ s during shot 45664 [2].

image) of the radiation intensity on the foil (Figure 2b) from a tokamak deuterium plasma [2]. By using an aperture/foil combination which has a tangential view of a tokamak plasma as seen in Figure 2a, many lines of sight can be obtained which can be used to produce a two dimensional measurement of the local radiation intensity in the plasma (Figure 3) through tomographic inversion of the line integrated radiation signal by assumption of toroidal symmetry [3]. Currently a further upgrade of the IRVB on JT-60U is underway as shown in Figure 4 to improve the spatial and time resolutions and test various optical and infrared components in a tokamak reactor-relevant environment. This IRVB will serve as a test prototype for those to be installed in the future on KSTAR, LHD DD experiment, JT-60SA and possibly ITER. In addition to this work on JT-60U, calibration techniques for the IRVB are under development to determine the local thermal properties of the foil needed to correctly solve the heat diffusion equation on the foil and derive the radiation power intensity on the foil from the IR camera measurement of the foil's temperature distribution [4, 5].

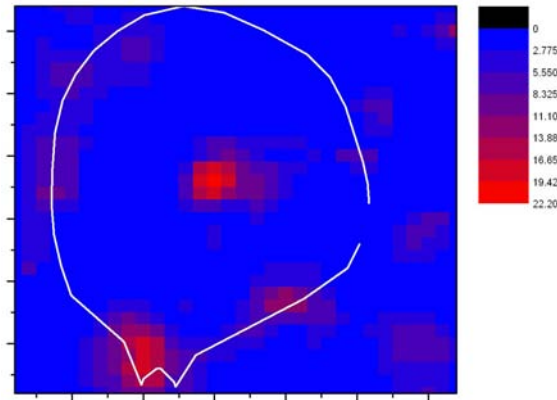


Figure 3 Emissivity image of poloidal cross-section in JT-60U at $t = 11.3$ s, during shot 45664, showing strong core emission from iron [3]. Pixel dimension is 10 cm and white line shows the first wall.

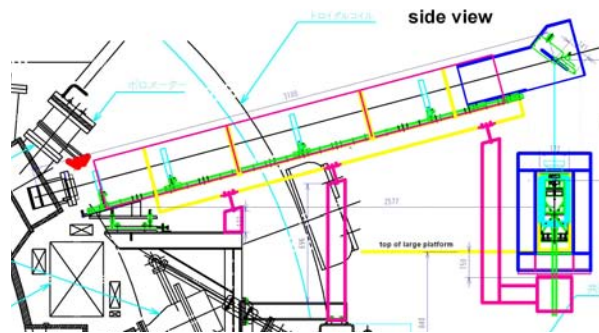


Figure 4 Upgrade of IRVB currently being installed

A further application of this imaging bolometer is to use it as a detector for a lost alpha diagnostic. In this case in order to differentiate the energy of the particles, a multilayer foil would be placed between the absorbing foil and the plasma as shown in Figure 5. Preliminary tests of a single channel IR thermal detector with absorbing and stopping foils have been made in 2006 on an ion beam at Tohoku University.

A double layer IRVB foil was invented (patent applied for

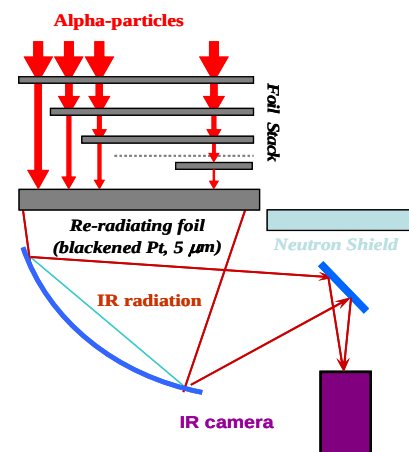


Figure 5 Concept of lost alpha detector using IRVB.

in 2006) in collaboration with St. Petersburg State Technical University (SPSTU), a prototype produced at SPSTU and then tested at NIFS last October. This foil will double the sensitivity of the IRVB [6].

- [1] S. Konoshima, B.J. Peterson, N. Ashikawa, Y. Miura and the JT-60 team, ‘Radiated Power Profile Observed by a Tangentially Viewing IR Imaging Bolometer in JT-60U Tokamak’, *Proc. 32th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics (Tarragona, 2005)* *Europhysics Conference Abstracts* **29C** P-4.092 (2005).
- [2] B. J. Peterson et al., ‘Observation of divertor and core radiation in JT-60U by means of bolometric imaging’, *J. Nucl. Mater.* **363-365** (2007) pp. 412-415.
- [3] Y. Liu et al., ‘Application of tomographic imaging to multi-pixel bolometric measurements’, accepted for publication in *Plasma and Fusion Research* (2007).
- [4] H. Parchamy, B. J. Peterson, et al., ‘Detailed In-situ Laser Calibration of the Infrared Imaging Video Bolometer for the JT-60U Tokamak’, *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E515 (2006) (4 pages).
- [5] H. Parchamy et al., ‘Spatial variation of the foil parameters from in-situ calibration of the JT-60U imaging bolometer’, accepted for publication in *Plasma and Fusion Research* (2007).
- [6] I. V. Miroshnikov et al., ‘Infrared Imaging Video Bolometer with a double layer absorbing foil’, submitted to *Plasma and Fusion Research* (2007).

3.3.3.8.2 第一ミラー光学特性劣化とその対策に関する検討

ITER ではポートや視線の制限により、多くのミラーを真空容器内に設置する必要がある。近年、プラズマによるミラー材のスパッタリング損傷や、スパッタされた壁材料・ミラー材料の再堆積による反射率の低下・偏光特性の変化が懸念されている。ITER ではミラーの交換を頻繁に行うことは出来ないため、ミラー寿命の検討や反射率低下を防ぐ方策の模索が、ITPA において重要課題として” High priority issue”に位置づけられている。

マイケルソン型偏光干渉計測では、プラズマ中をレーザー光を往復させるため、リトロ反射鏡（その形状からコーナーキューブ反射鏡とも呼ばれる）を利用することが多い。リトロ反射鏡は、任意の角度でレーザー光が入射しても、反射光は入射角と平行になるため、干渉・偏光計測には大変便利な反射鏡である。ITER においては、上下もしくは水平方向に突き抜けのポートがないために、リトロ反射鏡を真空容器内に設置して、レーザー光を入射ポートに戻す必要がある。リトロ反射鏡の反射率の低下は、計測精度に影響を及ぼし、劣化が甚大である場合は計測不能になることも予想さ

れる。また、偏光干渉計は、プラズマプローブ光として遠赤外～赤外領域、光軸調整及び振動補正用に近赤外～可視領域の波長を利用する。そのため、ミラーの反射率劣化特性は広い波長域で調べておく必要がある。その上、これまでミラー表面にカーボンが堆積する場合やスパッタによって表面損傷を受けた場合、反射によって偏光面が回転し、かつその回転角は入射光の偏光角に依存することが報告されており、偏光計測に対する影響が懸念されている。このような重要課題が多く残されているにもかかわらず、これまで偏光干渉計用リトロ反射鏡の分析は、国内外を問わずほとんど行われてこなかった。そこで、**東京工大飯尾研究室と共同で設置した炭酸ガスレーザー偏光計**で使用した真空容器内リトロ反射鏡の光学特性変化を調べた。LHDとITERでは、スパッタリング粒子のエネルギーや粒子束、堆積物の種類や量は同じではないため、同じ現象が起こるとは断言できないが、様々な劣化例とその劣化機構を解明することは、ITERでのミラー最適化のための重要な検討材料となり得る。**遠赤外～赤外領域の波長での測定は、中部大学の岡島研究室と共同で行った。**また、反射率等の測定だけでなく、ミラー表面状態を分析することは、劣化機構を推量する上で非常に有用な情報をもたらす。**SEMやEDS等を用いた表面分析については、九州大学応用力学研究所の吉田研究室と共同で行った。**

図 3.3.3.8.2-1 (a) は使用前のリトロ反射鏡である。ミラー材は SUS316 であり、表面は赤外領域での反射率を高めるために金コーティングしている。また、視野角を狭めてプラズマからのスパッタリング粒子を減らすために、反射鏡は保護円筒内に入れている。図 3.3.3.8.2-1 (b) は、真空容器内に設置したリトロ反射鏡の写真であり、プラズマとの距離は最も近いもので約 30 cm である。図 3.3.3.8.2-1 (c) に、第 4 サイクルで使用した後の反射鏡の写真を示す。金コーティングは見えなくなり、ミラー周辺領域は鏡面状態であるものの、中心に行くに従って曇っていることが分かる。

図 3.3.3.8.2-2 (a) に炭酸ガスレーザー及び YAG レーザーで測定した反射率のミラー半径位置依存性を示す。目視で確認したとおり、中心ほど反射率が低下しているこ

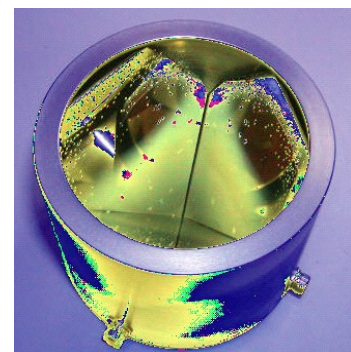
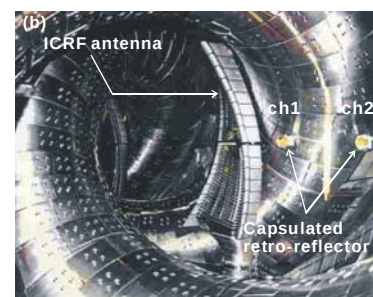
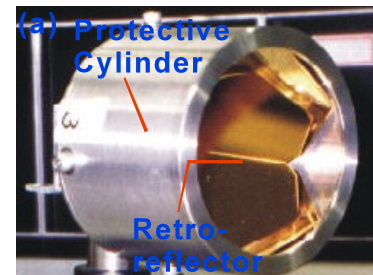


図 3.3.3.8.2-1: (a) 炭酸ガスレーザー偏光計の使用前リトロ反射鏡。反射鏡は保護円筒に入っている。(b) LHD 真空容器内部に設置したリトロ反射鏡、(c) 使用後のリトロ反射鏡。特に中心付近で著しい反射率の低下が見られる。

とが分かる。SEM で表面状態、及び EDS で元素分析を行ったところ、ミラー周辺部はスパッタリングによって金コーティングが失われ、母材まで損耗しているのに対し、ミラー端から 1 センチ程度の所ではスパッタリングと堆積がバランスして金コーティングが残っており、さらに内側に行くと壁材・ミラー材を起源とする Fe、Cr、FeO の堆積が支配的になる。堆積層の厚さは、中心に向かうに従って厚くなっていることが分かった。その模式図を図 3.3.3.8.2-2 (b) に示す。

さらに、堆積層表面は図 3.3.3.8.2-2 (c) に示すように、凹凸構造が生じており、その高さや密度は中心に行くに従って増大する。反射率低下が著しい中心付近

(図 3.3.3.8.2-2 (b)) では、およそ $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の凹凸になっており、所々には $2.5 \mu\text{m}$ 程度にも及ぶ突起も観察された。これが、中心ほど反射率が低くなっている理由と考えられる。中心部で堆積層が厚くなっている理由は、図 3.3.3.8.2-2 (b) に示すようにリトロ反射鏡の反射面は流入してくる粒子束に対して傾きを持っているために、表面の堆積物の多くは中心に向かってスパッタされる。中心に行くに従ってミラー面に囲まれる空間が狭まることから、Accumulate(蓄積)するためと推察される。このように、リトロ反射鏡はその形状のために中心部分での反射率低下が激しく起こると考えられる。このようなリトロ反射鏡の劣化機構はこれまでに認識されていなかった。また、ITER でのミラーの反射率低下の予想は、これまでスパッタリングによって生じる凹凸のみが考慮され、堆積層の凹凸構造は対象にされていなかった。これらの結果は、堆積層の影響の重要性と、ITER ではリトロ反射鏡の反射率低下が (Accumulation のために) 予想より速く進む可能性を示唆している。本結果は、2005 年 10 月末の ITPA において報告の要請を受けるなど、注目を集めている。

図 3.3.3.8.2-3 に、可視～遠赤外領域での反射率の波長依存性を示す。波長 $10 \mu\text{m}$ 以下で反射率の低下が大きいのに対し、 $50 \mu\text{m}$ 以上では 70% 以上の反射率を保っている。光軸調整や振動補正用に赤外以下の

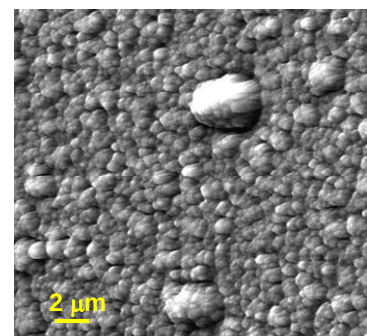
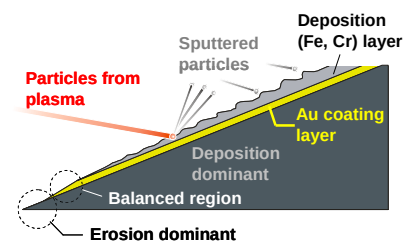
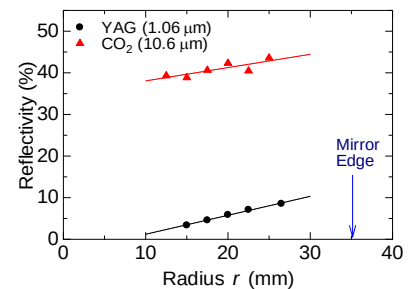


図 3.3.3.8.2-2: (a)ミラー半径に対する反射率分布、(b)ミラー表面状態の模式図、(c)ミラー中心部における表面 SEM 写真

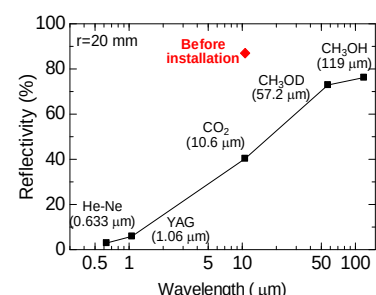


図 3.3.3.8.2-3: リトロ反射鏡反射率の波長依存性

波長を使用する際には、堆積物を減らす機構が必要と言える。波長 $57\text{ }\mu\text{m}$ の CH_3OD レーザーは ITER での偏光干渉計光源に適していると考えられるが、 $119\text{ }\mu\text{m}$ より短波長であることから、反射率低下が早いことが懸念されていた。今回のリトロ反射鏡に関しては、両者の差はほとんど見られなかった。凹凸による反射率変化の評価に使われる Benette's formula ($R/R_0 = \exp\{-(4\pi d / \lambda)^2\}$, R : 反射率、 R_0 : 平滑状態での反射率、 d : 凹凸の平均値、 λ : 波長)によると、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の凹凸であれば、両者の差は 10% 以下であることが分かる。また、本リトロ反射鏡においては、反射による偏光面の回転・楕円化は確認されなかった。これらの劣化機構・度合いは放電条件や設置位置にも依存すると考えられるため、今後も LHD において研究を継続的に行い、知見を増やしてゆくことが肝要である。

リトロ反射鏡の反射率低下を防ぐ方策としては、①スパッタリング粒子を減らす、②Fe, Cr 等の不純物がミラー面に落ち込むのを減らす、③中心部への不純物輸送を減らすことが必要である。①については、本リトロ反射鏡でも採用した保護円筒が効果的であるが、ミラー付近の構造物は不純物の発生源・付着面になることが、LHD における他の照射試験で明らかになっている (九州大学吉田研究室)。そのため、円筒にフィン構造を持たせ、円筒壁をスパッタされた不純物が反射鏡に落ち込まないようにすればよい。フィン構造の有効性は、九州大学吉田研究室によって原理検証実験によって証明されている。さらに、それでもミラー面に付着した僅かな堆積物が Accumulate することを防ぐため、光路を一旦平面鏡で L 字状に曲げ、不純物がリトロ反射鏡に落ち込まないようにする。平面鏡には不純物が振り落ちてくるが、Accumulation 機構が無いために不純物は比較的一様に分布し、リトロ反射鏡ほど反射率は低下しないと予想している。第 11 サイクルにおいて、図 3.3.3.8.2-4 に示す L 字構造リトロ反射鏡を LHD 内に設置し、上記の原理検証を行っている。

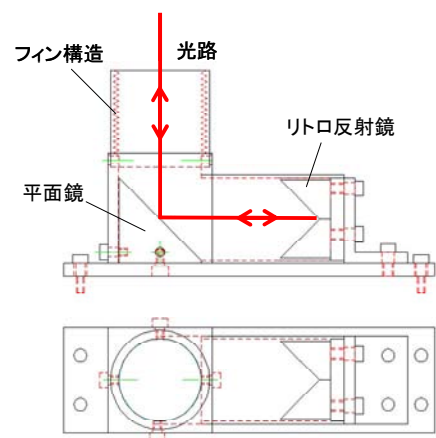


図 3.3.3.8.2-4: L 字構造リトロ反射鏡

3.3.3.8.3 高性能干渉偏光計測の開発

3.3.3.8.3-1 はじめに

核燃焼プラズマの実験 (ITER 計画) を成功させるためには、核燃焼によって生成される α 粒子を制御し、反応を持続させることが不可欠である。そのためには、閉じ込められたアルファ粒子の振る舞いを調べることは重要な研究課題であるが、その生

成、閉じ込めに関係したプラズマパラメータの詳細な分布計測も核燃焼プラズマの自立性を確保するために重要である。核反応率に密接に関係する密度分布と、プラズマの閉じ込め特性及び α 粒子の閉じ込めに密接に関係する内部磁場分布の計測は、ITER計画を進める上で必須なものである。ここでは、核燃焼プラズマの計測を目的として開発を進めている遠赤外レーザー干渉計測/偏光計測について記載する。この計測器の開発は中部大学の岡島研究室との共同研究として進められている。

3.3.3.8.3-2 短波長遠赤外レーザーの開発

ITER 計測では、電子密度/磁場分布の計測のためにポロイダル偏光計の設計を進めている。ここでは、波長 $119\ \mu\text{m}$ の CH_3OH レーザーを光源とし、ファラデー回転計測とコットンムートン計測を計画している。しかしながら、ITER 規模のプラズマではプラズマ密度勾配による屈折の影響が大きくその計測に困難が予想される。そこで、より短波長の遠赤外レーザー計測が必要となるが、これまでのところ $100\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ の波長領域での確立した計測は皆無といってよい状況である。そこで、先ず計測用のレーザー光源の開発を中部大学の岡島研究室において開始した。

遠赤外レーザーには、放電励起や光励起のガスレーザー、半導体レーザー、自由電子レーザー等があるが、現状では CO_2 レーザー励起の分子レーザーが主となっている。現在までに、100 種類以上の分子から 4000 本以上の発振線が報告されているが、実用化されているレーザーは数 10 本と限られている。そこで、この波長領域における計測用光源を確立するために、広い波長範囲でのレーザー発振が可能な cw CO_2 レーザー励起の遠赤外レーザー装置を製作した。そして、短波長遠赤外領域に多くの発振線をもつ CH_3OH とその同位体を中心にレーザー線を探査し、その動作特性を含めたデータベースを作成し目的に合致したレーザーの開発を行った。表 3.3.3.8.3-1 に $40\sim 100\ \mu\text{m}$ 領域において 10mW 以上の発振出力が得られたレーザー発振線を示す。

これらの発振線の中で比較的出力が強く、目的に適した波長であった 9R(8) CO_2 レーザー励起の $48\sim 57\ \mu\text{m}$ CH_3OD レーザーに注目した。そして、レーザー装置の最適化と高出力化を行った結果、両レーザーの和出力で約 2.4 W を得た。この出力値は、連続発振遠赤外レーザーとしては世界最高値である。

表 3.3.3.8.3-1 $40\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 領域の高出力レーザー発振

CO ₂ laser		FIR laser			
Line	Power (W)	Molecule	Wavelength (μm)	Length (m)	Power (mW)
9R(10)	83	CH ₃ OH	96.5	2.2	68
9P(34)	75	CH ₃ OH	70.5	2.2	65
10R(16)	123	CH ₃ OH	63.0	2.9	54
9R(34)	63	CD ₃ OH	52.9	2.2	10
10R(18)	89	CD ₃ OH	41.4	2.2	13
10R(16)	113	CD ₃ OH	81.6	2.9	25
9R(8)	153	CH ₃ OD	57.2	2.9	1.6 W
	153	CH ₃ OD	47.6	2.9	0.8 W
10P(46)	43	CH ₂ DOH	49.1	2.2	17
9R(30)	65	NH ₃	67	2.2	97

3.3.3.8.3-3 2波長遠赤外レーザー干渉計の開発

今回、新しく見つかった2波長同時発振する遠赤外レーザー光を用いた新型2波長レーザー干渉計装置のブロックダイアグラムを図 3.3.3.8.3-1 に示す。この干渉計の特徴は、(i) 同一のレーザーからの2波長同時発振を用いている、(ii) 発振波長が $57\mu\text{m}$ と $48\mu\text{m}$ であり、現在の磁場閉じ込め装置の干渉計測装置に用いられている波長 $119\mu\text{m}$ レーザーと比べて、プラズマによる屈折効果が約4分の1となり高密度プラズマに対応できる、(iii) 使用する2波長の値が近接していることから、同じ光学素子及び検出器が利用可能である、(iv) レーザーの出口から検出器まで全く同じ光学経路を伝搬することから理想的な機械的振動の補正が期待できる。波長 $57\mu\text{m}$ と $48\mu\text{m}$ のレーザー発振線は、遠赤外レーザー共振器の出力部において異なる偏光方向で発振している。 $57\mu\text{m}$ は CO_2 レーザー励起光に対して直交した方向に、そして $48\mu\text{m}$ は平行方向の偏光面を有している。そのため、計測用レーザー光源として同時使用するためには偏光方向を揃える必要があり、ダイプレクサーを用いて偏光方向を揃えている。

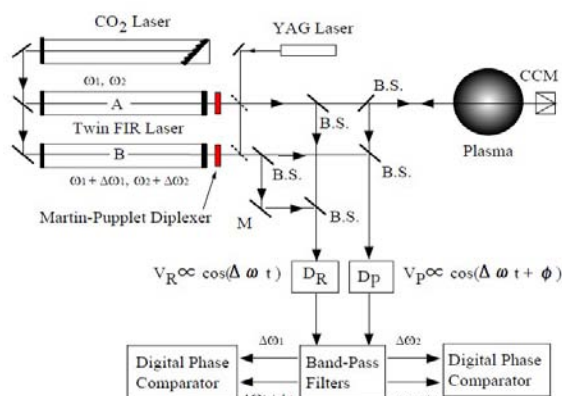


図 3.3.3.8.3-1 2波長同時発振型レーザー干渉計

2波長干渉計の性能試験をするためにマイケルソン型干渉計を構築し、その性能試験を実施した。ビームスプリッター及びビーム合成器には、短波長遠赤外領域において吸収の少ないシリコンのエタロン板を使用した。検出器として Ge:Ga を使用した。レーザー出力を約1/100以下に減衰させた状態で得られたS/Nはおよそ40dBであり、多チャンネル干渉計を組み上げる上で十分なS/Nであることが確認された。

反射鏡をピエゾ駆動型ステージ上に取り付けて、干渉位相変化を模擬した実験結果を図 3.3.3.8.3-2 に示す。鏡の駆動振幅はおよそ $50\mu\text{m}$ (p-p) であり、周波数は約10Hzである。詳細な部分にはビート信号の歪みによる影響が見られるが、観測された振幅の大きさは2つのレーザー干渉計ともほぼ同じであることから、本2波長干渉計を用いて機械的振動の補正が可能である事が確認された。本レーザー計測はITER計測として有用である事が実証された。

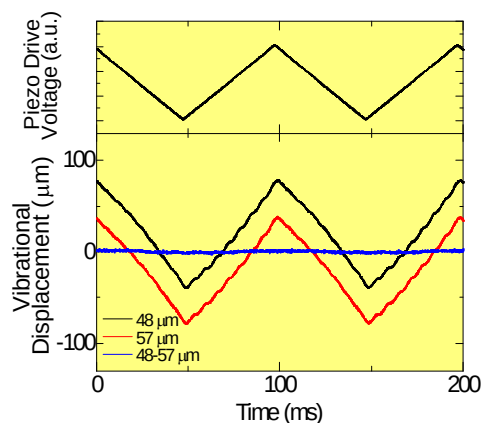


図 3.3.3.8.3-2 2波長干渉計によって観測されたミラー変位量

3.3.3.8.4 Cotton-Mouton 偏光計の開発

干渉計で計測される線平均電子密度は、物理解析だけでなく、装置の運転上でも不可欠なパラメータの 1 つである。そのため、いかなる放電条件でも計測ミスのない高い信頼性が必要である。通常、位相変化が 2π を超える干渉計は、高い密度分解能を持ち、密度計測器として広く使用されている。しかし、ITER で想定される 10^{20} m^{-3} 程度のプラズマにおいては、波長 $119 \text{ }\mu\text{m}$ の CH_3OH レーザ干渉計ではプローブ光の屈折変位によって信号強度が低下・途切れが生じ、 2π の不確定性から密度情報が失われる計測ミス（フリンジジャンプ）が懸念される。また、干渉計では、機械振動による光路長の変化があった場合、それによる位相変化がプラズマによる位相変化に加算されて誤差要因になることも問題である。そのため、干渉計システムを振動の大きい装置本体から完全に分離し、複数の波長で干渉計を構築して振動成分を補正する手法が取られる。しかし、ITER のように巨大な装置では、干渉計架台を独立に作ることは困難であり、また後者の 2 波長干渉計では 3.3.3.8.3 で述べられたように発振から同軸光路になっていないと、完全に振動成分を除去することは難しい。この点、偏光計で計測するのは偏光状態の変化であるため機械振動の影響が受けにくい。また、機械振動による位相変化が無視できるため、適切な波長を選択して位相変化を 2π 以下にしても計測が可能であり、原理的にフリンジジャンプがない信頼性高い密度計測手法となる。

偏光計は、プラズマ中の Faraday 効果（偏光面の回転）または Cotton-Mouton 効果（偏光の楕円度の変化）を利用するが、本研究ではポロイダル断面にてプラズマ中心コードでの計測が可能な Cotton-Mouton 偏光計の開発を行った（中心コードでは Faraday 効果を誘起する磁場成分がほぼゼロになるため、Faraday 偏光計では計測が不可能）。Cotton-Mouton 効果とは、プラズマ中で O/X-mode の屈折率が異なるために透過光の楕円度が変化する現象である。O/X-mode 間に生じる位相差 ϕ_{CM} は、

$$\phi_{\text{CM}} [\text{rad.}] = \phi_0 - \phi_x = 2.4 \times 10^{-20} \lambda [\text{mm}]^3 \int n_e [\text{m}^{-3}] B_{\perp} [\text{T}]^2 dl [\text{m}]$$

となり、磁場の重みがつくものの、位相差より線平均電子密度が評価できる。ITER においても、Faraday 偏光計（電流分布計測用）と組み合わせた Cotton-Mouton 偏光計による密度計測が計画されているが、実機での適用はこれまで極めて少ないため、計測精度を決める要因や特性を探り、大型装置への適用可能性を検証することを目的に、Compact Helical System (CHS) にて、HCN レーザー（ $337 \text{ }\mu\text{m}$ ）を用いた Cotton-Mouton 偏光計を開発した。なお、HCN レーザーの利用については、中部大学の岡島研究室と共同で行った。

図 3.3.3.8.4-1 に Cotton-Mouton 偏光計の光学系を示す。プローブ光には高速回転回折格子 (Super Rotating Grating : SRG) を用いて 1 MHz の差周波数を与えた、O/X モードに相当する二つの直線偏光を重ね合わせた光を使っている。これを偏光子を通して計測することにより、差周波である 1 MHz のビート信号が得られる。Cotton-Mouton 効果となる O/X モード間の位相差は、プローブ光とリファレンス光のビート信号の間の位相差として現れる。HCN レーザーを用いた場合は、位相変化は電子密度 10^{20} m^{-3} 、磁場強度 2 T で 10 度程度であるため、位相分解能を高めるために、ディジタルバンドパスフィルタを併用した Complex demodulation 法を用いて位相差を抽出している。Cotton-Mouton 効果を「ビート信号の位相差」として検出する手法は、フィルタによるノイズ除去が容易にできることや、プローブ光のプラズマによる屈折や発振不安定性等による強度変化の影響を受けないことを利点として持つ。JET では既存の Faraday 偏光計を改造して強度測定による Cotton-Mouton 偏光計測を開始したが、本システムの位相検出手法の方が、より高い時間・角度分解能が期待できる。また、本研究では Cotton-Mouton 偏光計測の性能評価を行うため、比較のために通常の干渉計測による線平均電子密度が必要である。そのため、偏光計システムを同時・同一コードで干渉計測も可能な光学系にしている。プラズマ透過後のプローブ光の一部を分岐し、偏光子を用いて直交直線偏光から一方向の偏光成分を選択する。リファレンス光からは、もう一方の偏光成分を取り出し、両者を合成することで、プラズマによる位相変化を含むビート信号が得られ、干渉計測が可能になる。

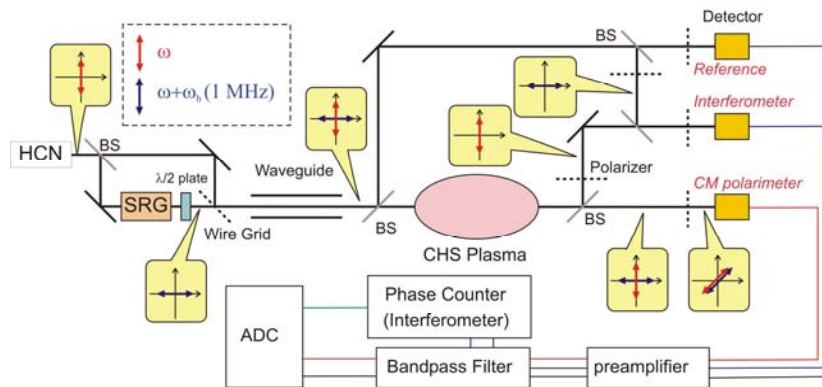


図 3.3.3.8.4-1: Cotton-Mouton 偏光計の光学系。同時・同一コードで通常の干渉計測が可能なシステムとしている。

図 3.3.3.8.4-2 に、Cotton-Mouton 偏光計、及び干渉計で測定した線平均電子密度 $\bar{n}_e^{CM}$ 、 $\bar{n}_e$ を示す。両者は、ほぼ合致する結果が得られている。ただし、検出器～光学部品間の多重反射成分 (バックトーク) や、干渉計・偏光計のビート信号の間の電氣的クロストーク成分は、密度信号に見かけの振動成分を引き起こし、その振幅は最大で $\pm 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度に相当し、計測を著しく阻害するものであった。正しい密度計測を行うには、それらを十分抑制が不可欠であり、多重反射光を減衰させるアッテネータの

利用や、データ収集系の改良によってそれらを抑制している。現状の電子密度分解能は、時定数 3.2 ms で $2.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ (角度分解能 0.17 deg.)である。ノイズレベルを決める主原因はビート周波数の周波数ノイズであることが分かっている。周波数ノイズは、回転回折格子の製作精度に起因しており、この改善のためには、より製作精度の高い回折格子を利用するか、または双子型レーザーによるビート信号の生成が考えられる。

以上のように、密度計測手法として Cotton-Mouton 偏光計の有効性は確認できたが、ITER における高精度計測のためにはクロストーク・バックトーク成分を十分に抑制すること、ビート信号の周波数スペクトルの高品質化が重要課題であることが分かった。

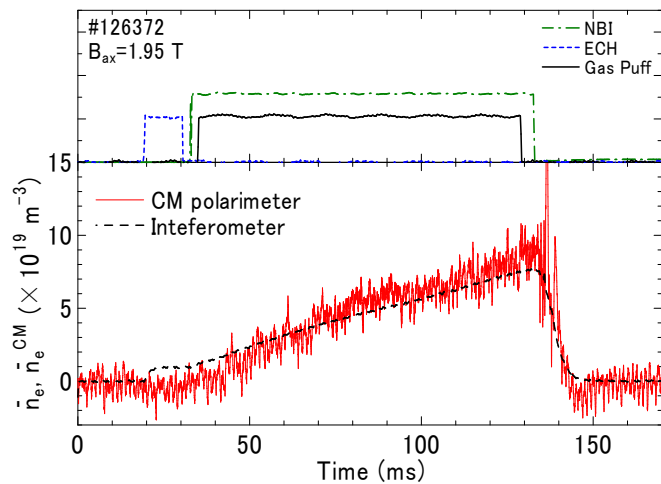


図 3.3.3.8.4-2 : Cotton-Mouton 偏光計・干渉計のプラズマ中心コードでの線平均電子密度計測結果の比較

3. 4 理論・データ解析

1) 新古典輸送

3次元閉じ込め磁場構造を有するLHDなどのヘリカル系においては、ヘリカルリップルに捕捉された粒子の存在によって、低衝突周波数領域において拡散係数が増大する、いわゆるリップル輸送（ $1/\nu$ 輸送）が存在する。新古典輸送を定量的に把握することは、実験シナリオの立案、結果の解釈、異常輸送の程度の把握などにも大きく寄与するため、理論・データ解析研究系を中心として、新古典輸送理論のLHD実験への適用とともに、密度分布決定機構に関する研究、磁気島を含む乱れた磁場領域における輸送解析、有限軌道幅効果を取り入れた解析など、輸送解析の拡張に向けた研究が、輸送解析コード開発とともに体系的に展開されている。

新古典粒子拡散流束の径電場依存性が、図3. 4. 1-1の例に示すように、イオンと電子で異なっていることから、それらが一致するように径電場が決定される。この両極性径電場の役割は、LHD実験においても広く認識されている。特に、そのような両極性径電場が複数存在しうる場合には径電場遷移現象が予測され、閉じ込め改善現象と深く関わっており、高性能LHDプラズマ実現への方策として、非常に重要な観点の一つとなっている。

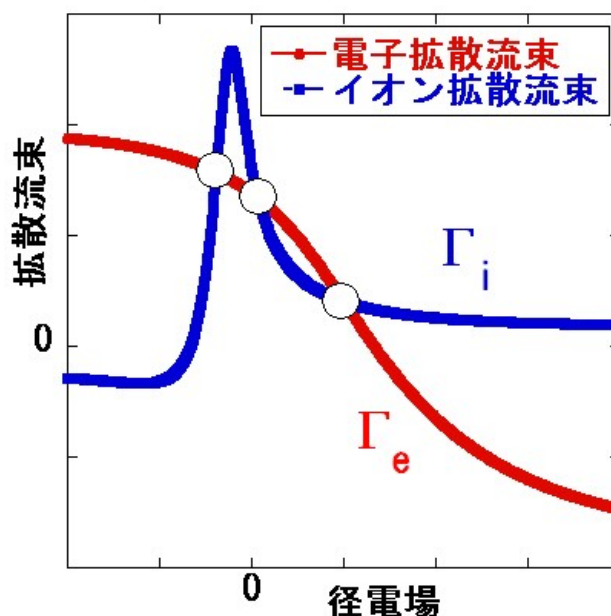


図3. 4. 1-1 ヘリカル系プラズマにおける 粒子衝突に起因する粒子拡散流束
(赤:電子、青:イオン)の径電場依存性の例

その一例として、LHDで達成された電子温度一億度超などの高電子温度プラズマについて、中心部の径電場が、電子加熱によって電子ルート（正の大きな径電場）へと遷移することで実現されていることを明らかにした。この閉じ込め改善現象発現の電子加熱パワー閾値が、径電場分岐条件を考慮することで理解できる、三次元性の強い磁場配位ではその閾値が低下する、などの知見を、詳細な新古典輸送解析に基づいて次々に明確にし、LHDにおける種々の磁場配位条件での高電子温度プラズマ達成に貢献した。このLHDでの実績を踏まえ、国際的先導性を持って、本知見の国内外のヘリカル装置（CHS、TJ-I I、W7-AS）への適用を行った。解析対象となった各装置での典型的な高電子温

度プラズマの電子温度分布を、図3. 4. 1-2に示す。これらの放電は、中心部での電子ルート遷移というヘリカル系特有の物理機構によるものという観点から、統一的に、中心部電子ルート閉じ込め：Core Electron-Root Confinement [C E R C] という総称を導入した。（I A E A核融合エネルギー会議での発表が、磁場閉じ込めの総括講演でも取り上げられ、この名称も国際的認知を得た。）これまでの個々の実験装置での実験結果、理論解析の枠を超えることで、閉じ込め磁場配位(新古典リップル輸送の大小など)依存性・加熱シナリオ(加熱された捕捉電子の割合など)依存性をさらに体系化することが可能となり、C E R Cの装置間の類似性から相違性の解明という、国際的にも高い評価を得る研究を展開した [1]。非線形媒質であるプラズマが有する分岐性を、磁場構造を通じて外部から制御するという独創的な学術的着想が、LHDをはじめとしたヘリカル系プラズマの高性能化に大きく貢献したと言える。

また、高精度の新古典輸送解析を行うに当たり、国際的に進められている各種新古典輸送コードのベンチマーク活動と緊密な連携をとり、さらに、平成17年度に着手された国際ヘリカル系分布データベース活動の先駆的課題として、国際的共同研究の中心的役割をも果たした。

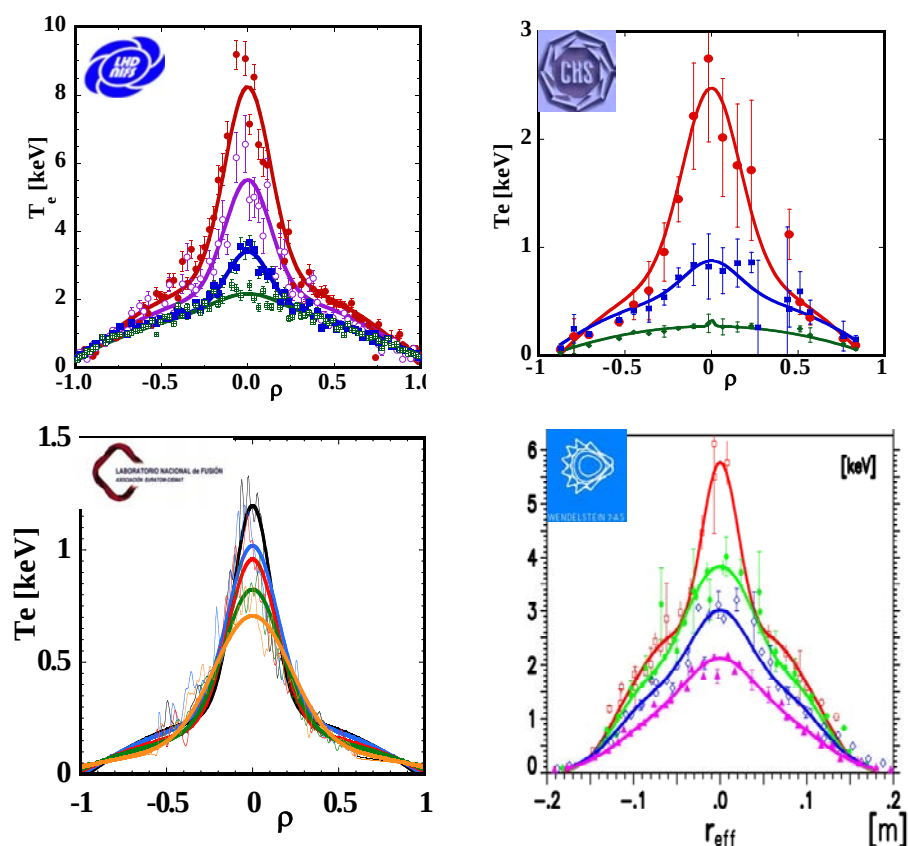


図3. 4. 1-2 LHD、CHS、TJ-II、W7-ASにおける
高電子温度プラズマ(中心部電子ルート閉じ込めCERC)電子温度分布の典型例

ヘリカル系でのプラズマ輸送を考えると、電場による粒子軌道や輸送の改善が期待できるが、その電場に起因するヘリカル共鳴やトロイダル共鳴が起これば、バナナ幅の大きな、いわゆる共鳴バナナが形成され、輸送の増大や閉じ込めの劣化が生じるため、十分な検討を要する重要な研究課題である。磁力線追跡コードMAGNで計算された現実的なヘリカル磁場配位においてバウンス平均 Fokker-Planck 方程式を解く新古典輸送コードCDH1が、独自に開発されてきた。速度空間での可変メッシュを採用するなどの努力により、極めて低衝突周波数領域でも、高精度かつ高速の計算が可能であるという特徴を有しており、パラメータ依存性等の検討に極めて有効なコードである。CDH1を用いてLHDにおけるプラトー領域から低衝突周波数領域に渡る広範な領域での輸送係数およびブートストラップ電流を解析し、電場による輸送の低減とヘリカル共鳴の存在する場合の閉じ込め劣化現象について詳細な検討を行った。電場が大きい($R\omega_E/v_T=0.1$ 、ここで R は大半径、 ω_E は EXB ドリフト周波数、 v_T は熱速度)場合には、ヘリカル共鳴が起これば、閉じ込めの劣化が予測されることが示された。[2]。LHDにおける輸送に関連した重要な研究テーマの一つは、トーラス内側への磁気軸シフトによって輸送をどれだけ軽減できるかを実証する事である。CDH1を用いて、輸送係数及びブートストラップ電流に対する磁気軸シフトの効果について検討した。図3・4・1-3に粒子拡散係数とブートストラップ電流に対する衝突周波数依存性について、磁気軸位置が $3.75\text{m}(\Delta=0\text{cm})$ 、 3.65m 、 3.55m の場合の $\rho=0.5$ において、 $R\omega_E/v_T=10^{-3}$ の電場を仮定した計算結果を示す。低衝突周波数領域での、電場による粒子拡散係数の減少、ブートストラップ係数が衝突周波数に依存し

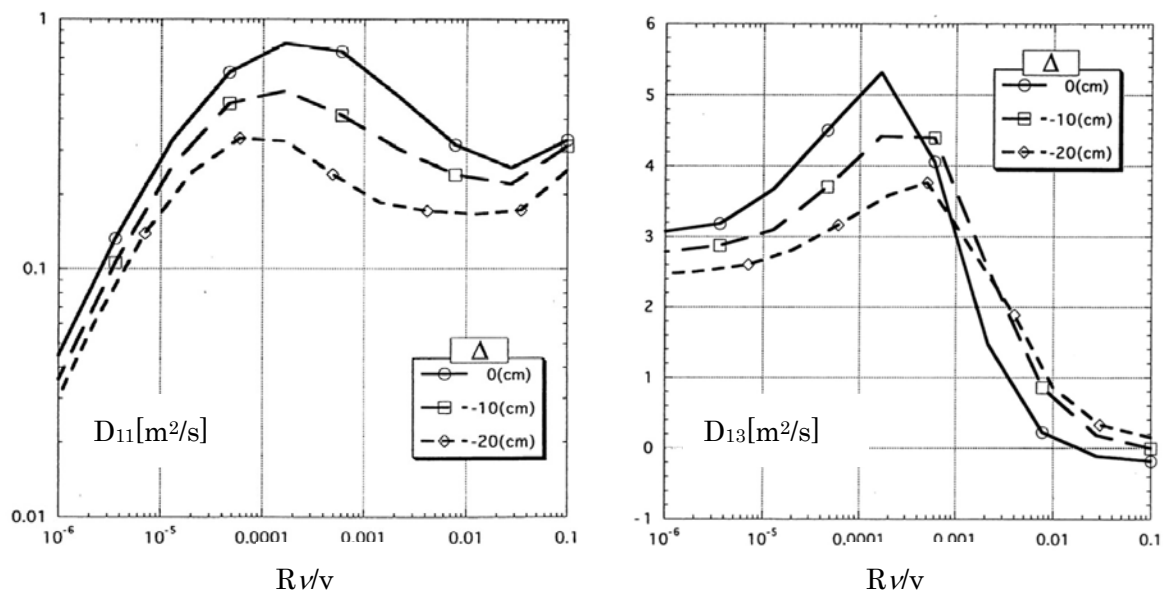


図3・4・1-3 CDH1コードによる、(左)粒子拡散係数(D_{11})、(右)ブートストラップ係数(D_{13})の規格化衝突周波数依存性

なくなる(Shaing の理論予測)ことが明確に示されている。CDH1 が、非常に低衝突周波数領域においても、高精度の計算が可能であることを改めて示す結果である[3]。

従来の新古典輸送理論は、案内中心軌道の径方向ドリフト幅がプラズマの勾配長に比べて十分小さいとする局所的輸送理論であるが、径電場の分岐が生じている場合や、高性能の高温・低衝突プラズマでは有限軌道幅効果が新古典輸送に与える影響が無視できなくなる可能性がある。そこで、新古典輸送理論・解析の拡張を目指して、従来の近似・簡略化を極力用いずに、有限軌道幅効果を含めた形でヘリカル磁場配位における新古典輸送と両極性径電場を同時に解くためのシミュレーションコードFORTEC-3Dが開発されている。このコードでは δf モンテカルロ法と呼ばれる粒子シミュレーション法が採用され、詳細な磁場配位データを用いた粒子軌道追跡と、厳密なFokker-Planck衝突項を用いてドリフト運動論方程式を解くことで新古典輸送を高精度に求めることが可能である。また、イオンと電子の径方向流束の差から径電場の時間発展を解くことで、図3・4・1-4に示すように両極性径電場の時間発展も同時にシミュレーションできる。コード開発は着実に進んでおり、LHDをモデルとしたヘリカルプラズマにおける径電場の分岐を含んだ新古典輸送計算が可能となっている。有限軌道幅効果の影響など従来の新古典理論との差異が低衝突プラズマでどの程度重要となるかの同定などを含めた実験解析への応用が期待されている。

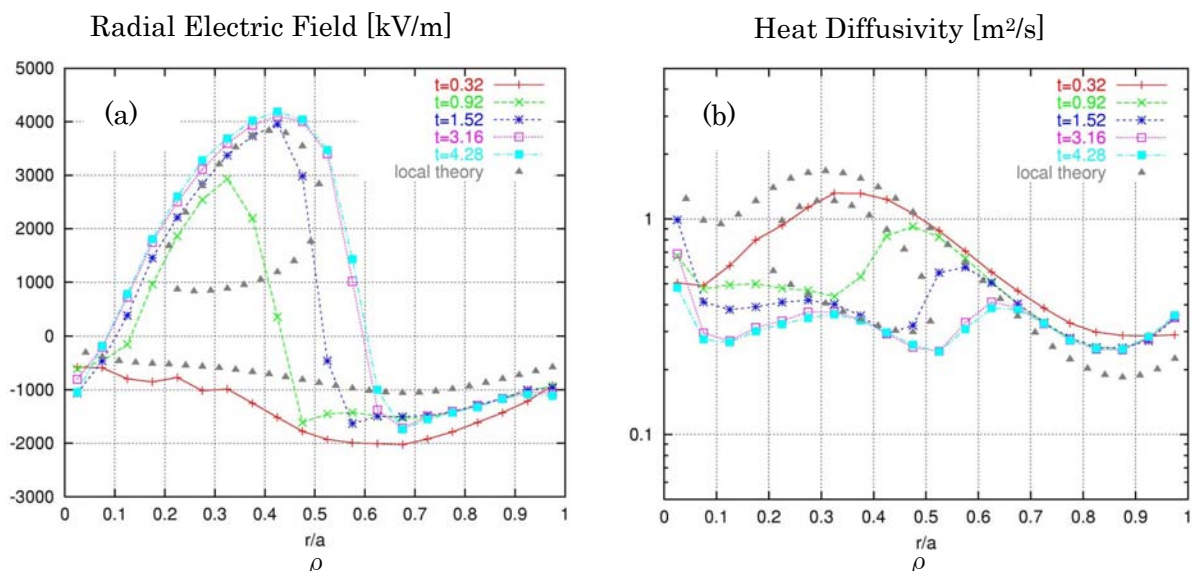


図3・4・1-4 FORTEC-3Dで計算されたLHDモデル配位での新古典輸送による径電場分布 (a) と、イオン熱拡散係数分布 (b) の時間変化の様子。△印は従来の局所的新古典理論の両極性条件を満たす解。(時間 t は $\rho = 0.5$ におけるイオン-イオン衝突周波数での規格化値)

LHD実験において、周辺部が高温化した場合、従来の流体描象に基づく輸送モデルでは、周辺の輸送特性が十分に説明できず、新古典輸送理論による知見も含めた新たな理論モデルの必要性が明らかになってきた。周辺部が比較的高温($T_{\text{edge}} > 500 \text{ eV}$)である場合に、外部コイルによって印加された $m/n=1/1$ 磁気島のヒーリング現象が観測された[4]ことを受けて、入れ子状の磁気面の存在を仮定しない3次元平衡解析コード(HINT)を用いてシミュレーションを行った結果、従来のセルフヒーリング理論とは異なり、Pfirsch-Schlüter電流のみではこの現象を説明できないことを示したことによる新たな知見である[5]。このシミュレーション結果により、実験において観測されたヒーリング現象は、磁気島周辺のブーツトラップ電流によるものであると推測されている。

この実験結果は、周辺部が高温化した場合、周辺プラズマ輸送に対する従来の理論モデルでは不十分であることを示す例の一つであり、理論モデルの見直しは、LHD固有の問題に留まらず、環状プラズマ共通の問題となっている。例えば、近年のトカマク実験において、温度の高い周辺部($T_{\text{edge}} \sim 1 \text{ keV}$)の磁場構造が、外部コイルによる共鳴磁場摂動によって乱れた場合、Rechester-Rosenbluthの磁力線拡散理論に基づいた理論的予測と比べて極めて小さな電子熱輸送係数が観測されていることから言えることである。そこで、環状プラズマの周辺部が高温化した場合の周辺輸送の理論モデルを見直すため、現在、磁気島を含む乱れた磁場領域におけるドリフト運動論的輸送シミュレーションを行っている。乱れた磁場構造中における輸送解析には、入れ子状の磁気面の存在を仮定しない解析コードが必要であり、この目的のために、シミュレーション科学研究部（旧理論・シミュレーション研究センター）とも協力しながら、 δf 法に基づく新古典輸送シミュレーションコード（KEATS）の開発を行っている[6]。最新の成果として、図3.4.1-5の左図に示した環状プラズマ周辺部がエルゴディックになっている磁場配位においてイオンのエネルギーフラックスの計算を行い、高温領域($T_{\text{edge}} \sim 1 \text{ keV}$; $\rho \sim 0.8$)ではエネルギーフラックスが、磁力線拡散理論による予測(図3.4.1-5の右図の菱印)と比べて、極めて小さいことをシミュレーション(右図の丸印)により示すことができた。一方、低温領域($T_{\text{edge}} \sim 100 \text{ eV}$; $\rho \sim 1$)においては、従来の理解の通りに、シミュレーション結果(右図の丸印)は、磁力線拡散理論による予測(右図の四角印)と良く一致している。ここで、以上の計算では、密度は一定($n = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)で、磁気島の存在を無視した温度分布(右図の三角印)を仮定した。また、右図の菱印は磁力線拡散理論の無衝突極限における熱輸送係数の公式を用いたヒートフラックスの理論的予測値、右図の四角印は流体極限における公式を用いた予測値である。電子のエネルギーフラックスについては、シミュレーション時間がイオンの約40倍長く掛かるため(イオンの場合は、実

時間で約40時間必要とした)、計算時間圧縮のための計算スキーム見直しなど、現在準備中である。

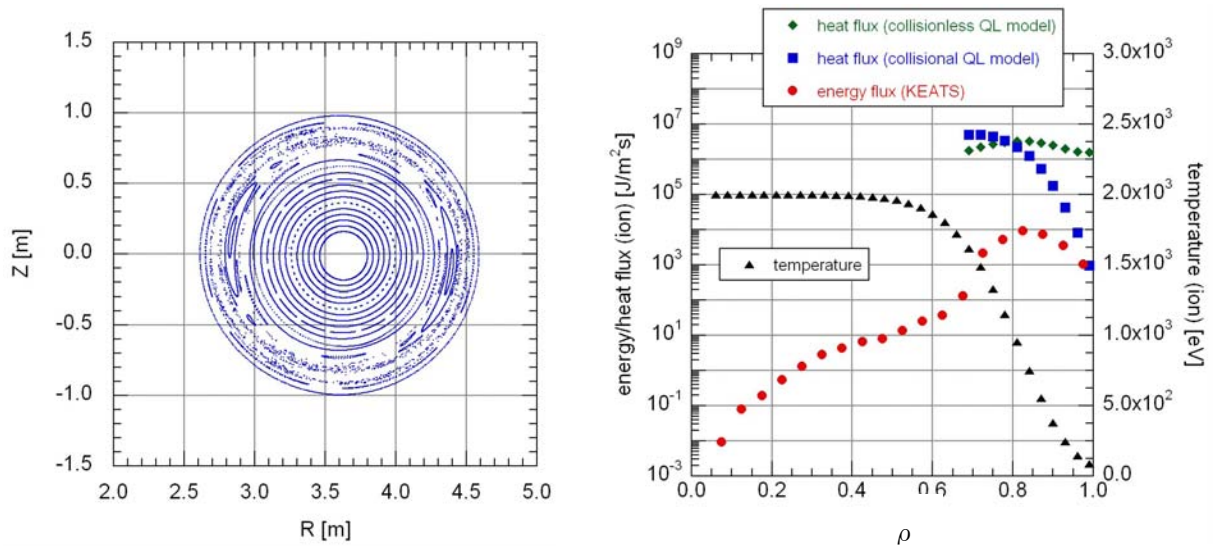


図3. 4. 1-5

左: あるポロイダル断面における磁力線のポアンカレプロット

右: KEATSコードにより見積もられる動径方向のイオンのエネルギーフラックス

環状プラズマにおいては、構成粒子の磁場に平行方向と垂直方向の運動に強い非等方性があるため、プラズマは大きな垂直粘性を伴う弱乱流状態に支配され、線形安定性及びその結果の準線形異常輸送が非線形プラズマの垂直輸送の第一近似としてよく成立しているという仮定のもと、新古典粒子輸送とともに異常粒子輸送に関する解析も進められている。LHD実験における低ベータプラズマにおいて、密度分布がホロー分布になる傾向に注目した。これは、トカマクにおいて密度分布が通常、磁気軸に向かってピークしているのと対照的な特性である。関連する輸送として、新古典粒子束と準線形粒子束を図3. 4. 1-6 (a)及び(b)で示している。(a)の複数の線は、異なる密度分布に対して計算されたもので、ピーク(●)からホロー(■)まで考慮している。この計算条件下では、新古典粒子束は密度分布によらず常に正になっている。このため、粒子源がない位置では定常状態で全粒子束が釣り合わなければならないことから、異常輸送粒子束は負でなければならない。(b)では、ある径方向位置における、準線形粒子束の逆密度勾配長($1/L_n = -dn/dr/n$; n は密度)依存性を示している。負あるいは小さな正の逆密度勾配長、すなわちホローもしくはほぼ一定な密度分布の場合に粒子束は負であることがわかる。従って、定常状態を保つためには密度分布はピークできないことがわかり、LHD実験結果と無矛盾である。さらに(a)からわかるように、磁場配位によっては新古典輸送を十分小さくすることが可能であり($R=3.53m$ の場合)、実験で計測される密度分布は、トカマクと同様、よりピークした分布となる傾

向が見出されている。新古典輸送が無視できるとすると、定常で異常粒子束はそれ自身がゼロとなる必要がある。温度分布は通常ピークしており、外に向かって温度勾配長の逆数が大きくなる。対応して、(b)においてゼロ点をつないでいくと、径方向内側から外側に向かって密度勾配長の逆数が大きくなる、すなわち、ピークした密度分布が得られる。これはLHD及びトカマク実験の結果とも矛盾がない。これらの結果は、準線形輸送解析が弱乱流実験プラズマ輸送に対して予測性を持っていることを示唆しており、論文[7]で発表されている。

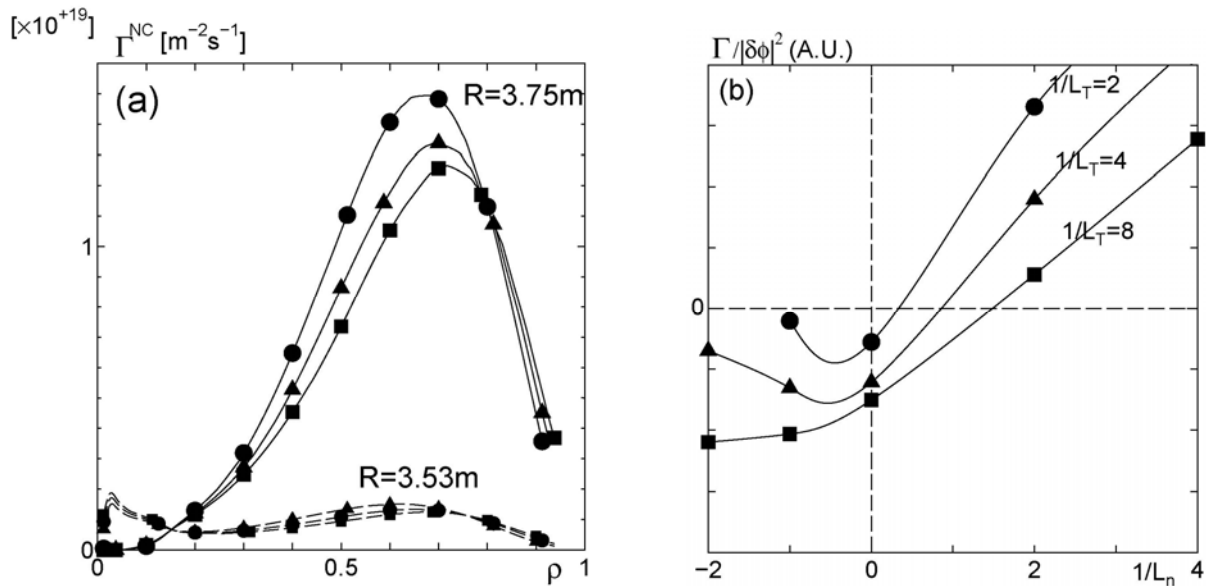


図3. 4. 1-6 密度分布を変化させた場合の(a)新古典粒子束(径分布)、
(b)異常粒子束 ($\rho=0.8$ での逆密度勾配長依存性)

このように、新古典輸送解析を基礎として、LHDをはじめとしたヘリカルプラズマの輸送解析とともに、高性能ヘリカルプラズマを対象とした輸送解析を遂行していく上で不可欠な新古典輸送理論の拡張が、独自の解析コード開発とともに精力的に進められ、核融合プラズマにおける輸送現象の理解を目指した学術研究としても着実に進展している。シミュレーション技法、実験解析・シナリオ立案などの観点でも、所内外の研究者たちとの共同研究が盛んに展開されている。

1. M.Yokoyama et al., "Core electron-root confinement (CERC) in helical plasmas", Nucl. Fusion, Vol.47, No.9 (2007) 1213
2. H.Sanuki et al., "Effects of Radial Electric Field on Neoclassical Transport in Helical Torus", J. Plasma Res. Series, Vol.4 (2001) 403
3. H.Sanuki et al., "Effects of Magnetic Axis Shift on Neoclassical Transport in Helical Torus", J. Plasma Res. Series, Vol.6 (2004) 233

4. N.Ohyabu et al., "Island Dynamics in the Large-Helical-Device Plasmas", Phys. Rev. Lett., Vol.88, No.5 (2002) 055005
5. R.Kanno et al., "Formation and Healing of $n=1$ Magnetic Islands in LHD Equilibrium", Nucl. Fusion, Vol.45, No.7 (2005) 588
6. R.Kanno et al., "Transport Modeling of Edge Plasma in an $m/n=1/1$ Magnetic Island", Accepted for publication in Contr. Plasma Phys. (2007)
7. O.Yamagishi et al., "On the particle fluxes and density profiles in helical systems", Phys. Plasmas, Vol.14, No.1 (2007) 012505

2) プラズマ乱流輸送と帯状流

プラズマの異常輸送の研究は長期の集中的な研究を経て新たな展開を迎えている。LHD においても新古典拡散が抑制されて異常輸送がプラズマパラメタを拘束する状況に達し、他方 ITER については経験的予測を超えて更に正確な理解が求められている。理論・データ解析研究系ではシミュレーション科学研究部ならびに共同研究者と協力してプラズマ乱流と乱流輸送の研究を中心的に推進し、世界的成果を得た。

ここ数年の世界的展開の源は、マイクロ揺動同士の非線形機構だけではなく、帯状流や帯状磁場と言ったメゾスケール構造（それらは線形理論では安定であるが、非線形機構で励起される）がプラズマの中に生起されることを考慮し、マイクロ・メゾ、更に巨視的電場構造と言った多重構造の中で乱流輸送を考察しようとする、質的に新たな展開にある。この研究方法を総合的に体系化し[1]、研究方法の転換に中心的役割を果たした。

さらに非線形シミュレーションとの比較や、実験データと比較する方法の提示を通じて、ヘリカル系の磁場配位効果を精緻に解析した。帯状流の減衰率が異常輸送に強く影響することが明らかにされており（図 3. 4. 2-1）、帯状流の減衰率を制御することで異常輸送を制御するという研究動向を駆動している。その視点に立って、ヘリカル系の磁場配位の差が帯状流の減衰率を通じて異常輸送や閉じ込め改善に影響する過程を明確化した[2, 3]。なお、総合報告[4]はアメリカ物理学会 DPP 年会でレビュー講演として招聘され発表したものであり、アメリカ物理学会 DPP に日本で研究する日本人の研究者がレビュー講演に招待されたのは初めての事である。（NIFS

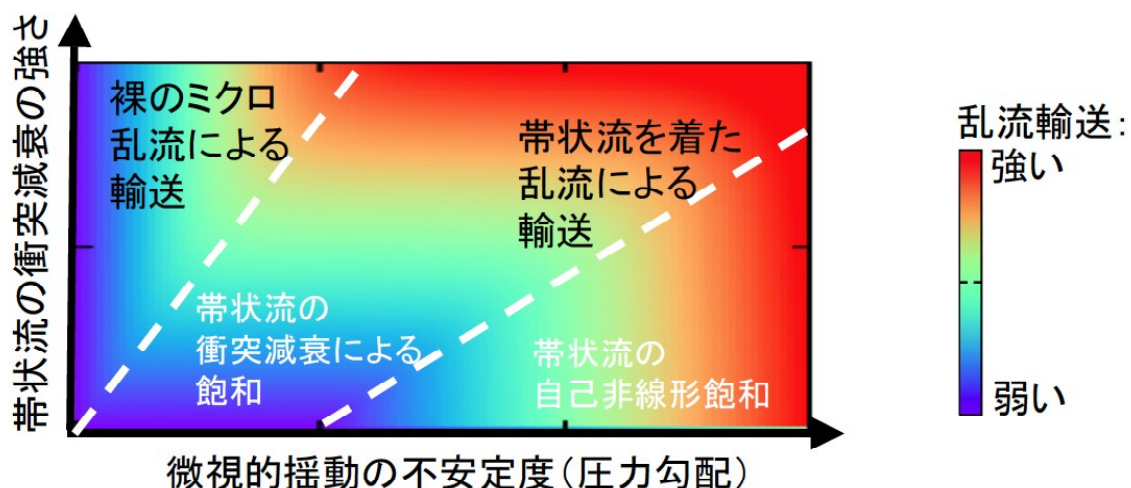


図3. 4. 2-1 異常輸送を決める要因として、微視的乱流の（線形及び非線形）不安定性の強さ（横軸）と帯状流の減衰率の大ききの双方が重要。図の左上の領域では、帯状流が励起されず、微視的不安定性が強いほど乱流輸送が強い。中央の領域では、乱流輸送は不安定性の強さにあまり依らず帯状流の減衰率と共に増大する。右下の領域では、乱流輸送と帯状流はマイクロ不安定性が強まるほど増加する。中央及び右下の領域では、帯状流によって異常輸送が抑制されている。

の理論データ解析研究が世界の COE としての成果を上げた一例として強調する。)

(1) 微視的揺動の研究

ヘリカル系プラズマにおける電磁的微視的不安定性の研究を行った[5]。線形電磁的ジャイロ運動論的解析により、ヘリカル系プラズマにおけるベータ値の上昇に伴うイオン温度勾配不安定性 (ITG モード) の安定化ならびに運動論的バルーニングモード (KBM) の不安定化を示した。また、ヘリカル磁場配位において、KBM が不安定となるプラズマパラメタ領域がメルシエ不安定となる領域よりも狭くなることを確認した。

並行してスラブ ITG 乱流における速度分布関数構造の研究を行った[6]。高精度速度空間分解能を持つジャイロ運動論的ブラゾフシミュレーションコードを用いたスラブ ITG 乱流シミュレーションを行い、イオン粒子分布関数の速度空間におけるスペクトル解析によって、ITG モードにより生成された揺動成分が速度空間ミクロスケールへ移送され、衝突性散逸が起こり、定常乱流状態が維持されることを最高精度で明示した。

実空間で多くのスケールの混合現象が起きるプロセスの一例として揺動が半径方向に運ばれることがある。かねてから Two-Scale DIA 法を用いヘリカル系の異常輸送を検討してきた[7]が、線形不安定性が無くとも揺動が生まれる重臨界励起の場合に理論を拡張した[8]。一般化された臨界条件が得られ、今後大域的輸送理論を構成する基礎の一つになる。

乱流揺動で粒子ピンチ効果 (高密度領域へ粒子が流れる現象) が生まれる効果があるが[9]、LHD での輸送解析において定量的評価を行う必要が高まっている。ヘリカル系を対象として、電磁効果を取り入れたジャイロ運動論的線形安定性解析コード GOBLIN がつくられ、LHD の種々の実験条件に適用され、準線形効果を考慮し粒子流束が求められた[10]。

(2) ヘリカル系での帯状流の線形理論

冒頭に述べた様に、帯状流の減衰率が異常輸送に強く影響することが明らかにされており、又、帯状流のなかに準定常なものと GAM (測地曲率音波) と呼ばれる振動成分と二種類ある事が知られており、帯状流の減衰率を精密に計算する必要性が高い。

こうした解析の基礎として、ジャイロ運動論に基づく理論解析により、トカマクにおける GAM の無衝突減衰の解析を行い、非捕捉粒子の有限軌道幅効果のため GAM の減衰率が増加することを示し、理論予測とシミュレーション結果が良く一致することを確認した[11]。さらに、ジャイロ運動論が予測するトカマク・帯状流の無衝突時間発展を再現することができる運動論的流体モデルを導出した[12]。

この研究を一般化し、ヘリカル系における帯状流のジャイロ運動論的理論解析を行った[13]。その結果、ヘリカル・リップル磁場により GAM の減衰率が増加すること、リップル捕捉粒子の小半径方向ドリフトにより残留帯状流が減少することを理論的

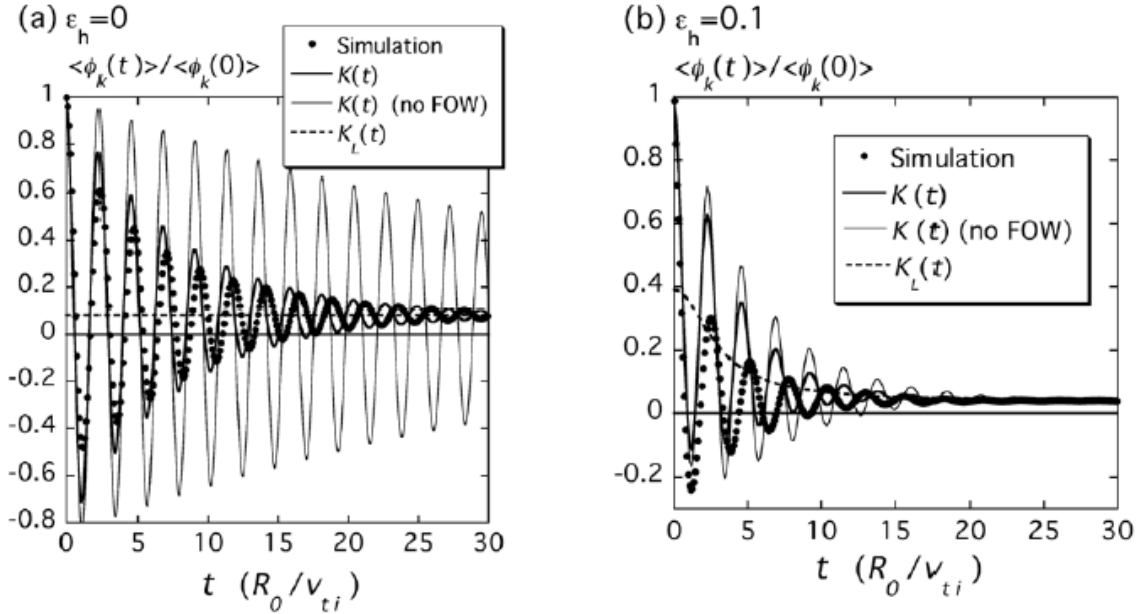


図3. 4. 2-2 (a)トカマクおよび(b)シングルヘリシティ・ヘリカル系プラズマにおける帯状流ポテンシャルの時間発展。黒丸はシミュレーション結果、太い(細い)曲線は有限軌道幅効果を考慮した(考慮しない)場合の理論予測を表す。

に予測し、線形ジャイロ運動論的シミュレーションにより確認した(図3. 4. 2-2)。この結果は、新古典輸送が減少するようなヘリカル系磁場配位では、残留帯状流レベルが増加することにより、異常輸送も抑制されることを予想するものである。

ヘリカル磁場配位の効果をより精緻に調べるため、ドリフト運動論方程式と径電場の時間発展を同時に解く新古典輸送シミュレーションコード **FORTEC-3D**[14]を、ヘリカル磁場配位プラズマ中の GAM 振動の無衝突減衰における磁場配位依存性を調べる研究に応用した[15]。(この解析は、ジャイロ運動論で電子温度をゼロとおき、イオンのラーマー半径以下の短波長の静電ポテンシャル揺らぎを無視した極限に相当する。磁場配位依存性について詳しく調べるのに適している。) LHD で内寄せ配位における GAM について特に調べた。結果を図3. 4. 2-3に示す。磁場を内寄せにした場合、磁場をフーリエ成分で表記した場合のスペクトルが広がる。この磁場スペクトルの変化に応じて GAM 振動の実周波数は下がり、また周波数の低下は GAM と共鳴するイオンの割合を増やすことから無衝突減衰率を大きくする。(解析的なモデルによる予測と一致。) 一方、計算に反映させる磁場のフーリエ成分の数の違いによって GAM 周波数や減衰率に差が現れ、その差は磁場のスペクトルがより広がっている外側の磁気面においてより顕著である。GAM 振動の性質を定量的に評価する際には、

磁場配位の細かい構造も周波数や減衰率に影響することに留意する必要性を示唆している。

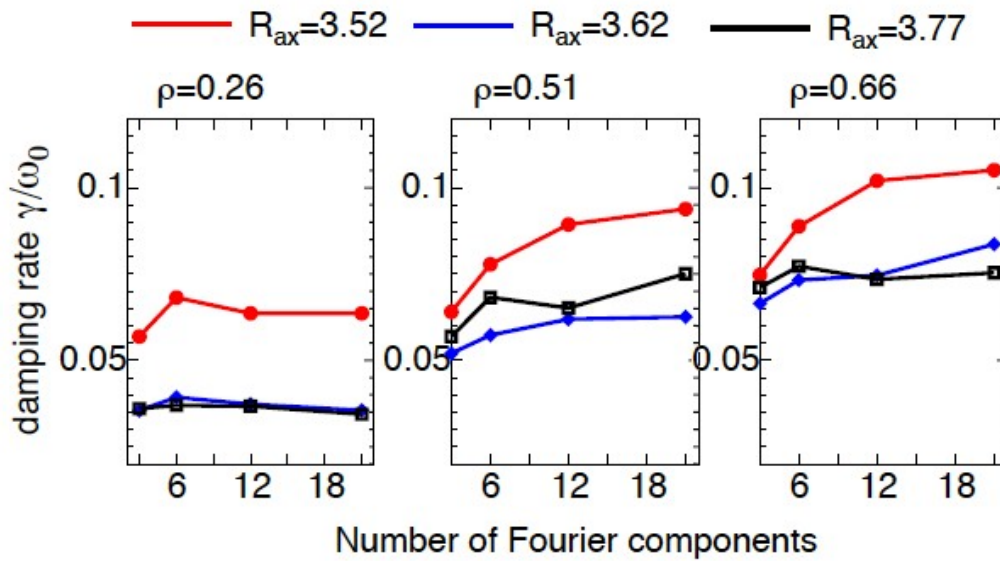


図3. 4. 2-3 LHD 磁場配位における GAM 振動の減衰率の磁場配位依存性。横軸は計算に用いられた磁場フーリエ成分の数。内寄せ (R_{ax} が小) ほど減衰率が高くなる。また、外側の磁気面 (ρ が大) ほど、磁場フーリエ成分の数の違いが減衰率に影響する。

(3) 乱流と帯状流の相互作用

乱流と帯状流の相互作用に関する研究においては、トロイダルプラズマ全体を俯瞰した研究を推進した。

具体的な例を挙げれば、将来の超高温プラズマへの展望を考える上で、帯状流の減衰機構として（初歩的な衝突減衰だけでなく）帯状流自身の非線形機構が本質的的重要性を持つ。非線型減衰機構を繰り込んだ理論を展開し、マイクロ揺動とメゾスケール揺動のエネルギー配分則を導いた[16]。非線形シミュレーションとの比較も行い、確実な理解を駆動した（図3. 4. 2-4）。乱流流束の3次元効果も考慮し GAM の乱流励起理論を構成した[17]。シミュレーションだけではなく実験データと比較する方法も提示した[18]。帯状流の半径方向の波数は、異常輸送低減の効果を決める上で重要なパラメタである。幅広い波数の帯状流が不安定化されるため、定常状態でどの波数の流れが卓越するか解明するため、非線型理論を展開した[19]。異なる波数の帯状流が競合し、最終的に選ばれる構造の選択則を導いた[20]。

またトカマクにおける ITG 乱流のジャイロ運動論的シミュレーションを行い、高精度速度空間分解能を実現することにより、エントロピーバランスが満足されることを確認し、残留帯状流に対応するイオン分布関数が理論予測と良く一致することを示した[21]。

帯状流の減衰率の違いが LHD での異常輸送の違いに通じるとの予想を確認するため、LHD の標準配位と内寄せ配位に対応するモデル磁場を用いて、ITG 乱流シミュレーションを行った[22]。その結果、標準配位に比べて内寄せ配位では、(より大きな磁気丘のため、大きな ITG モード成長率を持つものにも係わらず、) リップル捕捉粒子

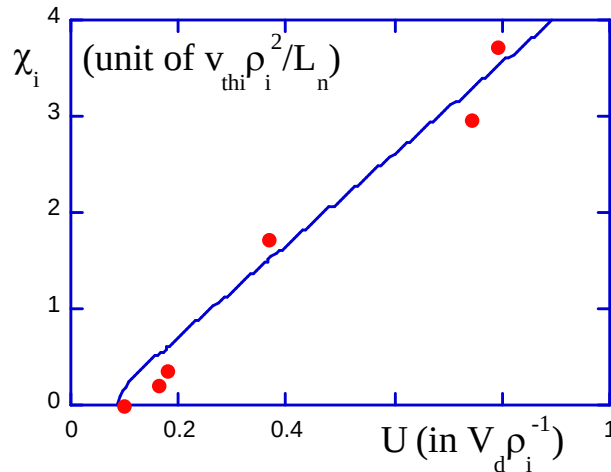


図3. 4. 2-4 微視的揺動と帯状流のエネルギー配分比。(帯状流の衝突減衰が無い場合。)横軸は帯状流の強度を渦度で示す。縦軸はマイクロ揺動の強度を乱流輸送係数で示す。直線が理論式、点为非線形シミュレーションの結果。揺動駆動源が弱い場合、エネルギーは帯状流に集中し微視的揺動は抑制される(原点付近)。

の小半径方向ドリフト速度の減少のためより大きな帯状流が生成され、定常乱流状態における両モデル配位の乱流イオン熱輸送係数は同程度となることが示された。より正確な磁場データを用いた線形解析では、標準配位に比べると内寄せ配位において、ITG モード成長率の増加分は僅かであるが帯状流生成効率が改善されることが明瞭に示された[23]。この磁場配位データを用いて、ITG 乱流のジャイロ運動論的シミュレーションを行い、内寄せ配位における乱流イオン熱輸送係数は準線形理論では標準配位の場合に比べて大きな値を取るが、定常乱流状態に達すると逆に小さくなることが発見された[3]。定常乱流状態における帯状流レベルも予想通りに内寄せ配位で大きくなることも確認された(図3. 4. 2-5 参照)。この結果は、新古典輸送低減をもたらす磁場配位は、帯状流による異常輸送抑制にも有効であり、実験で観測された LHD 内寄せ磁場配位における異常輸送減少の物理機構として、亜臨界乱流に着目したモデル[24]に加え、新たな可能性のひとつを提示したものである。

以上の研究は、乱流輸送の理論では、ミクロスケールの非線型機構を考慮するだけでなく、帯状流を繰り込んだ乱流輸送の理論式を導く必要があることを示している。メゾスケール揺動を繰り込んだ異常輸送の理論式も導いている[4]。特に、イオン粘性

の理論としては、準線形機構に則るモデルは破綻し、帯状流などメゾスケール揺動の非線型過程を繰り込むことが重要である[25]。内部輸送障壁形成に関する帯状流の効果の解析は3. 4. 3) 項に紹介する。

こうした研究動向の中では、今後帯状流のほかストリーマーの研究も必要である。そこで研究の焦点を帯状流やストリーマーの競合関係に絞り、円筒形直線型プラズマにおける乱流数値計算コード **Numerical Linear Device(NLD)**を開発した。この乱流コードを用いて抵抗性ドリフト波乱流を対象として、乱流構造の形成機構ならびに構造形成の選択則を解明することを目的とする[26]。帯状流減衰力の強さをパラメタとした帯状流構造とストリーマー構造の選択則を得た。周辺プラズマでは重要であるイオン - 中性粒子衝突周波数も両者の選択則で重要な因子である。今後周辺プラズマまで含めてトロイダルプラズマの乱流構造を包括的に理解する基盤となる。更に GAM 揺動の空間構造を明らかにし、今後の乱流揺動の計測の進歩も促している[27]。

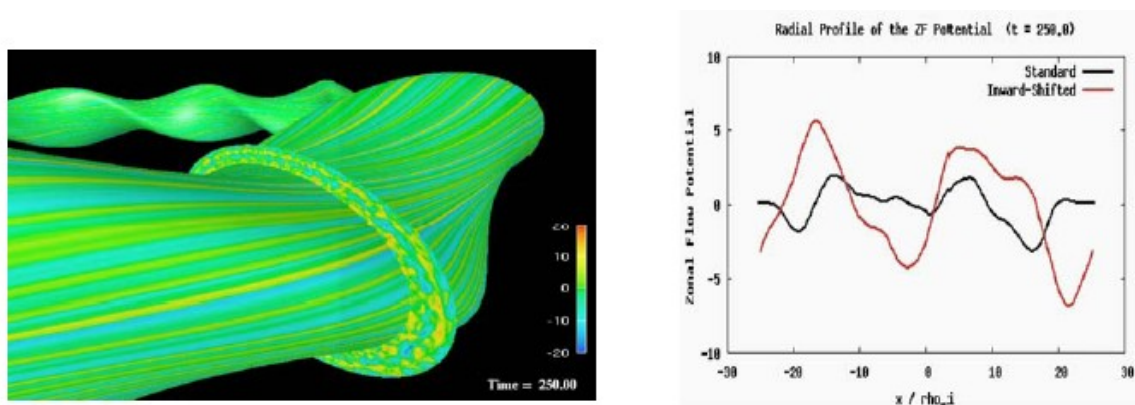


図3. 4. 2-5 (左)ジャイロ運動論的 ITG 乱流シミュレーションによって得られた LHD 内寄せ磁場配位における静電ポテンシャルの空間構造。(右)ジャイロ運動論的 ITG 乱流シミュレーションによって得られた LHD 標準磁場配位(黒線)および内寄せ磁場配位(赤線)における帯状流の小半径方向分布。

References

- [1] Diamond, P.H., S.-I. Itoh, K. Itoh and T.S. Hahm: Zonal Flows in Plasma - A Review, Plasma Phys. Control. Fusion Vol.47 No.3 (2005) R35-R161
- [2] K. Itoh, 他7名: Physics of internal transport barrier of toroidal helical plasmas, Phys. Plasmas Vol.14 (2007) 020702
- [3] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and S. Ferrando-Margalet, "Gyrokinetic Studies of Ion Temperature Gradient Turbulence and Zonal Flows in Helical Systems", Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007 (Toki, Japan, 2007), I-08

- [4] K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, T. S. Hahm, A. Fujisawa, G. R. Tynan, M. Yagi and Y. Nagashima: Physics of Zonal Flows, Phys. Plasmas **13** No. 5 (2006) 055502
- [5] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Study of Electromagnetic Microinstabilities in Helical Systems with the Stellarator Expansion Method”, Physics of Plasmas Vol.11, No.6, pp.3068-3077 (2004)]
- [6] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Spectrum of the Velocity Distribution Function in the Slab Ion Temperature Gradient Driven Turbulence”, Journal of Plasma Fusion Research SERIES Vol.6, pp.271-274 (2004)]
- [7] H. Sugama, M. Okamoto, M. Wakatani: K- ϵ Model of Anomalous Transport in Resistive Interchange Turbulence Plasma Phys. Contr. NuclearFusion Research (Proc. 14th Conf. Würzburg 1992) Vol.2, p.353
- [8] K. Itoh, S.-I. Itoh, T.S. Hahm and P.H. Diamond: Effect of Turbulence Spreading on Subcritical Turbulence in Inhomogeneous Plasmas, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.**74** No.7 (2005) 2001
- [9] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama: *Transport and Structural Formation in Plasmas* (IOP, England, 1999)
- [10] O. Yamagishi, M. Yokoyama, N. Nakajima, K. Tanaka: On the particle fluxes and density profiles in helical systems, Phys. Plasmas **14** No.1 (2007) 012505
- [11] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless Damping of Geodesic Acoustic Modes”, Journal of Plasma Physics Vol.72, part.6, pp.825-828 (2006)
- [12] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and W. Horton, “Collisionless kinetic-fluid model of zonal flows in toroidal plasmas”, Physics of Plasmas Vol.14, No.2, pp.022502-1-18 (2007)
- [13] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Dynamics of Zonal Flows in HelicalSystems”, Physical Review Letters Vol.94, No.11, pp.115001-1-4 (2005) ; H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless damping of zonal flows in helical systems”, Physics of Plasmas Vol.13, No.1, pp.012501-1-18 (2006)]
- [14] S. Satake, M. Okamoto, N. Nakajima, H. Sugama, M. Yokoyama, C. D. Beidler: Nonlocal neoclassical transport simulation of geodesic acoustic mode, Nucl. Fusion 45 (2005) 1362-1368
- [15] S. Satake, H. Sugama, T.-H. Watanabe: Simulation studies on the GAM oscillation and damping in helical configurations, Nucl. Fusion **47** (2007) 1258-1264
- [16] K. Itoh, K. Hallatschek, S.-I. Itoh, P.H. Diamond and S. Toda: Coherent Structure of Zonal Flow and Onset of Turbulent Transport, Phys. Plasmas Vol.**12** (2005) 062303
- [17] K. Itoh, K. Hallatschek and S.-I. Itoh: Excitation of Geodesic Acoustic Mode in Toroidal Plasmas, Plasma Phys. Control. Fusion Vol.**47** No.2 (2005) 451

- [18] K. Itoh, Y. Nagashima, S-I Itoh, P. H. Diamond, A. Fujisawa, M. Yagi and A. Fukuyama: On the bicoherence analysis of plasma turbulence, *Phys. Plasmas* Vol.**12** No.10 (2005) 102301
- [19] K. Itoh, K. Hallatschek, S. Toda, H. Sanuki and S.-I. Itoh: Coherent Structure of Zonal Flow and Nonlinear Saturation, *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol.**73** No.11 (2004) 2921-2923
- [20] K. Itoh, M.Yagi, S.-I. Itoh, A. Fukuyama, H. Sanuki and M. Azumi: Anomalous Transport Theory for Toroidal Helical Plasmas, *Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res (Seville, 1994), (1996), Vol.3, pp.391*
- [21] T.-H.Watanabe and H. Sugama, "Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence", *Nuclear Fusion* Vol.46, pp.24–32 (2006)]
- [22] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, "Gyrokinetic simulation of zonal flows and ion temperature gradient turbulence in helical systems", *Nuclear Fusion* Vol.47, pp.1383–1390 (2007)
- [23] S. Ferrando-Margalet, H. Sugama, and T.-H.Watanabe, "Zonal flows and ion temperature gradient instabilities in multiple-helicity magnetic fields", to be published in *Physics of Plasmas*
- [24] S. Toda, K. Itoh, K. Hallatschek, M. Yagi and S. -I. Itoh: Selection of a Radial Wavelength of Zonal Flows, *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol.**75** No.10 (2006) 104501
- [25] K. Itoh, S. Toda, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, M. Yagi and A. Fukuyam: Turbulent Transport of Poloidal Momentum in Toroidal Plasmas, *J. Phys. Soc. Jpn.* (2007) in press
- [26] N. Kasuya, et al., Simulation of resistive drift wave turbulence in linear device, *J. Plasma Phys.* **72** (2006) 95713; N. Kasuya, et al., Numerical Simulation of Resistive Drift Wave Turbulence in a Linear Device, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 044501
- [27] K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, A. Fujisawa, M. Yagi, T. Watari, Y. Nagashima and A. Fukuyama: Geodesic Acoustic Eigenmodes, *Plasma Fusion Res.* Vol.**1** (2006) 037

3) 閉じ込め改善

現在、閉じ込め改善研究の指針となっているものは、電場勾配とそれに伴う速度勾配の誘起により、乱流輸送が抑制されるという考え方であり、その研究は論文[1]以来日本の研究者が中心になって開拓してきた。その方法論にたつてヘリカル系の内部輸送障壁が予測され、実験で確認された。この成果を展開し、ここ数年の間にヘリカル系の内部輸送障壁形成の機構の理解について大きな進展が得られた。

ヘリカル系の内部輸送障壁研究はふたつの方向で進展を見た。その一つは、ヘリカル系で発生する巨視的な径電場構造に着目し、プラズマパラメタに応じて多彩な閉じ込め改善現象が生まれる過程を理解する研究である。電子内部輸送障壁の界面の形成についてこの理論を適用し、実験との比較を進めてきた。更にごく最近は、高密度のSDCプラズマに起きる障壁の形成機構についても適用し、その発生機構の理論を提案した。もう一つは、衝突周波数の低い領域で帯状流が生まれ、それが乱流輸送を抑制する過程の研究である。LHDでの電子内部輸送障壁について、電場界面のみならず内部まで乱流輸送が低下する事を説明した。また、輸送界面が径方向の急峻な構造だけでなく、ポロイダル方向の急勾配構造を持つ可能性も理論的に指摘した。

改善閉じ込め現象解明に重要な、高温プラズマのダイナミクス（遷移現象）について研究するため高温ヘリカルプラズマでの電場構造や帯状流の構造を解析する輸送コードを開発している。さらにLHD装置で観測されているInternal Diffusion Barrier (IDB)と関係するSuper Dense Core (SDC)プラズマについての輸送解析を行っている。こうした大きな成果を以下に詳細に紹介する。

(1) 巨視的電場の勾配と閉じ込め改善

ヘリカル系トロイダルプラズマでは、新古典粒子拡散によって駆動される径電場が重要な役割を果たし、その分岐によって生じる電場界面が輸送障壁をもたらすという理論がある。その理論はLHDの準備研究として実際にCHSにおいて内部輸送障壁を発見する指導原理になった。LHDでの電子内部輸送障壁の達成の後、輸送界面形成[2]や界面での異常輸送抑制の大きさ[3]などについて理論予測と観測の比較も行われ、検証を経て準定量的な輸送モデルが構成されている。

こうして構成された輸送解析を内部拡散障壁(IDB)について適用した[4]。この内部拡散障壁は非常に高密度で観測されているので、新古典輸送の粒子流束と熱流束の式はフィルシュ・シュルター衝突領域のものをを用いる必要がある。異常輸送については電流拡散インターチェンジモードのものをを用いており、電場の勾配によってその値が低減する。実験におけるペレット入射と対応させて、数値計算において付加的な粒子源をプラズマに与えている。この付加的な粒子源を過渡的に与えることにより、解析

結果として密度分布の中で急峻な勾配を得ることができている。ペレットが中心部で溶発するという理想化された条件について現在得られた結果では、(i) ペレットが小さい場合、中心での密度の局所的増分は閉じ込め改善をもたらさず平坦化してしまうが、(ii) ペレットが十分大きな場合、中心での密度の局所的増分が更に急峻化する時間発展を示し、閉じ込め改善をもたらす事が示された。つまりこの解析結果は LHD で観測されている高密度プラズマ(SDC)での内部拡散障壁(IDB)を初期的ではあるが、理論予測するものである。本解析では付加的な粒子源を入れた領域で温度分布が平坦もしくは正の勾配を持つ。高密度で電子温度とイオン温度がほぼ等しいプラズマパラメタ領域でも、正（または弱い負）の電場を得ることができる。従って、ペレットが十分大きな場合、電場の勾配が生まれることによる異常輸送の低減を理論解析結果から予測でき、また、電場勾配が急峻に変化する界面を境に、密度勾配が半径方向に急に変化することを得ることができた。SDC プラズマの基本的な機構の作業仮説を提示した解析である。今後、密度分布に急峻な勾配が得られる付加的な粒子源の値やその分布の閾値を求めるなど、実験観測との比較を進め、SDC プラズマの物理機構解明に資する。

（２）帯状流の閉じ込め改善への効果

電子内部輸送障壁の形成については、巨視的な電場界面に起因するという理論予測は実際に検証されている。実際に LHD で詳細な内部の輸送状態を研究した結果、実験では、異常輸送係数が界面のみならず内部まで広く抑制されている事が知られている。輸送界面の内部では、巨視的電場自体は強いもののその勾配は弱い。この実験結果に立脚すると、巨視的な電場と流れのシアのみでは揺動を抑制するのは足りないと考えられる。

この事実を理解するために、帯状流による効果を繰り込んだ輸送理論を適用した。径電場が強い状態ではポロイダル回転の減衰（すなわち帯状流の減衰率）は小さい。一方、平均径電場が弱い状態では、リップル拡散により径電場の減衰率は大きい。まとめると、プラズマが弱い径電場状態（いわゆるイオンルート）にあると、帯状流の減衰率が大きくしたがって異常輸送の抑制効果は働かない。その一方、強い正の電場の状態（電子ルート）では、帯状流の減衰率が小さく、その結果、帯状流の振幅が増え乱流輸送が低下する。従来解析[3.4.3.3]で得られた電場と温度分布を用いて、帯状流を繰り込んだ輸送係数（実線）と考慮しない理論（点線）を比較する（図 3. 4. 3-1 (a)）。プラズマ中央部まで乱流輸送が低下することが示された[5]。

加熱入力分布を与えて温度や電場の発展を解くような輸送解析を行った結果を図 3. 4. 3-1 (b)に示す。帯状流の効果を次元輸送方程式に取り入れて数値解析を行った[6]。実験で観測されているような内部輸送障壁に対応するようなプラズマ内部

での広い領域での熱伝導係数の低減を示す。図3. 4. 3-1 (b)では、実線が電子の熱拡散係数の新古典輸送と異常輸送部分を足したもので、波線は異常輸送部分のみの径方向分布を表している($\rho=r/a$)。帯状流の衝突減衰効果や帯状流による異常輸送低下を考慮にいたったものである。 ρ_T は電場の遷移が起こる径方向の点を表している。電場の急峻な勾配により熱伝導係数は界面の狭い領域で低減する。さらに、その内部でも強い正電場により帯状流が励起され異常輸送係数が低減することを示すことができた。新古典輸送を足した全体の熱伝導係数で電場の遷移点よりも内側で顕著な低減を見ることができ、温度分布にも急峻な勾配を得ることができ、この解析結果が、実験で観測されている電子内部輸送障壁(ITB)の理論的予測になっている。これによって、電子輸送障壁ができるときのプラズマ中心部での異常輸送の低下が説明できた。

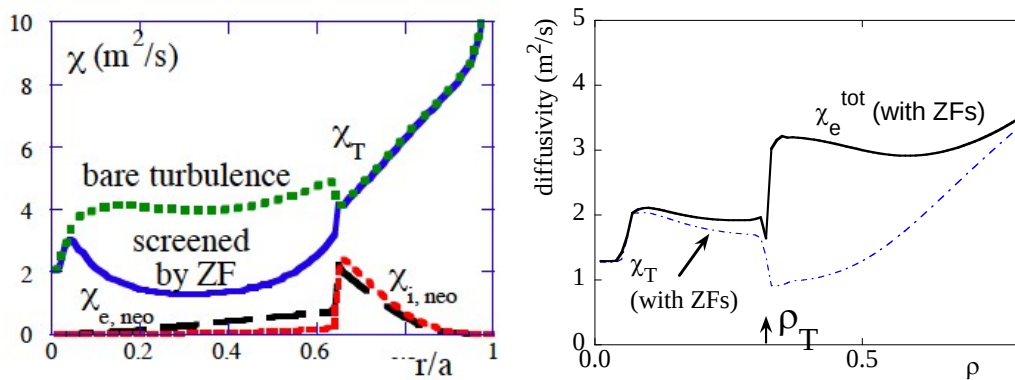


図3. 4. 3-1 LHD の電子輸送障壁プラズマの輸送解析。輸送係数の径方向分布を示す。(a) 帯状流の効果を比較したもの。効果を取り入れない場合(点線)、異常輸送係数はプラズマ中心部では低下しない。一方、帯状流効果を取り入れた異常輸送理論(実線)では、界面の内側全体で乱流輸送が抑制される。(b) 加熱分布を与えて、温度等の発展を解いた解析結果。(帯状流の効果を入れた輸送解析。)プラズマ中央部での輸送改善が示されている。

(3) 二次元電場構造形成理論

L/H 遷移時における早い密度ペデスタル形成の機構は未解明であって、理論モデルの進展が求められている。その問題を解明するため、プラズマ端近傍の輸送障壁における二次元電場構造を解析した。H モードのような大きなポロイダル流が存在する場合、ポロイダル方向にショック状不均一構造が形成される。ポロイダル電場は径方向の粒子束を生むので、径・ポロイダル両方向を含む二次元構造を考慮することが必要であるが、これまで研究はあまり進んでいなかった。そこで運動量保存則をもとにモデル方程式を導出した[7]。本モデルが含むイオン粘性の非線形性が遷移現象をもたらし、乱流によるシア粘性が径方向の特徴的なスケールを与える[8]。具体的には、プラ

ズマ端部に挿入した電極とリミタ間に電圧を印加して得られる電極バイアス H モード(図 3. 4. 3-2)の解析を行った。実際の H モードで観測される強い径電場 ($\sim 10\text{kV/m}$)に伴うポロイダル電場によって、径方向の対流的粒子束(ピンチ速度 $\sim 1\text{m/s}$ 以上)が生じる[9]。さらに自発遷移による H モードについての解析を行い、L/H 遷移における二次元構造に伴って生じる粒子束を含む自己無撞着な電場・密度の時間発展を初めて示した。そしてこの径方向粒子輸送が L/H 遷移時の早い密度ペDESTAL 形成の要因となり得ることを明らかにした[10,11]。重要な多次元的構造形成機構解明の先駆となる研究である。

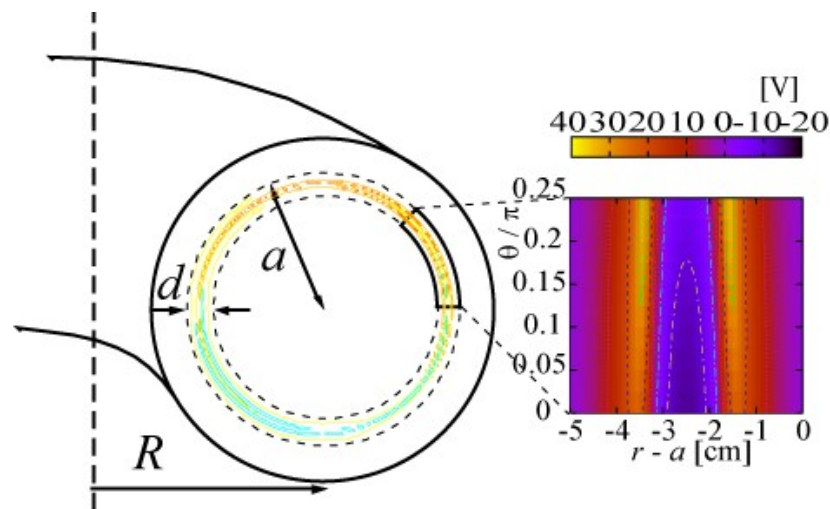


図3. 4. 3-2 周辺輸送障壁における二次元電位構造。ポロイダル断面における外側点線がプラズマ端、内側点線が挿入電極により電極電位となり、その間に輸送障壁が形成されている。

(4) 実験での検証

実際に実験家と協力し、ヘリカル系の電子輸送障壁内部での揺動と流れのエネルギー配分について CHS 実験結果を検討した。図 3. 4. 3-3 に示すように、L-モード状態の場合と内部輸送障壁ができた場合とを比較した[3.4.3.5]。輸送障壁界面よりずっと内側で観測し、その位置 (いずれも径電場の勾配自体は揺動抑制するほど大きくない) での流れと微視的揺動のエネルギー配分を検討した。L-モード状態では微視的揺動にエネルギーが集中しているのに対し、内部輸送障壁状態では帯状流にエネルギーが集中している事が確認された。「帯状流の減衰率を制御する事によって異常輸送を制御する道を開く」というのは今後の磁場閉じ込め核融合研究の中心テーマであり、その課題に先駆的成果を上げる事ができた。

こうした成果に見られるように、理論予測により実験結果の説明を試み、説

明できない現象によって理論モデルの改良を行うことは、プラズマ閉じ込めの法則を理解し定量的な予測をする上で重要である。

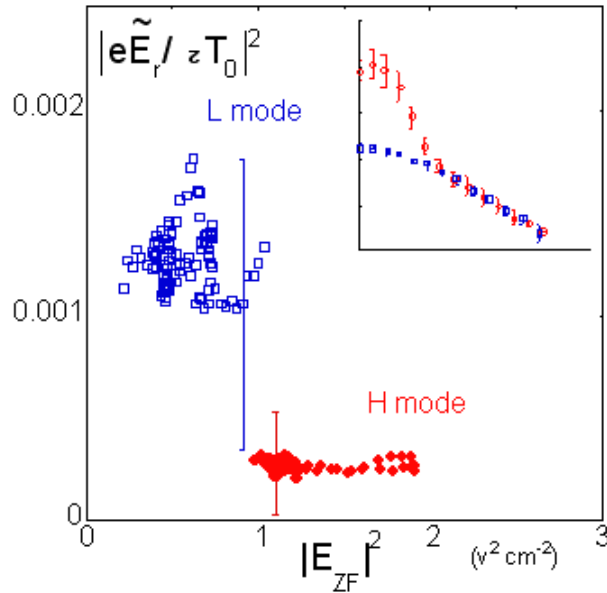


図3. 4. 3-3 CHS での帯状流強度(横軸)と微視的揺動強度(縦軸)。ポテンシャルの径方向分布も示す。赤が電子内部輸送障壁を持つプラズマ、青がLモードプラズマ。

- [1] S.-I. Itoh and K. Itoh: : Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 2276
- [2] S. Toda and K. Itoh: Theoretical study of the hysteresis characteristic of electric fields in helical plasmas, Plasma Phys. Control. Fusion Vol.**46** (2004) 1039–1050
- [3] S. Toda and K. Itoh: Test of the Theoretical Model for the Improved Confinement in Helical Plasmas, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.**74** No.11 (2005) 2987-2989
- [4] S. Toda, et al.: Transport analysis of dynamics for the plasma profiles in helical devices, presented at ITC 17 (2007, Toki), paper P2-047
- [5] K. Itoh, S. Toda, A. Fujisawa, S.-I. Itoh M. Yagi, A. Fukuyama, P.H. Diamond and K. Ida: Physics of internal transport barrier of toroidal helical plasmas, Phys. Plasmas Vol.**14** (2007) 020702
- [6] S. Toda et al.: Transport Analysis with the Effect of Zonal Flows about Electron Internal Transport Barriers in Toroidal Helical Plasmas, Nucl. Fusion Vol. 47, No. 8 914-919 (2007)
- [7] N. Kasuya, et al.: Radial and poloidal structure coupled with shear viscosity under the existence of a large flow shear in tokamaks, J. Plasma Fusion Res. Series **6** (2004) 2838

- [8] N. Kasuya, et al.: Multi-dimensional structure of the electric field in tokamak H-mode: J. Plasma Fusion Res. 81 (2005) 553
- [9] N. Kasuya, et al.: Two-dimensional structure of plasma flow and particle pinch in tokamak H-mode, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 195002
- [10] N. Kasuya and K. Itoh: Convective particle transport arising from poloidal inhomogeneity in tokamak H mode, Phys. Plasmas Vol.**12** No.9 (2005) 090905(1-8)
- [11] N. Kasuya and K. Itoh: Accessibility to a two-dimensionally steep structure of the electric field in tokamak H-mode, Plasma Phys. Control. Fusion Vol.**48** (2006) A319-A326

4) MHD

MHDの観点からは、主としてH I N T 2コードによる高ベータMHD平衡解析、マルチスケールシミュレーションによる内寄せ配位におけるMHD安定化メカニズムの解明、大きな圧力勾配を持つヘリカルプラズマにおける崩壊現象の非線型ダイナミクスに重点を置いて解析を行ってきた。

まず、H I N T 2コードによる高ベータMHD平衡解析について述べる。

LHD装置では高ベータ放電時に周辺の磁気面形状が崩れることが危惧されている。核融合炉を目指す上で、周辺の磁気面形状がMHD平衡とその閉じ込め特性にどのような影響を与えるかを考察することは非常に重要なことである。

これまで、LHD実験のMHD平衡解析はVME Cコードを用いて行われてきた。VME Cコードはヘリカル系プラズマのMHD平衡解析に最も用いられているコードである。しかし、磁気座標系と呼ばれる入れ子状の磁気面を仮定した座標形状で構築されているので、入れ子状の構造が破れる磁気島やストカスティックになった磁気面形状は扱えなかった。一方、磁気島やストカスティックな磁気面構造の影響を考察するためにH I N TコードやP I E Sコードが核融合科学研究所やプリンストンプラズマ物理研究所で開発されてきた。H I N TやP I E Sはコードが複雑で巨大なために、実験プロファイルに対応するMHD平衡の再構築や実験結果の解釈にはそのまま適用することは難しかった。そこで、MHD平衡の物理のさらなる理解を深めるため、実験データ解釈への適用とコードの精度向上を目的として、H I N Tコードの改良版であるH I N T 2コードを開発してきた[1]。H I N T 2はH I N Tコードの利点はそのままに将来の拡張を念頭に新しく開発した。また、最新の計算機科学の成果を反映し、使いやすくまた高速にMHD平衡計算ができるよう設計している。

このH I N T 2コードをLHD装置の高ベータMHD平衡の解析に適用した。図3. 4. 4-1に磁気軸内寄せ配位 ($R_{ax}=3.6$, $\gamma=1.254$, $B_q=100\%$) における真空磁場の磁力線のポワンカレ図を示す。周辺にストカスティックな層があるが、周辺まで入れ子状のきれいな磁気面構造が生成されていることがわかる。次に、有限ベータ平衡時の磁力線のポワンカレ図を図3. 4. 4-2に示す。有限ベータ効果により磁気軸が外側へシフトし、周辺の磁力線構造が乱れているのがわかる。参考として、図3. 4. 4-2には、 $z=0$ の平面から出発した磁力線長と、この計算結果に対応するLHD実験での電子温度分布も示している。周辺の磁力線構造が乱れているにもかかわらず、電子温度の勾配は乱れた磁力線領域に存在する。このことは例え磁力線構造が乱れていたとしても実効的な閉じ込め領域になり得ることを示唆している。磁力線長を見ると磁力線構造は乱れて見えるが数10mから数100mの長さを持って周回していることがわかる。一方、磁力線構造が乱れて見える領域での電子温度から予想される電子の平均自由行程は数mである。従って、磁力線が乱れる特性長より電子の平均自由行程が十分に短い場合、乱れた磁力線構造の領域も閉じ込め領域と考えてよい。しかし、核燃焼プラズマのような電子の平均自由行程が非常に長いプラズマでは、磁力線構造の

乱れが閉じ込めに影響を与えることが予想される。H I N T 2 の結果を用いて磁力線構造の乱れが閉じ込め与える影響を定量的に評価する試みが始まっている。

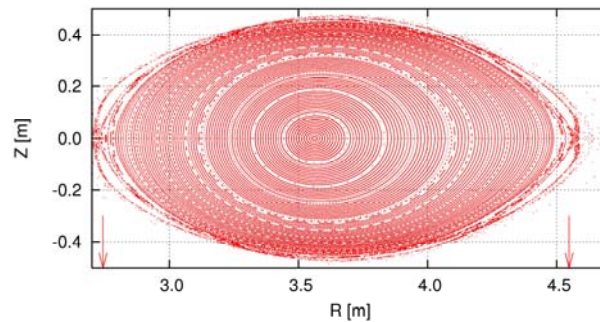


図3. 4. 4-1 LHD 磁気軸内寄せ配位 ($R_{ax}=3.6\text{m}$, $\epsilon=1.254$, $B_0=100\%$)での磁力線のポワンカレ図。2本の矢印は、もっとも外側で閉じた磁気面の大半半径方向の位置を表す。

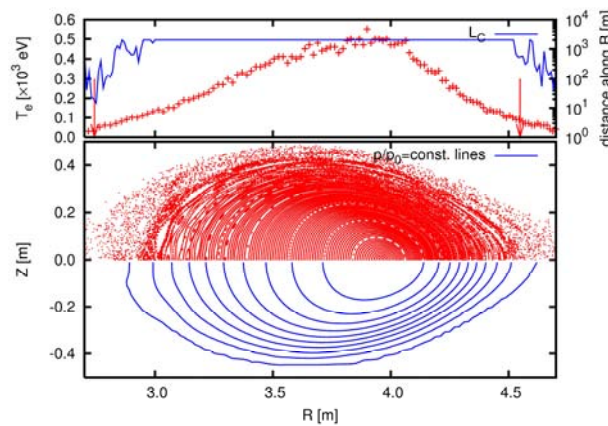


図3. 4. 4-2 LHD 磁気軸内寄せ配位の有限ベータ MHD 平衡 ($\langle \beta \rangle_{dia} \sim 3\%$)。Z>0 に磁力線のポワンカレ図、Z<0 に磁力線構造に対応するプラズマ圧力の等高線図。上図に Z=0 面上から出発した磁力線の磁力線長(青線)と平衡計算によく一致する実験電子温度プロファイル(赤記号)。

MHD平衡解析により得られる幾何情報はMHD不安定性解析や輸送解析に必要な基本情報である。H I N T 2 の平衡計算結果を用いて磁気面構造の座標データを構築し、実験データ解析に使用されている。このことにより、従来、VME Cコードにより構築されてきた磁気面データを用いるより、より実験結果と矛盾のない解析が可能になった。また、H I N T 2 による乱れた磁力線領域を含むMHD平衡を、H I N T 2 と同じ座標系で構築されたMHD不安定性解析コードに提供している。このコードはシミュレーション科学研究部で開発が続けられており、理論・データ解析研究系との共同研究を通して進められている。

次に、マルチスケールシミュレーションによる内寄せ配位における安定化メカニズムの解明について説明する。

LHD実験では、真空磁気軸位置が 3.6m の内寄せ配位において非常に良い閉じ込

めが得られており、2006 年度の実験において、平均ベータ値 5 %が反磁性測定によって観測されている。しかし、この内寄せ配位は、線型交換型モードに対して、特に低ベータ領域において不安定な配位であることが得られている。そこで、この実験結果を説明する安定化効果を調べるために、簡約化MHD方程式に基づいて非線型MHD解析コード、NORMコードを開発した。

このコードを、まず、内寄せ配位で、パラボラ形状の圧力分布を持つ中心ベータ値 1 %の平衡に適用した。その結果、交換型モードによってコア領域が大きく崩れる結果が得られた。これは、異なる共鳴面で独立に成長した交換型モードの渦が大きく成長し、お互いに重なり合うようになったことによる。その結果、いくつかの共鳴面にまたがる大きな渦が新たに形成され、これによってコア領域の圧力が短時間に周辺領域へ輸送されることが原因である。しかし、この計算結果は交換型モードによる内部崩壊現象を示しており、LHDの実験結果には対応していない。これは、ベータ上昇に伴う圧力分布の変化を無視したためである。そこで、実験結果を説明するために、二段階ベータ上昇法を開発した[2]。この手法では、低ベータでの非線型飽和によって得られた圧力分布を用いて高ベータでの振舞いを解析する。この手法を用いて、まず、中心ベータ 0.5%のLHDプラズマの非線型発展を追跡した。この場合には、交換型モードは駆動力が弱いために、渦同士の重なり合いは無く、緩やかな非線型飽和が生じる。この非線型飽和はいくつかの共鳴面で圧力分布に局所平坦構造を形成し、最終的には階段状の圧力分布が形成される。次に、この非線型飽和による圧力分布の形状を用いて、中心ベータ値が 1%のLHDプラズマでの摂動の時間発展を追跡した。その結果、崩壊現象は生じず、低ベータのときと同様の緩やかな非線型飽和が得られた。これは、低ベータでの圧力分布の局所平坦構造が、高ベータでの交換型モードの駆動力を低減した事による。この結果は、非線型飽和による連続的な駆動力低減がベータ上昇時の安定化メカニズムであることを示唆している。

しかし、二段階ベータ上昇法では、低ベータと高ベータとの間での計算が独立になされ、両者の間で摂動量の連続性が無かった。従って、実際に連続的に安定に圧力分布が変形していくかどうかは明らかでない。この点を明らかにするためには、ベータ上昇を含む平衡量の変化とそれに伴う摂動量の変化を連続的に同時に扱う手法が必要である。ところが、一般に平衡量は輸送の長い時間スケールで変化するのに対し、摂動量はアルベン時間の短い時間スケールで変化し、両者の間には 10 の 5 乗から 6 乗程度の開きがある。そこで、このように大きく離れた時間スケールをもつ変化を取り扱うために、マルチスケール時間発展法を新たに開発した[3]。この手法では、NORMコードによる摂動の時間発展計算とVMECコードによる三次元静止平衡計算を交互に繰り返すことによって、連続的なベータ上昇の状況を解析する。実際には、ある一定区間でのNORMコードによる非線型計算を行ったところで、VMECコードによってベータ値を上昇させた平衡の計算を行う。この場合、NORMコードによる非線型時間発展が短い時間スケールでの不安定性の変化を与え、VMECコードによる平衡計算の更新が長い時間スケールでのプラズマの変化に対応する。VME

Cコードによって平衡を計算する際には、非線型ダイナミクスによって生じた圧力分布の変形の効果を取り入れている。図 3. 4. 4-3 は、このマルチスケール手法を用いたときの内寄せLHDプラズマの圧力分布の時間変化を示している。このとき、初期プロファイルとして、中心ベータ値が 0.5% でパラボラ圧力分布を持つ平衡において、摂動を 10000 アルベン時間追跡して非線型飽和させたものを用いた。そしてそのあと、マルチスケール手法に従って、中心ベータ値を 1% まで 50000 アルベン時間かけて上昇させた。この図からわかるように、それぞれの時間において不安定な共鳴面で次々と励起されるが、その摂動は弱く、緩やかに非線型飽和する。これは、低ベータでの飽和が圧力分布に局所平坦構造を形成し、ベータ値が上昇してもそれが駆動力を低減するという、二段階ベータ上昇法で得られたメカニズムによる。以上の結果から、内寄せ配位でのLHDプラズマでは、交換型モードの非線型飽和を通じて圧力分布が連続的に自己組織化し、高ベータ領域への安定な経路が確保されているのではないかと考えられる。

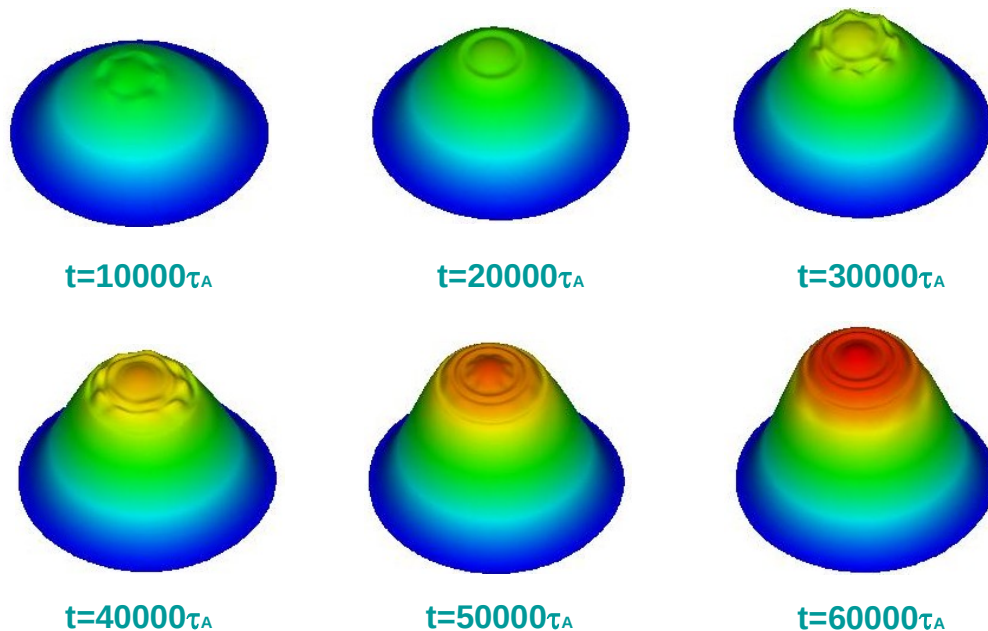


図 3. 4. 4-3 LHD 内寄せ配位でのベータ上昇効果を含む圧力分布の非線型発展。

尚、NORMコードで採用した簡約化方程式は、様々なプラズマ流体計算に応用されている。シミュレーション科学研究部における微視的不安定性流体シミュレーションの基礎方程式にもその発展された形式が用いられている。そのコード開発段階においてはNORMコードとのベンチマークテストを行っており、これによって相互のコードの信頼性を高めた。

最後に、大きな圧力勾配を持つヘリカルプラズマにおける崩壊現象の非線型ダイナミクスについて説明する。

本研究では、LHDのSDC配位に相当する大きな圧力勾配をもったヘリカル配位

を用いて非線形MHDシミュレーションを行ない、実験でもしばしば観測される中心密度崩壊現象（CDC）の発生ダイナミクスを探る。計算体系はトーラス全周にわたる3次元体系で、計算の初期値はHINTコードを用いて解かれた数値平衡解により与える。非線形MHD方程式系を時空間4次の中心差分陽解法にて解くことにより、微小擾乱の時間発展を解く。核となるシミュレーションコードは、シミュレーション科学研究部において開発されたMEGAコードのMHDソルバー部分をもとに、急峻な圧力勾配を持つLHD配位の長時間にわたるダイナミクスを解くべく改良されたもので、4次の時空間精度を持つ中心差分陽解法を用いている。

約 $600 \tau_A$ に及ぶ時間発展を追跡した。結果は、系全体の運動エネルギーが数度の増減を繰り返した後にエネルギー緩和している時間経過を示した。この間の横長ポロイダル断面内の圧力分布の変化を示したものが図3. 4. 4-4(a)-(c)である。図を見れば分かるように、はじめにトーラス外側の圧力勾配の急な部分においてバルーニングモード様の中間波数のモードが支配的となって不安定性が成長し、やがてプラズマ塊が細かく崩れて表面から剥離し、周辺部へと掃き出されている。このとき、周辺部の構造が崩壊することにより、より急峻化された圧力分布が過渡的に形成される。それとともに、やがて中心部の圧力が初期値の30~40%程度にまで減少し、系は緩和する。このように、原因となる不安定性が圧力勾配の急な部分で発生しても、その非線形成長過程において、中心圧力の減少が引き起こされることを示している。

中心圧力が減少する機構としては、本シミュレーション結果からは、磁気面の乱れにより外部領域と直結した磁力線に沿うフローが引き起こす対流損失が示される。すなわち、図3. 4. 4-4(d)-(e)に示される磁力線のポアンカレ図を見たとき、 $t=300 \tau_A$ 前後では、中心部まで磁気面が乱されており、この時間帯が最も中心圧力の下げ幅が大きくなっていることから、中心部の磁力線が、圧力の低い周辺領域にまで直結されることにより、生じる磁力線方向の圧力勾配が圧力損失の原因となる平行流を引き起こすと考えられる。

計算結果をLHDにおける実験結果と比較する。配位の詳細な安定性に関する議論は本稿の対象外となるが、ここではCDCの崩壊相にのみ着目し、そのダイナミクスを定性的に比較すると、まず時間スケールに関しては、CDCの崩壊相の時間スケール（ $\sim$ 数百 $\mu\text{sec} \div$ 数百 τ_A ）と概ね一致している。また空間構造については、周辺部における揺動の増加と、それに続くコア部の密度（圧力）の減少の様子が計算結果とよく一致している。このように、不安定性を原因としてCDCのダイナミクスが説明できることが分かるが、CDCの原因を特定するためには、今後、実験配位の安定性解析を行なう必要がある。

本結果を、シミュレーション科学研究部において過去に行なわれた球状トカマクの周辺局在モードの解析[4]と比較すると、より高ベータ、高電流密度である球状トカマクでは、(1)バルーニングモードの飽和レベルが高く、より破壊的であること、(2)中心圧力の低下が、圧力分布の再配置によって誘起される別の内部キンクモード不安定性によって引き起こされること、の点で質的な差が見られる。外部電流系であるへ

リカル配位の優位性が示唆された一方で、今後、電流分布制御による崩壊現象の回避、低減法を探る意味において、トカマクとの比較は興味深い解析対象であろう。

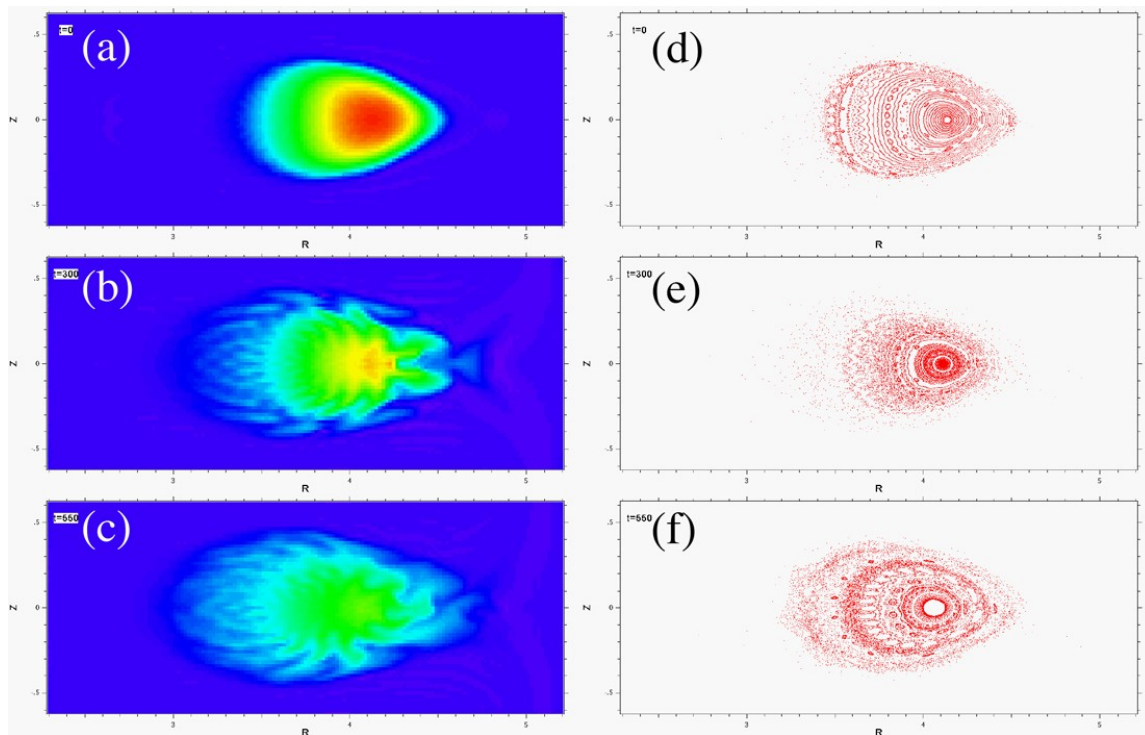


図3. 4. 4-4 横長断面内の(a)-(c)圧力分布および(d)-(f)磁力線のポアンカレ図の時間発展。時刻は(a)(d)0、(b)(e)300、(c)(f)550 τ_{Ao}

References

- [1] Y.Suzuki, *et al.*, “Development and application of HINT2 to helical system plasmas”, Nucl. Fusion **46**, No.11, (2006) L19.
- [2] K.Ichiguchi, N.Nakajima, B.A.Carreras, “NONLINEAR ANALYSIS FOR STABILIZATION OF INTERCHANGE MODE IN LHD PLASMAS”, Fusion Science and Technology **46**, No.1, (2004) 34.
- [3] K.Ichiguchi, B.A.Carreras, “Multi-scale approach to the solution of nonlinear MHD evolution of heliotron plasma”, J. Plasma Physics **72**, No.6, (2006) 1117.
- [4] N. Mizuguchi, *et al.*, “Nonlinear simulation of edge-localized mode in a spherical tokamak”, Nucl. Fusion **47**, No.7, (2007) 579.

3. 5 COEとしてのLHDと学術発信

3. 5. 1 大学等の研究との相互依存

1) LHD計画共同研究課題

LHD計画共同研究は、大学等で育まれている各種の研究、萌芽的研究、技術等をLHD実験に適用・集約するため、大学等で先ず研究・開発するための共同研究です。この共同研究は、LHDにおける実験の画期的進展、実験及び装置運転の効率化等に加えて、大学等の研究の進展に寄与することを目的としています。LHD計画共同研究は、終了後、一般共同研究に移り、LHDで実験等を行っていただくのが原則となっています。しかし終了後、直接LHDの実験・運転に関わらなくても、LHD計画の推進に貢献できるものであれば採択されています。これは、例えば、LHD計画を推進する上で、LHDの実験や開発以外のところでも、LHD計画を推進するための研究・活動が必要なためです。

LHD計画共同研究では、応募された研究課題の中から件数を絞って採択し、重点的に研究が進められるようになっています。これにより、効率的に研究が進められ、この成果を基に早期にLHDで実験等が実施されることとなります。平成19年度の本共同研究公募からは、新しい試みとして、将来LHD計画を推進するためには必要不可欠と考えられる研究課題を核融合研から提示し、大学等で研究を進めていただくという申請カテゴリーを設けています。LHD計画共同研究は、次の3つのカテゴリーに分かれています。

1. プラズマ分野
2. 炉工学分野
3. 核融合研が指定した研究課題

3. の核融合研の指定課題としては以下のものです。

- ①高ベータプラズマの制御手法及び、正確な計測機器の開発
- ②プラズマ乱流や乱流輸送の研究及び実験法の開発
- ③LHD-DD実験時の真空容器内材料におけるトリチウム挙動の研究

平成16年度からのLHD計画共同研究の応募と採択課題数について表3. 4. 1-1に示す。上記の3. 「研究所指定の課核融合研が指定した研究課題」については、プラズマ分野と炉工学分野に分かれて含まれている。毎年採択課題数は31から37件で、採択率は約8割となっている。プラズマ分野と炉工分野の件数の割合はほぼ同程度になっている。LHDに直接応用される課題と将来の応用を考えて基礎的な開発研究をするものがあり、分野領域の広い共同研究が可能になっている。

表 3. 4. 1-1 LHD計画共同研究課題の年次毎の採択数

FY2004 Field of Research	No. of proposals	Number of selection		
		New	Continued	Total
(1)Fusion Engineering Research	18	11	4	15
(2)Fusion Science Research	18	7	9	16
Total	36	18	13	31

FY2005 Field of Research	No. of proposals	Number of selection		
		New	Continued	Total
(1)Fusion Engineering Research	18	6	11	17
(2) Fusion Science Research	19	3	13	16
Total	37	9	24	33

FY2006 Field of Research	No. of proposals	Number of selection		
		New	Continued	Total
(1)Fusion Engineering Research	19	11	4	15
(2)Fusion Science Research	18	7	9	16
Total	37	18	13	31

FY2007 Field of Research	No. of proposals	Number of selection		
		New	Continued	Total
(1)Fusion Engineering Research	24	9	13	22
(2) Fusion Science Research	20	6	9	15
Total	44	15	22	37

LHD の応用を考えて各大学で行われた後に LHD に装置を設置して優れた研究を進めることが出来た課題も多く、LHD の実験の活性化に大いに貢献している。平成 16 年度からの採択課題一覧を表 3. 4. 1-2、3 にまとめる。研究期間は原則最大 3 年とし、研究終了後に、まとめを目的として、旅費のみの 1 年継続も認められている。

表 3. 4. 1-2 炉工学分野の平成16年度からの採択課題一覧

	炉 工 学 分 野		
No.	研 究 課 題	代表者氏名	所内世話人
1	Nb3Al CIC 導体における曲げ歪みの臨界電流値に対する影響の研究	玉井広史	西村 新
2	極低温下での 14MeV 中性子照射による超伝導マグネット材料の特性変化	西嶋茂宏	西村 新
3	核融合装置用高磁場・高電流密度超伝導導体の開発	太刀川恭治	三戸利行
4	LHD ヘリカルコイル導体における片側伝播現象の解明と安定性の改善	塩津正博	今川信作
5	ボロン・タイテニウムプラズマ対向材料としての適合性	日野友明	西村清彦
6	LHD ダイバータ部での負イオン計測と再結合プラズマの制御	利根川昭	増崎 貴
7	プラズマ第 1 壁用 5 族金属材料の表面およびバルクにおける水素同位体の動的挙動	波多野雄治	中村幸男
8	ナノ粒子多孔質層伝熱促進法を用いたプラズマ対向機器除熱性能の向上	功刀資彰	相良明男

9	LHD-DD 実験において発生するトリチウムの装置内構造物への付着・蓄積および排出トリチウム量の評価ならびに除去回収法の開発	田辺哲朗	宇田達彦
10	LHD 実験時の放射線の生物学的影響評価に関する研究	田内 広 (一政祐輔)	宇田達彦
11	トリチウムの環境動態研究	百島則幸	宇田達彦
12	液体金属リチウム自由表面流れの研究	堀池 寛	室賀健夫
13	液体リチウムからのトリチウム回収と不純物制御に関する要素過程と技術統合	田中 知	室賀健夫
14	材料照射用強力中性子源テストセルの最適熱機械設計	清水昭比古	室賀健夫
15	先進的な高温超伝導線材の核融合プラズマ実験装置への先駆的応用	小川雄一	三戸利行
16	プラズマ対向材料中の水素挙動に及ぼすヘリウム同時照射効果	上田良夫	増崎 貢
17	パルス管冷凍方式による電流導入部の開発	前畑京介	前川龍司
18	長時間放電中のプラズマ対向壁表面改質の実時間計測	坂本瑞樹	芦川直子
19	先進タングステン材のプラズマ対向機器への適用評価	吉田直亮	野田信明
20	LHD 施設の排気中におけるトリチウムガスの化学形態分別モニタリングシステムの開発	太田雅壽	佐久間洋一
21	LHD 用ステンレス鋼材料からのトリチウム放出挙動	松山政夫	西村清彦
22	液体ブランケット材料システムにおける両立性と物質移行に関する研究	寺井隆幸	野田信明
23	原子炉照射による超伝導マグネット材料の特性変化	竹内孝夫	西村新
24	原型炉 LiPb-He-Sic 高温発電ブランケットの工学基礎研究	小西哲之	野田信明
25	核融合装置用先進超電導導体の開発	住吉文夫	三戸利行
26	LHD-DD 実験時のトリチウム蓄積低減化、給排気燃料 (H,D) の定量及び回収ガス中の H,D,T 分離のための基礎研究	田辺哲朗	朝倉大和
27	炭素、水素同位体、ヘリウム同時照射環境での金属-炭素複合堆積層表面の水素同位体滞留評価	大矢恭久	相良明男
28	環境トリチウムの動態と環境影響評価手法に関する研究	杉原真司	宇田達彦
29	LHD 実験に伴う低線量放射線の生物学的影響評価に関する研究	田内広	宇田達彦

表 3. 4. 1-3 プラズマ科学分野の平成16年度からの採択課題一覧

	プ ラ ズ マ 分 野		
No.	研 究 課 題	代表者氏名	所内世話人
1	精密なサイズ可変ペレット入射装置の開発と湾曲ドリフトチューブのペレット通過性の詳細研究	佐藤浩之助	坂本隆一 (~16 山崎耕造)

2	磁化プラズマ中の低周波不安定性に起因するカオス制御	河合良信	東井和夫
3	50 μ m 帯 2 波長レーザー干渉計の開発と LHD への応用	岡島茂樹	川端一男
4	LHD 周辺プラズマにおける水素原子・分子輸送機構の解明	岩前敦	後藤基志
5	高速時間応答斜入射分光器の製作と重イオン計測への応用	西村博明	森田繁
6	広帯域小型 X 線分光計測システムの開発	田原譲	森田繁
7	非接触ダイバータプラズマの光学的診断	門信一郎	居田克己
8	大電力ジャイロトロンを用いた強力な ECH によるプラズマの高性能化研究	今井 剛	下妻隆
9	ダイバータプラズマにおけるダスト微粒子の溶発と不純物輸送過程に関する研究	上杉喜彦	増崎 貴
10	ヘリカル系プラズマ実験のための統合コード開発	中村祐司	山田弘司
11	LHD プラズマ内不純物炭化水素分子発生機構・挙動の解明と輸送制御	季村峯生	後藤基志
12	2 次元トムソン散乱計測システムの開発	小野 靖	成原 一途
13	ヘリカル磁場配位とプラズマエネルギー計測の研究	山崎耕造	宮沢順一
14	単一モード半導体レーザーを用いた中性粒子の流れ場計測	田中雅慶	森崎友宏
15	高密度プラズマの電子バーンスタイン波加熱・電流駆動	田中 仁	伊神弘恵
16	高ベータプラズマ中の波動物理研究	高瀬雄一	武藤敬
17	MHD 不安定性の実時間制御システムの開発	政宗貞男	渡邊清政
18	高ベータプラズマにおける電子温度分布測定のための電子バーンシュタイン波輻射計測システムの開発	出射浩	大舘暁
19	プラズマ乱流と乱流輸送の総合的研究及び実験法の開発	伊藤早苗	小森彰夫
20	磁気計測による磁気島検出器の開発	岡田浩之	榊原康彦
21	高周波生成プラズマを用いたセシウム添加型水素負イオン源の特性評価	安藤晃	竹入康彦
22	密度揺動構造とサイクロトロン高調波電子バーンシュタイン波による電流生成の相関について	関子秀樹	武藤敬

主な成果の例を以下に示す。

超伝導マグネットシステムに関する研究では、Nb₃Al ひずみ特性 (JAEA: 玉井広史) や 14MeV 中性子影響 (阪大: 西嶋茂宏)、次世代 (Nb, Ta)₃Sn 線材の導体開発 (東海大: 太刀川恭治)、ヘリカルコイルの常伝導部の片側伝搬に関する冷却安定性 (京大: 塩津正博) などを通じて、大学、JAEA、NIFS、NIMS などの共同研究体制の構築、超伝導工学、低温工学、中性子工学、材料工学などの異分野の連携研究体制の構築が開始された。またパルス管冷凍方式による電流導入部の開発 (九大: 前畑京介) では、LHD 装置の超伝導コイル用の 10kA 級パルス管冷凍方式電流導入部の最適設計に利用でき

ることを確認した。高温超伝導コイル研究では、制御なしの安定な磁気浮上配位を実験的に発見し、LHD の LID コイルやトカマクでの RWM 安定化用コイルなどへの応用の可能性を示した（東大：小川雄一）。これらの研究体制の構築は今後の核融合炉用大型超伝導マグネットシステムの開発研究の進展に大きく貢献することが期待される。

プラズマ壁相互作用と対向材関連では、B-Ti の第一壁コーティングが中程度加熱での水素除去に有用であること（北大：日野友明）、低放射化 V-4Cr-4Ti 合金等の 5 族金属表面での水素挙動データベースの構築（富山大：波多野雄治）、負イオン計測を利用したダイバータ熱負荷制御システムの開発（東海大：利根川昭）等に成果が得られるとともに、試料表面改質のレーザー反射強度計測と分光エリプソメトリーを用いた実時間計測法の開発が進んだ（九大：坂本瑞樹）。また水素イオンにヘリウムイオンを 0.1% 以上同時照射すると、タングステンのブリスタリング発生が完全に抑制されることが分かった（大阪大学：上田良夫）。W-TiC 合金においては、再結晶の起きない温度領域での塑性加工に目処が立つとともに、1000℃以上での損傷効果を低減できるタングステン合金の基本的開発指針が得られた（九大：吉田直亮）。伝熱流動に関するナノ粒子多孔質層伝熱促進法の実験研究（京大：功刀資彰）では、等温壁条件において熱流束を大きく引き出すことができるが、流体側の温度境界層の性状を変化するものではない新しい機構が示唆され、今後の実験指針が得られた。

LHD が目指す核融合炉のブランケット材料工学に関連して、液体金属リチウム自由表面流れの研究（阪大：堀池寛）では、強力中性子源液体リチウムターゲット自由表面流の接触式プローブを用いた表面変動計測の結果、流速の増加に伴い表面振幅は増加するが、強力中性子源のガイドラインである 1mm 以内にほぼ収まることを明らかにした。材料照射用強力中性子源テストセルの最適熱機械設計（九大：清水昭比古）では、テストモジュール（HFTM）（日本案）のフルスケール模型 R&D の結果、パンチングメタルを併用した多孔質板によって冷却ガス流量の均一化が可能であることを示した。液体リチウムからのトリチウム回収と不純物制御に関する要素過程と技術統合（東大：田中知）では、強力中性子源ターゲットリチウムの純化法の開発を進め、特にイットリウム表面を弗酸処理により清浄化することによって、低温での水素吸収速度が高まることを明らかにした。

トリチウム関連では、大型プラズマ装置での水素移行挙動データベース（九大：田辺哲朗）や、生物影響（茨城大：一政）、環境での挙動（九大：百島則幸）等の定量化が進んだ。平成 19 年度から開始の指定課題「LHD 用ステンレス鋼材料からのトリチウム放出挙動」に関する研究（富山大：松山政夫）では、LHD の内部に使用されている SS316L 材料が DD 実験で生成するトリチウムに曝されるため、その際のトリチウム捕獲及び放出挙動を評価することを目的として、LHD 用ステンレス鋼材料に所定の表面研磨及び熱処理を施してトリチウムガスに曝露する実験が開始され、トリ

チウム捕獲量に関するステンレス材(As-received)表面の物理的状態の影響等の定量的評価が進展している。

- [1] A. Nishimura et al., “14 MeV Neutron Irradiation Effect on Superconducting Magnet Materials for Fusion Device”, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 52, (2006) pp. 208-215.
- [2] Kizu et al., ”Effects of tensile and compressive strain on critical currents of Nb₃Al strand and cable-in-conduit conductor”, *IEEE Transaction of Applied Superconductivity*, Vol. 16, (2006) pp. 872-875.
- [3] K. Tachikawa, T. Koyata, Tsuyuki, M. Kawanabe, and T. Takeuchi, “Optimization of the Sn-Ta Sheet Composition in Jelly Roll Processed (Nb,Ta)₃Sn Wires”, *IEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2 (2007) pp.2647-2650.
- [4] M. Ohya, et al.: *IEEE trans. Appl. Supercond.* 15 (2005) p.1703-1706.
- [5] Y. Ogawa, et al.; ECH Plasma Experiments on an Internal Coil Device with a High Temperature Superconductor Coil” *Transactions of Fusion Science and Technology*, 47 63-70 (2005).
- [6] A. Tonegawa et al., “Characteristics of Hydrogen Negative Ions in Sheet Plasma”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, (2006) 8212.
- [7] H. Kurishita et al., “Development of ultra-fine grained W-(0.25-0.8)wt%TiC and its superior resistance to neutron and 3MeV He-ion irradiations”, Submitted to *J. Nucl. Mater.*
- [8] H. Kondo et al., “Experimental study of lithium free-surface flow for IFMIF target design”, *Fusion Engineering and Design*, 81(2006) 687-693
- [9] S. Ebara et a., “Feasibly study on cast-like IFMIF high flux test module”, *Fusion Engineering and Design*, 81 (2006) 887-891.
- [10] M. Kinoshita et al., “Experimental study of tritium recovery from liquid lithium by yttrium”, *Fusion Engineering and Design*, 81 (2006) 567-571.

2) 双方向型共同研究課題

核融合研は現在、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターの4つの大学付置研究センターと双方向型共同研究を実施している。核融合研には我が国におけるプラズマ・核融合分野の研究者の多くが在職していることから、各センターが必要とする多様な専門家が核融合研からセンターに出かけ、そこで共同研究を実施することで、各センターにおけるプラズマ・核融合研究の一層の促進を図る、というのが双方向型共同研究の趣旨である。このような形態の共同研究は平成15年度より核融合研一般共同研究の中に「相互交流型」として大学の研究室等を対象として開始されたのが最初であるが、平成16年度より、「双方向型共同研究」として核融合研究を対象としたより大きな規模で、一般共同研究とは独立した核融合研の新たな共同研究の枠組みとして立ち上がった。

核融合研の中にあって大型ヘリカル研究部には約90名の研究者が所属し、プラズマ実験、理論、加熱・計測技術、超電導技術、等、幅広い専門領域をカバーしている。双方向型共同研究の枠組みの基に各センターはセンターにある中型装置を核にした実験・理論共同研究を核融合研の共同研究と同様な形式で毎年公募している。大型ヘリカル研究部の研究者はそれに応募する形で共同研究を行っている。

筑波大学プラズマ研究センターでは、装置形式を超えて核融合研究に広く貢献できる、新たな普遍性の高い研究内容・取り組みとして、端部を持つミラー配位の特長を活かし、径電場シアフローや内部エネルギー輸送障壁(ITB)の物理機構の研究を推進し、LHDと装置形式を超えたITB等の外部制御の研究を双方向型共同研究で進めている。更に筑波大学ではその蓄積された知見を活かしてLHD用の長パルスジャイロトロンの開発が行われ、本年度核融合研に納入された。開発の段階で核融合研のECH加熱の専門家が筑波大学に出かけている。このジャイロトロンは現在行われている第11サイクル実験でプラズマ加熱に用いられ、その優れた性能が確かめられつつある。

京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターは磁場配位の自由度が高い小型ヘリカル装置ヘリオトロンJを有している。LHDと同じヘリカル型の装置であることもあり、その特徴を活かしたLHDと相補的な実験が可能であるため、閉じ込め改善の探求や加熱電流駆動法の研究など大型ヘリカル装置との比較を意識した研究課題数が多く実施されてきた。また、計測技術の応用やヘリカルプラズマを対象とした理論共同研究も進められている。

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターではレーザー慣性核融合の研究を行っている。磁場閉じ込め方式である大型ヘリカル装置とは原理的に異なる方式であり、

対象とするプラズマのパラメータも異なる。従ってその研究手法にも異なるものが多いが、計測対象が共通する分野もあり、ここでは主として強い輻射や中性子測定のための計測器開発に関する共同研究が進められている。これらはLHDに於いては今後計画されている重水素実験にも応用できる計測法である。また、大型ヘリカル装置を制作するために培ってきた超伝導技術と付帯する極低温取り扱い技術を応用して、レーザー核融合に必至な燃料球（クライオターゲット）の開発も共同で行われている。極めて密度の高い爆縮プラズマの振る舞いを調べるため大規模な数値シミュレーションを必要としており、核融合研のシミュレーション科学研究部からも参加して数値シミュレーションの手法開発を進めている。

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターには定常トカマク装置トリアムがあり、同じく定常運転を指向するLHDとプラズマ-壁相互作用に関する共同研究が進められた。LHDで開発された計測機器の適用も試みており、硬X線2次元計測をトリアムで、またリチウムビームプローブによる周辺プラズマ計測を小型装置のCPDで行っている。トリアムがシャットダウンした後の新しい球状トカマク装置QUESTの建設が双方向型共同研究の枠組みの下で進められているが、その実験計画の策定が全国の大学研究者が参加して進められている。その中においても核融合研の持つ加熱・計測技術を活用している。一例として定常NB I ビームの入射検討がLHDの研究者により進められている。

表3. 5. 1-1には、この4年間に実施された双方向型共同研究課題のうち、核融合研所員が深く関わり実施したものをまとめた。また、センター主導の双方向型研究課題に対しても核融合研所員は協力者として参加しており、各センターで展開される双方向型共同研究の推進に寄与している。

表3. 5. 1-1 核融合研所員が関わった双方向型共同研究課題

年度	研究課題	実施先
平成 16	電位生成・電位閉じ込めの物理機構・比例則の究明、及びそれに伴う径方向電場シアの效果の研究	筑波大学
	大電力プラグ ECRH に伴うサイクロトロン波の伝搬・放射と揺動励起	
	コアプラズマの径方向電位分布制御によるバウンスイオンの径方向輸送の研究	
	ヘリオトロン J 装置における ICRF 加熱実験	京都大学
	Heliotron J におけるバンピネス制御が粒子閉じ込めに与える影響	
	ヘリオトロン J における改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理論解析とその実験的検証	
	ヘリオトロン J を使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	大阪大学
	S X-CCD カメラを使った制動放射絶対強度測定	
	レーザー核融合実験におけるダイヤモンド検出器を用いた中性子測定	
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	九州大学
	トリアムに於ける定常プラズマ-壁相互作用の実験と粒子バランスのモデリング	
	TRIAM-1M における硬 X 線の二次元像計測	

平成 17	プラズマの可視化技術の開発と電位閉込め機構の研究	筑波大学
	核融合プラズマにおける放射スペクトル強度の研究	
	ICRF によるタンデムミラープラズマの揺動および径方向輸送制御に関する研究	
	ヘリオトロン J を使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	京都大学
	ヘリオトロン J 装置における ICRF 加熱実験	
	ヘリオトロン J における閉じ込め並びに電子テイル形成に関するバンピー成分の役割	
	ヘリオトロン J における改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理論解析とその実験的検証	大阪大学
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
	レーザー核融合実験における飛行時間中性子測定へのダイヤモンド検出器の適用	
	トリアムに於ける定常プラズマ-壁相互作用の実験と粒子バランスのモデリング	九州大学
平成 18	定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御 廣	
	トカマクプラズマの電流クエンチフェイズでの電子サイクロトロン波印加による高効率逃走電子電流生成	
	プラズマ境界力学実験装置における長時間プラズマ維持制御へ向けた定常 NBI 検討	
	小型 PWI 実験装置におけるリチウムビームプローブを用いた周辺プラズマ計測	
	GAMMA 10 における直接エネルギー変換の基礎研究	筑波大学
	X 線計測による電子分布関数・空間構造解析システムの研究	
	大電力プラグ ECRH に伴うサイクロトロン波の伝搬・放射と揺動励起	
	Heliotron J 装置における X 線波高分析を通した低衝突度電子に関する閉じ込め研究	京都大学
	ヘリオトロン J における改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理論解析とその実験的検証	
	ヘリカルプラズマにおける新古典電流に対する径電場・配位制御の効果	
	ヘリオトロン J を使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	
	CHS と Heliotron-J における 2.45GHz マイクロ波によるオーバードンスプラズマの生成と閉じ込めに関する比較研究	
	ヘリオトロン J 装置における ICRF 加熱実験	大阪大学
	レーザー核融合実験における小型半導体検出器によるガンマ線・中性子線測定	
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
	小型 PWI 実験装置におけるリチウムビームプローブを用いた周辺プラズマ計測	九州大学
	プラズマ境界力学実験装置における定常 NBI の検討	
	定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御	
	全日本 S T 研究計画の策定	平成 19
平成 19	ミラー磁場中のトロイダル磁場配位の形成	
	ガンマ 10 における高効率電子加熱用伝送系の開発	
	電位生成・電位閉じ込めの物理機構・比例則の究明、及びそれに伴う径方向電場シアの效果の研究	
	弱い相対論的電子の分布関数および空間構造評価システムの研究	
	GAMMA 10 セントラル周辺部におけるプラズマ回転計測	
	Heliotron J 装置における X 線波高分析を通した低衝突度電子に関する閉じ込め研究	京都大学
	ヘリオトロン J におけるプラズマ閉じ込め性能の閉じ込め磁場配位からの理論考察	
	ヘリカルプラズマにおける新古典電流に対する径電場・配位制御の効果	
	トロイダル電流が MHD 平衡に与える影響の理論的考察とその実験的検証	

ヘリオトロンJ装置におけるICRF加熱実験	
フィルターとAXUVダイオードアレイを用いたHeliotron Jプラズマのエネルギー閉じ込めにおける炭素不純物の影響に関する実験的研究	
方向性プローブによるプラズマ流計測と揺動の相関	
ヘリオトロン配位におけるMHD平衡・安定性に関する研究	
補助コイルを用いた磁場配位最適化設計	
レーザー核融合実験における小型半導体検出器によるガンマ線・中性子線測定	大阪大学
慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
2次元リチウムビームプローブを用いたCPDの周辺プラズマ揺動計測	
プラズマ境界力学実験装置(QUEST)における定常NBIの検討	九州大学
定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御	
CPD実験を用いたSNETベースの遠隔・定常データ収集法の開発	
全日本ST研究計画の策定	

3. 5. 2 他分野との連携研究

核融合研究の特徴は広範な基礎学術と先端工学技術からなる典型的な総合科学であることに求められ、例えばプラズマ物理学、物質科学、真空工学、超伝導工学、原子力工学などの上に立脚していると言える。これらを統合して実現された端的な例としてLHDを捉えることもできよう。LHDを実現するためには実際、多方面からの最先端の知見と経験が吸引され、活かされるとともに、それらの分野の進歩を牽引した。大型超伝導システムの工学技術や大電流負イオン源技術などが挙げられる。また、LHD実験開始後には、高温定常プラズマの特長を、核融合エネルギー炉を目指したプラズマ物理学だけではなく、宇宙に普遍的に存在するプラズマの解明や極端紫外線からX線領域の短波長領域の工業応用などのために光源として活かすことが図られている。これらはLHDの共同利用を他分野へ拡大した例であるが、逆にテラヘルツ工学やCCD素子の発達により、イメージングをキーワードとしたLHDプラズマの新たな研究の展開も見られる。

このように、核融合研究は学術分野として孤立することなく、むしろ他の学術分野との相互作用によって互いが発展していくものであることが分かる。特に、核融合エネルギー炉の開発は長期にわたり、より魅力的な炉を実現するためにはブレークスルーが必要であること、LHD実験計画にもそのミッション達成とともに波及効果が期待されていることから、他分野との連携研究を積極的に進めてきた。

LHDに留まらず、核融合と他分野との連携を促進するために平成17年より「国際的共同研究拠点ネットワークの形成」プロジェクトを核融合科学研究所において発足させた。これは自然科学研究機構における「分野間連携による学際的・国際的研究拠点形成」事業に枠組みで実施されている。このプロジェクトは、これまでの大学共同利用機関としての役割を国際的に展開していくことを目的としている。このプロジェクトにより、本章にある他分野との連携研究、および次章にある世界の核融合研究推進への貢献を進めている。

宇宙の物質の99%はプラズマ状態にあると言われているように、天文学の研究に

はプラズマは欠かせず、実際、ガリレオによる望遠鏡による観測（可視光）から、フ라운ホーファーによる分光器を用いた太陽元素の同定などは、そのさきがけと言える。また、核融合の研究の萌芽期から基盤が築かれた時代にはL. Spitzer博士や林忠四郎博士に代表されるように天文学がその母たる役割を果たした。このように核融合科学と天文学の関係は密接した時代があったが、その後は分野の進展、高度化により、独立色が高まり、交流も盛んとは言えない状態が数年前まであったと考えられる。しかしながら、自然科学研究機構として国立天文台と核融合科学研究所が共に活動することになるという偶然と学術的な発展ということからの必然が重なり、組織的な取り組みがなされるようになってきている。

その典型的な一例が、太陽観測衛星「ひので」とLHDとの共同研究である。ひのでは平成18年9月23日に打ち上げられ、同年10月後半より観測を開始した。国立天文台では、ひのでの科学データ解析を推進するために「ひので」科学センターを立ち上げた。特に、太陽遷移層及びコロナのプラズマからは鉄イオン、ヘリウムイオン、炭素イオン、酸素イオンなどの数多くのスペクトル線が観測されており、太陽非平衡プラズマの電離状態、電子温度を知る重要な手がかりとなると考えられている。太陽のような安定した高温プラズマは地上では自然になく、LHDで発生保持されるプラズマは、多くのプラズマパラメータが測定可能であり、またそのパラメータを制御することができる。これによって物理モデルをLHDにおいて実験的に検証し、それを太陽観測に応用することによって限定された観測を補完することができる。太陽コロナの研究において、特に重要なものが鉄イオンのL殻及びM殻からのスペクトル線であり、これらのスペクトル線は波長が10nm から30nm という極紫外領域 (EUV 領域) にある。図3. 5. 2-1にLHDプラズマへ鉄ペレットを入射した時に測定された鉄イオンのスペクトルを示す。現在まで、鉄のL及びM殻イオンのような多電子イオンに対しては体系化されたモデルはなく、これらの分光測定結果の解析を元に「時間発展型衝突・輻射モデル」を理論モデルとして構築する作業を進めている（[国立天文台渡邊鉄哉教授](#)）。

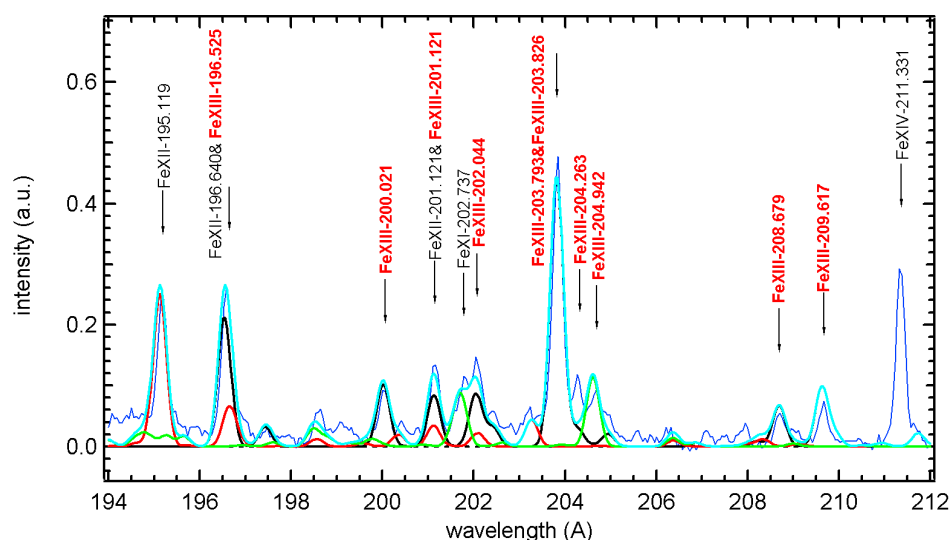


図3. 5. 2-1 LHDで測定された鉄イオンのスペクトル

LHDプラズマは定常性と安定性に優れており、そのパラメータ領域が広いことから、種々の不純物を入射することによって光源として利用される事例がこの他にも拡大している。X線波長領域における分光は超新星の残骸や銀河団の研究との交流が進められており、LHDの観測を基にしたモデルにより輸送や輻射の研究が行われている（名古屋大学田原譲教授）。またEUV波長領域の光は次世代リソグラフィの基幹要素として期待されており、重イオン例えばスズのEUVスペクトル線の性質がLHDを用いて進められている（大阪大学西村博明教授）。

また、マイクロ波はプラズマの密度、温度等の計測に非常に強力な道具であるが、これらの技術応用も進んでいる。マイクロ波技術だけではなく、不完全データによる像再構成手法は核融合研究に欠かせないものであるが、これらの技術によって2次元・3次元像を再構成するコンピュータトモグラフィが、対象をプラズマ外にも広げた研究が共同で進められている（大同工業大学岩間教授）（図3. 5. 2-2 参照）

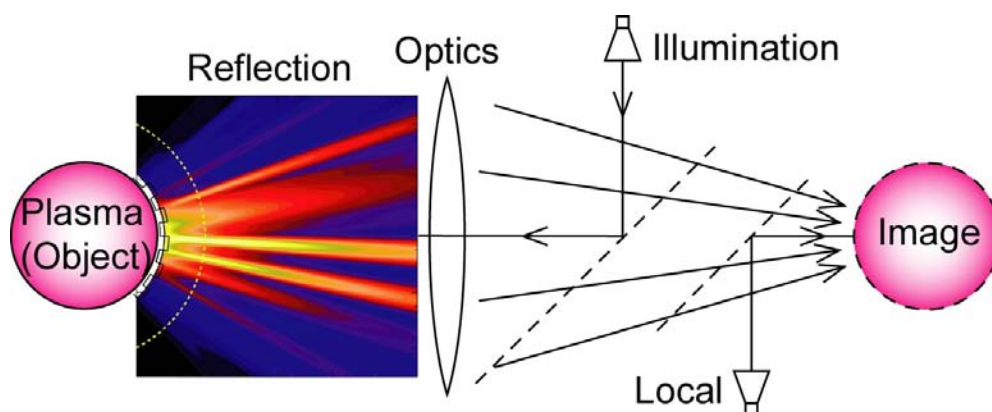


図3. 5. 2-2 マイクロ波イメージング

LHDにより発生されるプラズマはX線からEUV領域において大変魅力的な光源となっており、天文学のような基礎科学から産業応用までの広い他分野からの利用が今後、益々増えるものと考えられる。また、ナノサイエンス、物質科学との連携に、反応性プラズマ、プラズマ・壁相互作用、材料改質などをキーワードとして、複数の共同研究が開始されている。

3. 5. 3 世界の核融合研究推進への貢献

1) 各種協定に基づいた連携研究

科学の研究には、国際協力・競争が鍵となることは必然であり、核融合研究も当然、例に漏れない。先進国は競って研究・開発を進めており、同時に国際協力も盛んに行われている。核融合科学研究所は大学共同利用機関の役割を国際的に展開し、核融合科学研究所の国際的中核拠点として活動している。

この活動基盤を組織的に支えるものとして海外との各種の協定を締結してきた。政府間協定に基づく多国間協力として、国際エネルギー機関 IEA の実施協定であるステラレータ協定、テキサトール協定、S T 協定、二国間協力として、日米科学技術協力事業、日中拠点大学方式による学術交流事業、日韓核融合協力事業がある。さらに研究所間協定に基づく研究所間の学術交流協定を 8 カ国 13 機関と結んでいる。また、最新のものとしてフランスの 2 機関と核融合科学研究所を含む国内 3 機関によって共同研究を推進する研究機関を設置するものもある。図 3. 5. 3-1 にこれらの協定先機関と特に代表的な実験装置を示した。



図3. 5. 3-1 核融合科学研究所の学術交流協定などによる国際ネットワーク

これら全ての国際協力において LHD をプラットフォームとする研究を、連携の軸として位置づけることができる。多国間協力と二国間協力は委員会組織の正式な運営母体があるが、これに加えて研究所では、海外研究機関との学術交流協定においても交流責任者を指名し、協定による連携協力を強力に進めることとしている。表 3. 5. 3-1 に国際学術交流協定および交流責任者を示す。

表 3. 5. 3-1 国際学術交流協定および交流責任者

No	協定締結機関	締結日	交流責任者
1	中国科学院等離子体物理研究所 (ASIPP)	1992 年 6 月 27 日	東井和夫
2	マックスプランクプラズマ物理研究所 (IPP)	1993 年 5 月 11 日	山田 弘司

3	ロシア科学センタークルチャトフ研究所 (KI)	1993 年 5 月 15 日	松岡 啓介
4	ウクライナ科学センター ハリコフ物理工学研究所 (KIPT)	1994 年 10 月 7 日	居田 克己
5	オーストラリア国立大学 (ANU)	1995 年 5 月 8 日	川端一男
6	韓国基礎科学支援研究所 (KBSI)	1996 年 3 月 6 日	小森彰夫
7	カールスルーエ研究所 (FZK)	2005 年 10 月 6 日	三戸利行
8	プリンストンプラズマ物理研究所 (PPPL)	2006 年 3 月 3 日	岡村 昇一
9	テキサス大学オースチン校 (IFS)	2006 年 3 月 6 日	中嶋徳嘉
10	オークリッジ国立研究所 (ORNL)	2006 年 5 月 25 日	小森 彰夫
11	カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)	2006 年 11 月 28 日	相良 明男
12	プロヴァンス大学	2007 年 7 月 19 日	伊藤 公孝
13	ロシア科学アカデミー・一般物理研究所 (GPI)	2007 年 10 月 15 日	山田 弘司
14	国際共同研究センター (LIA) 「日仏磁場核融合研究センター」設置協定	2007 年 10 月 22 日	伊藤 公孝

国際的な連携協力の内容については平成 18 年度の外部評価対象であった「国際共同研究」に詳述（平成 18 年度外部評価報告書 2007 年 3 月 核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会）されているので、ここでは、LHD と直接関連した代表的な成果について述べることにする。

IEA 実施協定ステラレータ概念の開発にもとづき、ステラレータワーキンググループが組織され、国際ステラレータ/ヘリオトロン閉じ込めデータベース活動を始めとして、熱粒子・運動量輸送、周辺プラズマ物理、数値コードのベンチマークテスト、統

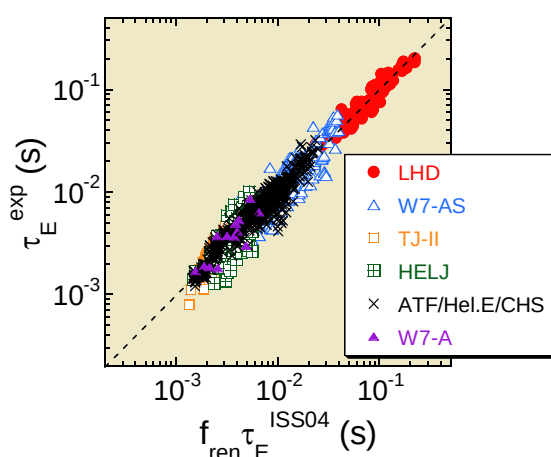


図3. 5. 3-3

国際ステラレータスケールン則

$$\text{ISS04 } \tau_E^{\text{ISS04}} = 0.134 a^{2.28} R^{0.64} P^{-0.61} \bar{n}_e^{-0.54} B^{0.84} \epsilon_{2/3}^{0.41}$$
と実験値の比較

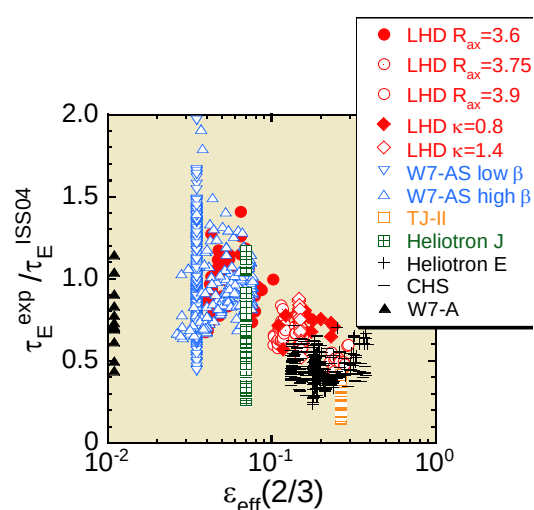


図3. 5. 3-4

スケールン則からの改善度の実効
ヘリカルリップル \$\epsilon_{\text{eff}}\$ 依存性

合輸送コードの開発などのグループが活動している。ここから、国際ステラレータスケーリング則 ISS04(図3. 5. 3-3)の導出や、異常輸送が実効ヘリカルリップルの低減によって抑制される相関の指摘がなされている(図3. 5. 3-4)。

他にも複数の装置で観測された内部輸送障壁をコア電子ルート閉じ込めとして性格付け、物理の一般的理解が図られている。これらの活動には IEA 協定以外にもマックスプランク・プラズマ物理研究所(独)、プリンストン・プラズマ物理研究所(米)、オークリッジ国立研究所(米)との研究所間協定も有効に機能している。活動は現在稼動中の実験研究の理解を深化および汎化させるとともに、W7-X や NCSX などの建設中の実験計画や炉設計への適用が重要な観点となっている。

LHD の実験には各種の協定に基づいた参加が多く行われている。例えば、ロシア科学アカデミー・一般物理研究所(露)との間で、マイクロ波散乱を用いた短波長揺動の計測手法が開発されている(図3. 5. 3-5)。ECH ジャイロトロンからのマイクロ波の後方散乱を用いるもので、電子のラーマー半径程度の短い波長を持つ乱流特性の同定を目標としており、2MHz まで広がった幅広い帯域での揺動スペクトルが得られている。これらの揺動計測についてはオーストラリア国立大学(豪)とも人事交流を行っている。

ロシア科学センター・クルチャトフ研究所(露)とは重イオンビームプローブ HIBP の開発とこれを用いた乱流やゾーナルフローの物理研究について共同研究を進めている。両研究所の HIBP グループは合わせると、CHS, TJ-II, LHD のヘリカル系のみならず、JFT-2M と T-10 のトカマク実験に参画しており、それらの結果や今後について詳細に議論を行っている。

中国科学院等離子体物理研究所(中)とは昨年稼動し始めた EAST 装置との間で、特に ICRF を用いた長時間放電についての共同研究が進んでいる。LHD の定常 ICRF 技術を EAST へ応用することや中国が最初に始めた ICRF 定常放電による壁コンディショニングの LHD での実施と比較が行われ、ITER への適用が議論されている。

装置工学や開発については、カールスルーエ研究所(独)と ECH ジャイロトロン、超伝導工学、トリチウム工学に関する共同開発を進めており、特に超伝導導体では FFHR などの核融合エネルギー炉で使用可能な大規模導体開発を、トリチウム工学では LHD の重水素実験をも見込んだトリチウム取り出し技術の実証試験などを行っている。ジャイロトロン開発についてはマックスプランク・プラズマ物理研究所(独)と筑波大学との多機関間協力となっている。

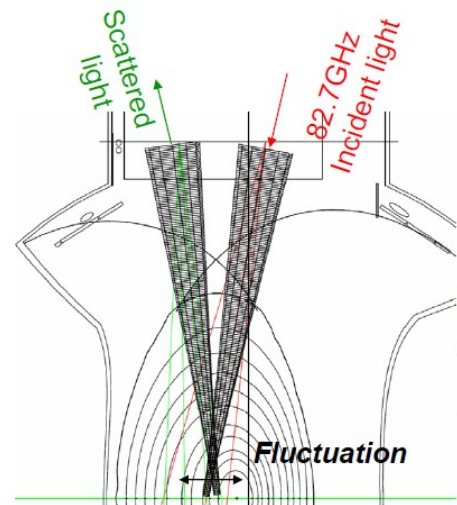


図3. 5. 3-5 ジャイロトロンを用いた揺動散乱計測

LHD で培われた装置工学や計測技術のうちの複数が日韓協力により KSTAR へ直接・間接に応用されており、実験開始後はこれらを用いた共同研究が開始されることとなる。

理論面においても、テキサス大学オースチン校(米)やマックスプランク・プラズマ物理研究所(独)との交流を進め、LHD において発見され、また詳細な理論との比較が可能となってきた内部拡散障壁やコア電子ルート閉じ込めなどの重要なトピックスに関する共同研究を行っている。

2) ITER連携

(1) 目的

核融合炉の実現のために核燃焼プラズマ実験は大きなマイルストーンであり、核燃焼実験あるいはシミュレーションを視野に入れた研究を今から育成しておくことは日本の核融合中枢機関としては非常に重要である。さらに、開発に非常に長い期間を必要とする核融合炉開発のためには、将来の核燃焼実験あるいは炉設計のための人材育成が最重要課題であり、50年先を見越した日本全体での取組みを考えていかなければならない。このような観点から、研究所では国際的に進められてきた国際熱核融合実験炉（ITER）計画への研究支援を推進することとし、その研究支援の方法と体制作りを検討するため、平成15年度からITER研究支援専門部会を設置して議論を重ねてきた。平成16年度には連携研究推進センター学術連携研究室ITER連携研究部門（併任3名）が設置され、研究所におけるITER連携研究の活性化と大学等におけるITER連携研究の支援体制作りを目指すこととなった。

(2) 連携研究体制

ITER連携研究体制を図3.5.3.2-1に示す。研究所内の体制としては、幅広い分野（核融合科学、炉工学等）においてITER連携研究を推進するために、各分野の専門家（13名）及び客員（日本原子力研究開発機構）（2名）で構成されるITER協力専門委員会を平成16年度に設置した。毎年2回程度の会合を開き、ITER連携研究部門との連携協力によりITER連携研究活動の支援体制及び活性化の方法等について議論している。研究所外との連携では、大学等との連携を強化するために、核融合ネットワーク（プラズマ科学及び炉工分野）を介した連携協力体制を設けている。また、ITERプロジェクト推進で大きな役割を果たしている核融合エネルギーフォーラムとの連携を深めるために、平成16年度からは、調整委員会委員として参画し、平成19年度からはITER・BA技術推進委員会の事務局として連携協力を実施している。

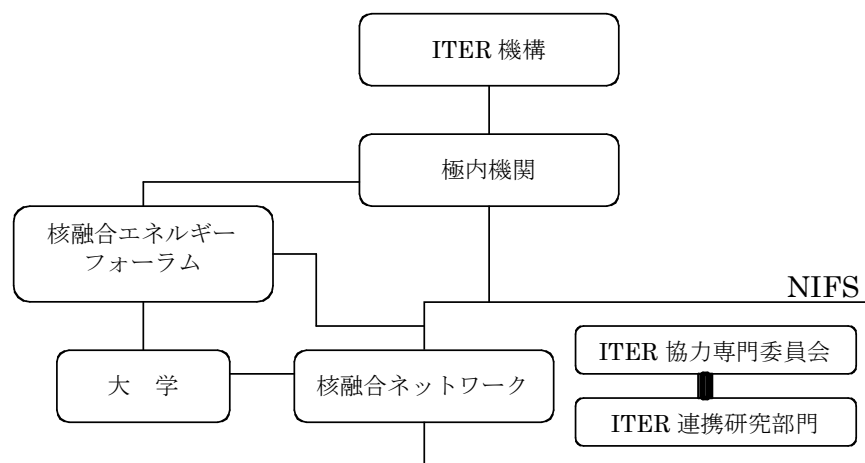


図3.5.3.2-1 ITER連携研究体制

(3) ITER連携活動

3-1) 国際トカマク物理活動 (ITPA)

国際トカマク物理活動 (ITPA) はITER/EDAの下にボランティアに行われてきたITER物理R&D活動の継続の重要性から生まれたもので、2001年7月から開始され、核融合プラズマ物理の進展に寄与する実験データ及び解析結果を提供し、データベースの構築とITER等の核燃焼プラズマの性能とその制御に関する研究を推進することを目的としている。この活動はITERの実験計画立案に大きく寄与すると共に、核融合 (核燃焼) プラズマ物理研究という学術的な面でも大きな進展が期待できる。従って、ITER連携活動の一つとして非常に重要なものであり、核融合科学研究所の目指すトラスプラズマの包括的理解を深める上でも連携協力を推進することは大きな意義がある。

ITPAは7つのトピカル物理グループ (輸送及び内部障壁の物理、閉じ込めデータベースとモデリング、周辺及びペデスタルの物理、スクレイプオフ層とダイバータの物理、MHDとディスラプション、定常運転と制御、計測) で構成されており、それぞれ年に2回程度の会合が開かれ、日本、ヨーロッパ、ロシア、アメリカ、中国、韓国、インドが参加して活発な議論が行われている。本研究所からはLHDにおける輸送現象、閉じ込めデータベース、MHD現象、定常運転など様々な実験結果をはじめとして、トカマクでの協力研究や理論・シミュレーション研究などを含めて、多くの発表と多数の研究者の議論への参加が行なわれてきた (表3.5.3.2-1)。当初は出来るだけ多くの研究者の参加を促したが、最近では毎年20名程度の参加者と発表が行われており、ITPA活動が定着してきたと言える。この活動の一部は、平成17年度からITER連携研究部門に対して割り当てられたITER連携活動予算 (平成17年度: 160万円、平成18年度: 180万円、平成19年度: 180万円) により、ITPA参加旅費として支援されている。参加者の推薦はITER協力専門委員会の議論に基づいて決定している。それぞれのトピカルグループ会合での研究所

表3.5.3.2-1 ITPA会合への参加実績

トピカルグループ名	2004年 参加者数 (発表件数)	2005年 参加者数 (発表件数)	2006年 参加者数 (発表件数)	2007年 参加者数 (発表件数)
輸送物理	7 (5)	9 (7)	5 (4)	1 (1)
閉じ込めデータベースと モデリング	2 (1)	3 (1)	0 (0)	1 (1)
周辺及びペデスタル物理	5 (4)	4 (4)	4 (4)	2 (1)
スクレイプオフ層と ダイバータ物理	3 (2)	2 (3)	2 (2)	2 (2)
MHDと ディスラプション	7 (1)	1 (1)	4 (3)	3 (1)
定常運転と制御	9 (2)	1 (1)	1 (0)	0 (0)
計測	4 (0)	4 (2)	4 (4)	0 (0)
合 計	37 (15)	24 (19)	20 (17)	9 (6)

からの発表についていくつか紹介する。輸送物理会合では、乱流輸送、帯状流、測地音波モードなどに関する実験・理論研究成果が報告されている。CHSにおいてトロイダルプラズマの帯状流の存在を初めて実験的に実証したこと、JIPPTI-Uのストリーマー構造の形成を示唆する実験結果などが報告され、同じトロイダルプラズマにおける結果として注目されると共に、今後、理論・シミュレーションとの詳細な比較が期待された。閉じ込めデータベースとモデリング会合においては、国際ステラレータデータベース、CHSにおける電子輸送障壁形成に関する加熱パワーしきい値及びヘリカルとトカマクにおける粒子輸送の比較などについて報告がなされた。周辺及びペデスタルの物理会合においては、LHDとCHSにおけるペデスタル構造形成やLHDにおける超高密度コアプラズマ生成（内部拡散障壁）に関する報告がなされた。スクレイプオフ層とダイバータの物理会合では、LHDにおけるICRF放電での壁からの水素除去及びLHDにおけるダスト研究について報告がなされた。MHD会合と定常運転会合ではLHDにおける長時間放電、ICRF加熱による高エネルギーイオン生成、磁気島計測、トロイダルアルヴェン固有モード（TAEモード）のシミュレーションについて報告し、特に、TAEに関する計算結果はトカマク実験との比較で注目を集めた。計測会合では、損失 α 粒子計測手法、LHDにおけるシンチレータプローブ等について報告がなされている。以上のように、トカマクとヘリカルの同じトロイダル磁場配位における共通物理あるいは技術が存在し、トラスプラズマの包括的理解に大きく貢献していると言える。特に、様々な物理現象の学術的側面の支援は大きく評価されている。今後も3次元磁場配位であるヘリカルプラズマの学術研究は2次元磁場配位のトカマクプラズマ研究に少なからぬインパクトを与えるものと期待される。

3-2) ITER国際チームとの連携協力

ITER国際チームからの要請で大型ヘリカル研究部プラズマ制御研究系の小林政弘助手が2005年9月25日から2006年3月25日までGarching ITER Joint Work SiteでITERのための研究支援を実施した。研究題目は「Power load analysis on the limiter configuration of ITER start-up phase」である。ITERのプラズマ立ち上げ時にはトロイダル方向に局所的なリミターを2箇所弱磁場側に設け、これによって熱・粒子束を制御する予定である。従来、トカマクの周辺輸送の解析には軸対称性を仮定したポロイダル断面における2次元解析が主流であったが、本配位ではリミターがトロイダル方向に局所的であるため、3次元解析が必要となる。そこで、ガルヒンのダイバータグループのDr. G. Federici、マックスプランク研究所(Greifswald)のDr. Y. Feng、日本原子力研究開発機構の那珂研究所のITERのダイバータグループの嶋田氏と協力して、3次元輸送解析コードEMC3-EIRENEをこの配位に適用し、リミターへの熱・粒子負荷の解析を行った。プラズマ立ち上げ時のプラズマ電流の変化に合わせて磁場配位を変化させて熱負荷の振る舞いを調べ、ITERのプラズマ立ち上げシナリオに対するリミターへの熱負荷による制限を明らかにした¹⁾。図3.5.3.2-2

はリミターへの電力負荷分布を示したもので、以前の簡略化した2次元解析による結

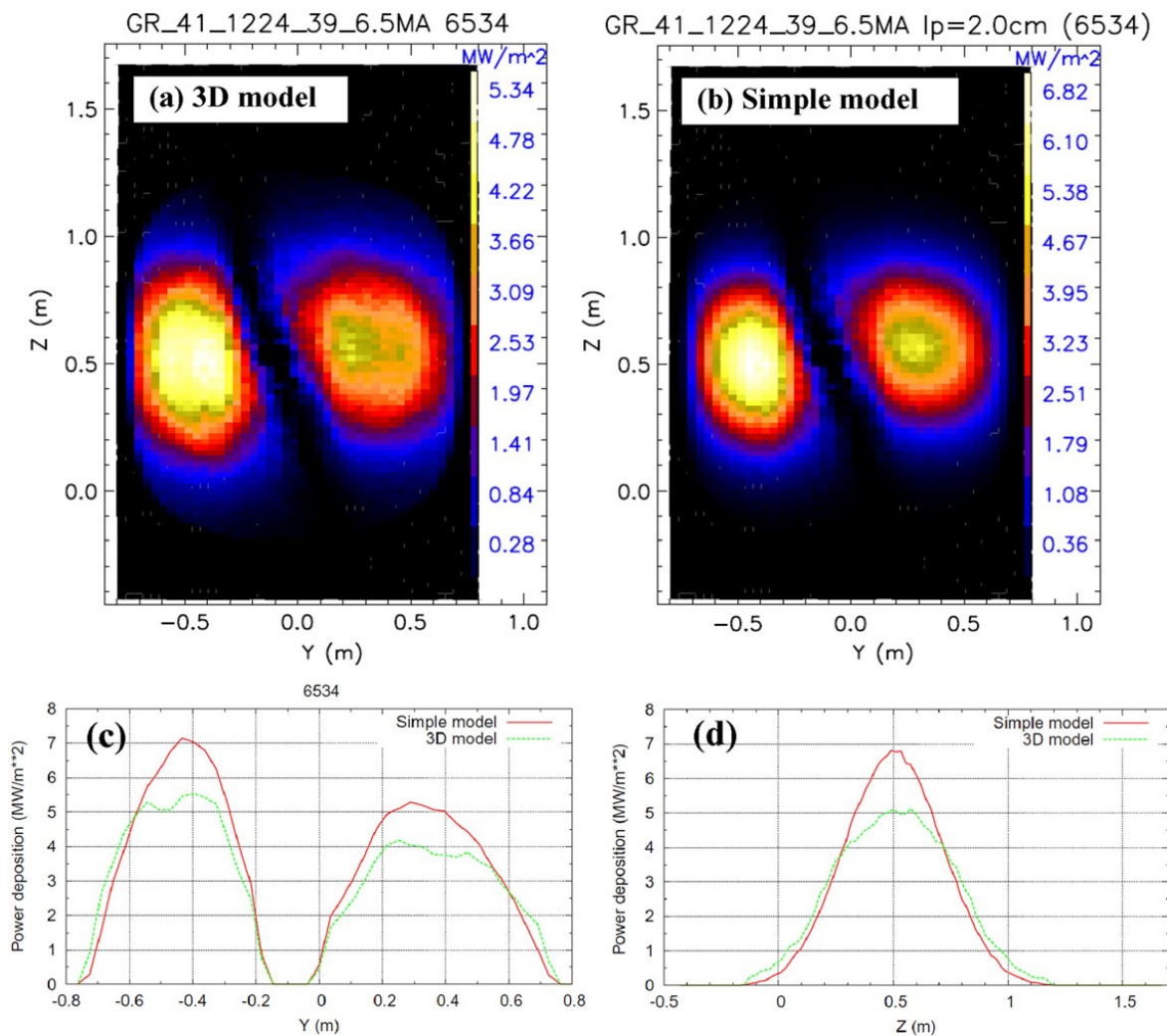


図3.5.3.2-2 リミターへの熱負荷分布 (a)3次元モデル、(b)2次元モデル、
(c)Z=0.5 mでの熱負荷水平分布、(d)Y=-0.5 mでの熱負荷垂直分布

果(b), (d)と今回の3次元解析の結果(a), (c)を比較したものである。プラズマ電流が6.5 MA の場合の計算においてピークの電力負荷は2次元解析に比べて約30%低いことが分かった。これはもちろんリミターの熱負荷限界である8 MW/m²よりも低い。この他にも学術的な側面においても多くの知見が得られ、分離したリミター配位ではスクレイプオフ層において非常に複雑な磁力線の結合長の3次元構造をもつこと、熱流束の磁力線結合長及び輸送係数に対する依存性などが明らかになった。この連携研究はトカマクではあまり用いられてこなかった3次元コードの威力が存分に発揮され、ヘリカル研究のITER物理設計への貢献が大きく評価された。

3-3) ITER国内チーム及びITER機構との連携協力

ITER計画に関する情報交換とITER連携研究の方法等について議論するために、ITER日本国内チームとの協力会合（ITER連携(核融合研／原研)協力会合)を設置して情報交換及び議論を重ねてきた。これまで、合計4回の会合と3回の

技術情報交換会を実施した。その中で超伝導マグネットに関する連携協力では、導体試験の可能性について議論されてきたが、幅広いアプローチ計画の中のサテライトトカマクである J T 6 0-S A の超伝導コイルの導体試験を実施する方向で進められている。また、I T E R の超伝導導体の安定性等に関するシミュレーションにおいて連携研究が進められている。一方で、燃料供給として用いられるペレット入射装置に関して 2 回程 I T E R 国際チーム及び I T E R 機構と情報交換を実施しており、L H D の連続ペレット入射装置における優れた成果について紹介している。この連携活動は I T E R Pellet Injector Workshop への参加に繋がっており、今後もこの分野での I T E R への貢献が大いに期待出来る。

(4) 今後の展望

これまで核融合科学研究所及び大学等の I T E R 計画への研究支援の方法及び参画体制について検討し、具体的な方法についても様々な場において議論を重ねてきた。一方で、現時点で実施出来る研究支援として、国際トカマク物理活動 (ITPA) において、環状プラズマに共通する物理に関する話題を提供し、トカマクとヘリカルプラズマの比較検討により、トカマクプラズマ物理の体系化に貢献してきた。I T E R の建設サイトが決定し、I T E R 事業体が設立されたので、今後は、その中で核融合科学研究所及び大学等の I T E R 計画への研究支援及び参画方法が具体化されることになる。これまでのボランティア的な研究支援から、より積極的な I T E R 計画への参画を求められる状況が予想されるため、I T E R 機構の専任職員、派遣職員、客員など具体的な参加形態を早急に検討し、日本全体での整合性のとれた国内体制を構築する必要がある。一方で、I T E R 計画は予算的に非常に厳しい状況にあり、外部からの研究支援に対しての I T E R 機構からの予算的措置は期待できない状況にある。従って、I T E R 機構内職員以外の立場で I T E R 計画に参加する場合、研究支援のための予算措置をどのような形で獲得するかを核融合コミュニティ全体で検討していく必要があるだろう。しかしながら、I T E R 研究支援を考える場合に、一番先に考えなければならないのは、I T E R 機構の組織に属さない研究者が I T E R 計画の建設期及び実験期にどのような貢献ができるのかという具体的な提案である。その提案をきちんと吟味して、実現するための方策を提供できる仕組みを作るのが我々の最終的な目的である。さらに、この I T E R 研究支援を成功させるためには、各研究機関での I T E R 連携研究の正しい評価と核融合コミュニティ全体での I T E R 連携研究への支援が不可欠であり、I T E R 機構の極内機関を含めた各研究機関の連携協力が重要である。核融合炉実現のために一度は経験しなければならない核燃焼プラズマ実験装置の建設及びその実験に参加する若い人材の育成と将来の核融合炉建設のための指導者を育てる上でも I T E R 計画への参画は非常に意義のあるものであり、核融合コミュニティ全体で取り組むべき課題である。

- 1) M. Kobayashi et al., “3D edge transport analysis of ITER start-up configuration for limiter power load assessment”, Nuclear Fusion **47** (2007) 61-73.

3. 6 今後の計画に向けた準備研究

1) 重水素実験

1) - 1 はじめに

これまでに述べたように、大型ヘリカル装置(LHD)はその定常無電流という特長を持つ磁場閉じ込め装置として、世界に先駆けた高性能プラズマ実験を遂行している。現在までに達成されたプラズマパラメータは、大型トカマク装置と比較・対照できるレベルであり、さらに向上させることにより、図3. 6. 1-1に示すように、LHD の目標領域に達することができる。これにより核燃焼プラズマ領域における LHD 型プラズマの閉じ込め、安定性などを予測することが可能となる。さらに、ITER における核燃焼実験の結果を取り入れることにより、ヘリカル型核融合実証炉の設計を進めることができる。また、学術的にも、核融合実証炉に向けた革新的概念を実証し、データベースの蓄積を図っていく上で、LHD の目標プラズマ領域の達成は重要である。

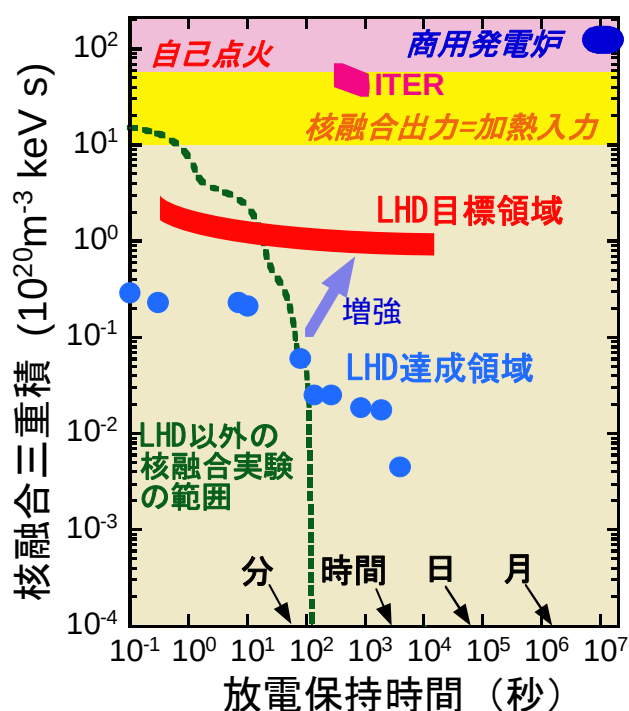


図3. 6. 1-1 LHD で達成された核融合三重積と放電維持時間。ITER と LHD の目標領域を合わせて示す。

重水素実験の最も重要な点は、以下のとおりである。

ITERに代表されるトカマク装置は、早くから研究が進められ、プラズマパラメータは、現在のところLHDを上回っている。しかし、原理的にパルス装置であり、将来の核融合商用炉に要求される1年を超えるような長時間運転の可能性については、種々のアイデアは出されているものの、まだ実験的に実証されてはいない。実際、ITERやサテライト・トカマク装置の

主要目的の一つは、長時間運転の見通しを実験的に見極めることにある。しかし、この見極めの結果が出るのは早くても10年から20年後であり、結果が出てから、他の方式を模索するようなことになった場合、核融合研究は大きく遅滞することを意味している。

LHDは、原理的に長時間運転が可能であり、既に1時間を超える放電に成功し、長時間運転を実証している。したがって、長時間運転という点では、核融合商用炉としての条件により、近づいていると言えよう。LHDの現在の問題は、水素を使った実験で、核融合反応に必要なイオン温度にまだ到達していないことである。しかし、これまでの研究の結果、核融合反応に必要なイオン温度を将来達成できる見通しが立っており、重水素実験と加熱装置の増強を合わせたシナリオによってこれを実証・確認することができる。このシナリオによって、LHD のプラズマパラメータの最終目標値を達成できれば、ヘリカル型実証炉の設計が可能となり、核融合商用炉の実現に大きく近づくことになる。さらに、ローカルアイランドダイバータを用いた実験を契機に、超高密度プラズマを実現できたことから、従来とは異なる、超高密度で比較的温度の低いプラズマを用いて核融合炉を実現させる方法も考えられるなど、ヘリカル方式はより魅力的な炉概念へと大きく躍進する可能性を有している。

このように、LHDにおける重水素実験と加熱装置の増強計画は、核融合炉の実現へ非常に重要なものとなっている。

LHD ではこれまで水素を用いたプラズマ実験を行ない、加熱電力の増強と高温プラズマに対する学術的理解の進展により、プラズマパラメータは着実に向上してきた。一方、世界の大型トカマク装置では、水素プラズマに比べて、重水素プラズマの場合、閉じ込め性能が向上することが示されており、重水素プラズマを用いた実験を基本として研究が進められている。日本原子力研究開発機構のJT-60Uトカマク装置では、平成3年より重水素実験を開始し、プラズマ性能が重水素化により大きく向上した。LHD においても、重水素実験を行うことにより、トカマク装置と同様に閉じ込め性能が数倍向上して、目標とするプラズマパラメータを達成することが期待される。また、トカマクにおける閉じ込めスケージングでは、閉じ込めに対する同位体効果が確かめられており、ヘリカル型装置に対してもこの同位体効果の存在を検証することは、学術的にも極めて重要である。

このように、LHD において重水素実験と加熱装置の増強を行うことの意義は、

- (1) プラズマパラメータの向上が期待され、LHD のプラズマパラメータの最終目標値の達成が可能となる。これにより、複雑な磁場配位を持つヘリカル型装置における高温プラズマの理解をさらに深めることができ、ヘリカル型プラズマの体系化、ヘリカル型実証炉における核燃焼プラズマの性質を学術的に見通すことなどが可能となる、
 - (2) これにより、ヘリカル型実証炉の設計が可能となる、
 - (3) ヘリカル型装置における同位体効果を明らかにすることなどを通じて、高温プラズマにおけるトカマク型装置との相補的理解を深め、環状プラズマに共通する物理を学術的に明らかにすることが可能となる、
- とまとめることができる。

LHDにおける重水素実験の目的は、上述したように、重水素同士が起こす核融合反応そのものを研究対象とすることではなく、ヘリカル装置における学理の体系化、核融合反応の実現に必要とされる高温プラズマの物理の体系化、環状プラズマの総合的理解、およびこれらの物理研究と密接に関わる要素技術の開発、実証、蓄積などを行うことを目的としている。

重水素実験では、重水素イオンのラーマー半径が軽水素イオンに比べ $\sqrt{2}$ 倍大きいことから輸送機構に大きく影響し、また、その質量の違いは、原子過程、化学的性質にも影響を及ぼす。その結果、閉じ込め性能、MHD 安定性などのプラズマ物理に新たな課題を提供する。また、ICRF 加熱では、重水素と軽水素の組み合わせにより、マイノリティ加熱と呼ばれる新たなプラズマ加熱を行うことが可能となり、特にヘリカル系における高エネルギー粒子の研究を促進することができる。

以上のことから、LHD における重水素実験の具体的な目的は、以下のようにまとめることができる。

- (1)ヘリカル系における同位体効果を明らかにし、プラズマの閉じ込め改善実験を行う。
- (2)重水素実験による閉じ込め改善と加熱電力の増大によりベータ値の増加を図り、高温領域における MHD 安定性の研究を行う。
- (3)ICRF加熱実験において、マイノリティ加熱を行い、高イオン温度を実現するための研究を行う。
- (4)ヘリカルプラズマの物理を学術的、体系的に理解し、核融合炉の設計・製作に必要な条件を確立する。
- (5)他の方式(トカマク)との共通点・違いを体系的に研究し、環状プラズマを総合的に理解する。
- (6)以上の事柄を重水素実験により明らかにし、目標プラズマパラメータを達成することにより、将来のヘリカル型核融合実証炉の設計を可能とする高温プラズマの学術的な理解を進めると共にデータベースの蓄積を図る。

以下では、こうした重水素実験の目的を達成するために必要な物理検討、実験シナリオ、実験スケジュールなどの検討を行う。また、重水素実験に際して発生する中性子・トリチウム量の評価を行うと共に、重水素実験を実施するのに必要な機器の改造、加熱装置の増強等の機器整備計画も示す。

1) - 2 物理検討

重水素を用いることにより、多くの磁場閉じ込めプラズマ実験において閉じ込めの改善が見られている。同位体効果はトカマク実験においてあらゆる運転領域で見られている。その依存性は質量数 A を用いて $A^{-0.2}$ から A^1 と幅広く、プラズマ端部からコアまで全ての閉じ込め領域に影響している。同位体効果は確実かつ強固な性質であり、プラズマ端部における原

子過程だけによって起こるものではない。一方、大型装置や、小型装置であっても粒子制御の良好な状態において、その効果がより明瞭となる傾向があり、これはプラズマ周辺部における原子過程が一因とはなっていることを示しており、この効果がコアプラズマへ及ぶことを示唆している。

トカマク、ヘリカル系を問わず、環状プラズマにおいては、輸送係数が規格化ラーマー半径に比例して大きくなるいわゆるジャイロボーム型の輸送が基本的な輸送過程であると考えられている。そこでは、エネルギー閉じ込め時間 τ_E は $A^{-0.2}$ の依存性を示し、重水素では若干の閉じ込め劣化が予想される。実際、大型トカマクにおける軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験で矛盾ない結果が得られている。これらは特にコアプラズマについて当てはまる事実であるが、ヘリカル系では未確認である。

同位体効果が最も顕著に現れるのがトカマクの H モードである。トカマクでは閉じ込め境界に障壁が形成されるHモードにおいて、その遷移に必要な加熱パワー閾値が A^{-1} の依存性を示す。つまり、DD実験条件では軽水素プラズマ条件よりも半分の加熱パワーでHモード遷移が発生する。さらに H モードのペデスタル部の圧力および幅が $A^{0.5}$ 、即ち、イオンのラーマー半径に比例する実験結果がある。Hモード時の重水素では軽水素よりもELM周期が長くなるのがこれらと関連していると考えられている。H モードについてのトカマク実験からの知見を整理すると、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも、(a)低い加熱パワーで遷移を起こし、(b)ペデスタルの圧力、幅とも大きくなり、(c)ELM 周期が長くなる。結果的にペデスタル部で稼ぐ蓄積エネルギーは $A^{-0.5}$ に比例することになり、全体のエネルギー閉じ込めに対する同位体同位体効果は $A^{-0.41}$ として現れる。

ヘリカル系においてもW7-ASの実験から、エネルギー閉じ込め時間や閉じ込め改善モードの遷移特性に差異が観測されている。

このように、質量による同位体効果は多種多様な実験でその存在が広く認められている普遍的な性質である、一方、実験および理論に未解決として課された課題も大きい。

これらの知見から、LHD の重水素実験に当たって、考えられる留意点として以下の3点があげられる。

- (1) 同位体効果はイオンの熱伝導損失に与える影響が大きい。電場を介した異常輸送の低減との関連もある。
- (2) 角運動量の輸送に与える影響が大きい。電子熱伝導損失が支配的な系、プラズマの回転が仕事をしにくい系、MHDが限界を決めていない系では同位体効果が出にくい可能性がある。また、ゾーナルフローなどの流れのシアへの影響に注目しておく必要がある。
- (3) LHDはプラズマ径が大きいので、コア部での原子過程の役割は小さいが、周辺プラズマでの原子過程の影響(放射損失や荷電交換による運動量損失など)を抑制する良好な粒子制御を実現することが、好ましい同位体効果を促すと考えられる。

そこから、演繹される戦略としては、プラズマの回転を利用した閉じ込め改善モード、イオン加熱が有効な実験条件がDD実験の前提、という観点が重要となる。

1) - 3 実験シナリオ

将来の核融合炉では重水素・三重水素が燃料として用いられることに対して、LHD においては軽水素あるいはヘリウムのみを用いるプラズマ実験をこれまでに9年間、実施してきた。LHD 実験計画は核融合反応そのものを研究対象とするのではなく、核融合反応の実現に必要とされる高温プラズマの物理の体系化および要素技術の実証を行うことが役割である。

これまでに集積された実験データは大型トカマク実験と比較・対照できるレベル(物理パラメータの差異が1桁以内)に達している。そこでは多くの科学的な知見が蓄積されてきており、今後さらにヘリカル系核融合炉を見通すために研究の統合化を図っていくことが中長期的な目的となる。このためには、プラズマの特性を核融合炉条件へ外挿できるモデルを確立することが必要であり、そこでは、できる限り核融合炉条件に近い実験データの集積を図ることが求められる。そのため、プラズマ性能の向上を図るとともにプラズマ燃料の同位体効果を把握することが本質的な課題と位置づけられる。

このため、重水素実験においては、LHD 実験の最終目標とされるプラズマ性能の達成が目的となる。すなわち

- 1) 密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において中心温度 10keV を越える高温高性能プラズマを生成維持する。
 - 2) $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$ を越える核融合三重積を達成し、内部輸送障壁を利用した超高密度プラズマによってさらに伸長を図る。
 - 3) 磁場1Tにおいてベータ値5%を達成し、さらに高磁場化による性能向上を進める。
- の3点が目標となる。

目標1)について言えば、重水素の利用により閉じ込めが33%向上すれば装置工学的に十分耐用性のある範囲である磁場 3T、25MW の加熱吸収パワーによって達成されることが予想される。一方、この閉じ込め改善がない場合は、加熱パワーでは 50MW を必要とする。あるいは25MWの加熱時に磁場を4.2Tに増強しなければならない。加熱パワー50MWおよび磁場4.2Tは装置工学上の仕様を越えており、実現することは極めて難しい。したがって、閉じ込め改善が目標を達成するために必須であると断言できる。

プラズマ燃料として重水素を用いる実験では中性子や γ 線の発生を伴うため、それらの計測機器への影響や、実験条件の転換にかかる作業への制約、そして現実的かつ段階的な設備整備の観点から、実験計画の初期段階においては軽水素のみを用いた基礎実験を遂行することが適当である。現在の核融合炉開発のための高温プラズマ研究は重水素・三重水素(DT)反応を目標として意図しており、基礎実験から得られた理解を応用する次段階として、核融合プラズマ条件により近い燃料である重水素を用いた実験を志向することが理にかなっている。

また、後述するように、重水素を用いることによって閉じ込めが改善することが期待され、これによって装置設備が現有のままでも、より高性能なプラズマを研究対象として手にすること

が可能である。大型トカマク実験を中心に核融合プラズマ実験では世界的に重水素が用いられているのはこのためである。閉じ込め性能を代表する核融合三重積(温度、密度、エネルギー閉じ込め時間の積)で見れば、重水素の利用によって多くのトカマク実験で見られているように閉じ込め性能が 50%向上すれば、2 倍以上の改善が得られることとなる。

さらに、主要な加熱装置である中性粒子入射 (Neutral Beam Injection, 以下 NBI と記す) 装置の増強を重水素を用いることによって効果的に行うことができる。このように上記の吸収加熱パワー 25MW の確保と重水素の利用は相乗的に LHD 実験計画の飛躍的な進展に直接つながるものである。

したがって、現在得られつつある物理的理解および実験設備整備の基盤の上に、核燃焼プラズマを扱う次段階の研究計画を見据えるためには、LHD における重水素実験の遂行により、プラズマの高性能化を図り、閉じ込め物理の質量依存性(同位体効果)を明らかにして DT プラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築することを最重要課題として位置づけ、これに取り組むことが是非とも必要である。この結果として、設計が可能となる、次段階の DT プラズマを対象とした研究計画は土岐サイトで実施するものではない。

加えて、実験計画の策定に当たっては、世界に類のない実験環境を提供する共同利用装置としての位置付けから、実験機会の増大、具体的には放電回数をできる限り十分に確保するという観点も重要である。

1) -3 -1 重水素実験の課題と予想される成果

重水素の利用により、大きく3つの結果が生まれる。

磁場閉じ込めの根本的な要素にラーマー運動があるが、重水素イオンのラーマー半径が軽水素イオンのそれと比較して $\sqrt{2}$ 倍大きいことが輸送機構に多様に作用する。この他にも原子過程や化学反応にも質量の違いが影響を与え、これらの基礎物理過程に同位体効果という視野の拡大が生じる。結果として閉じ込めおよびMHD安定性の改善に繋がるものと期待されると同時に、三重水素の振舞いに対する予測精度が飛躍的に高まる。

さらに、質量の異なった軽水素と重水素を混合することにより、イオンサイクロトロン共鳴(ICRF)加熱の選択肢が拡大されプラズマ加熱の効率化を図ることができる、NBI の重水素化により高い中性化効率を利用して、高エネルギー化、ひいては加熱パワーの増力を行うことができる、などの実験手法の拡大をもたらす、研究の多様性を生む。

以上の観点からの課題と予想される成果を以下に整理する。

(1)閉じ込めの改善

トカマク、ヘリカル系を問わず、トロイダルプラズマにおいては、輸送係数が規格化ラーマー半径に比例して大きくなるいわゆるジャイロボーム型の輸送が基本的な輸送過程であると考えられている。ジャイロボーム型の輸送モデルでは質量 A に対してエネルギー閉じ込め時間は $A^{-0.2}$ の弱い依存性を示し、重水素では若干の閉じ込め劣化が予想される。大型トカマクでは、軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験によって、プラズマ中心部についてはこれを支持する結果もある、一方、輸送係数が質量 A の平方根程度で逆に改善される

という結果もある。さらにプラズマの閉じ込め性能そのものは中心部の局所的な性質だけに支配されるものではないことに注意が必要である。以下に述べる構造形成が関わる。これらの性質を基本的なところから明らかにしていく必要がある。

トカマクでは高い加熱パワー入力条件でプラズマが自発的に遷移を起こし、輸送障壁を形成することが知られており、ヘリカル系でも類似した現象が観測されている。

トカマクでは閉じ込め境界に障壁が形成されるHモードにおいて、その遷移に必要な加熱パワー閾値が A^{-1} の依存性を示す。つまり、重水素実験条件では軽水素プラズマ条件よりも半分の加熱パワーでHモード遷移が発生する。

H モードのペデスタル部の圧力および幅が $A^{0.5}$ 即ち、イオンのラーマー半径に比例する実験結果がある。

H モード時の ELM 周期は燃料が重水素の場合、軽水素よりも長くなる。

H モードについてのトカマク実験から得られた知見を整理すると、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも、(a)低い加熱パワーでHモード遷移を起こし、(b)ペデスタルの圧力、幅とも大きくなり、(c)ELM周期が長くなる。結果的にペデスタル部で稼ぐ蓄積エネルギーは $A^{0.5}$ に比例することにより、全体のエネルギー閉じ込めに対する同位体効果は $A^{0.41}$ として現れる。すなわち、周辺部で温度密度が上昇し、中心部の若干の劣化があっても、総和として閉じ込めが大きく改善する。

内部輸送障壁についてもHモードと類似した性質がトカマク実験で観測されている。

以上のことから、LHD 実験において特に肝要なことは以下の点である。

ヘリカル系においても基本的な閉じ込め性質がジャイロボーム的であり、ペデスタルの形成も観測されている。しかしながら、同位体効果は未確認である。重水素を用いた実験により閉じ込めの改善が期待され、またその結果をトカマクで得られた知見と比較検証することはトロイダルプラズマの包括的理解即ち外挿性の高い理解を得るために極めて重要である。

ヘリカル系特有の閉じ込め改善方法として新古典拡散による電場を利用するものがある。重水素を用いることにより、電子ルートへの遷移が起こりやすくなる。生じた電場がイオンの閉じ込めを改善することが期待される。

閉じ込め改善の実現は、同じ加熱パワーに対して、プラズマパラメータ領域が高温、高密度領域へ飛躍的に拡大することを意味しており、経済的・効率的な戦略である。

(2)MHD 安定性の改善と安定性限界への試み

トカマクではHモードペデスタルの圧力勾配が ballooning mode で決まっており、重水素を用いることにより、より安定化される(上記記述部分に関連)。

アルフベン固有モードについては、中性粒子ビームエネルギーが同じであればアルフベン速度、ビーム速度ともに $A^{0.5}$ で遅くなるので、重水素を用いても変化はないと考えられが、重水素ビームの採用によりビームエネルギーを高くすることができれば、不安定化されやすくなる。特徴周波数が $A^{-0.5}$ に比例して、重水素では下がるため計測精度および理論との比較研究の向上が期待できる。

現在のヘリカル系実験でのベータ限界はMHD特性よりもエネルギー閉じ込め時間と加熱パワーの積で決まっている。重水素実験により、閉じ込め改善と加熱パワーの増大を図ることができるので、ベータ値の増加を図り、MHD安定性によるベータ限界へ近接し、MHD安定性が運転領域限界を規定すると予測される条件での実験研究が可能となる。

(3) 加熱実験手法の拡大

NBI の加熱パワーを増大するには加速電圧を上げること(高エネルギー化)が効率的であるが、その場合シャインスルー損失が問題となる。これは高い温度達成を指向した低密度運転において深刻である。重水素を用いれば荷電交換断面積が倍増するので高加熱パワーを倍増させても同じ吸収効率を確保できる。

NBI に重水素を用いることにより、ピッチ角散乱を起こす臨界エネルギーが増えるため、同じエネルギーに対してイオンに吸収されるパワーが増大する。ビームのエネルギーと電子温度の比が30程度の場合、イオン加熱パワーは軽水素の場合、全体の1/4であるが、重水素の場合は1/3となる。また、軽水素プラズマへの重水素ビーム入射ではこの比は1/2に達する。このように、現状では電子加熱が支配的であるという拘束を同等のイオン加熱が行われる条件へ大幅に緩和することができる。

イオンサイクロトロン加熱は、軽水素マイノリティでの条件で行われる。マジョリティとして、ヘリウムを用いることも可能であるが、スパッタリングの軽減から重水素を用いることが望ましい。また He^3 マイノリティ、重水素マジョリティの組み合わせも可能となる。

(4) 水素同位体と壁との相互作用

燃料ガスとなる水素および重水素や、反応の結果生成するトリチウムは、プラズマ周辺部から低エネルギーのイオン、あるいは比較的高エネルギーの荷電交換中性粒子として流出、対向壁に入射し、一部は固体壁中に蓄積する。水素同位体の対向壁面でのリサイクリングとそのプラズマ性能への影響を明らかにすることはプラズマ・壁相互作用研究の課題となる。これらリサイクリングと蓄積の挙動には質量比による同位体効果があることが知られており、興味深い研究対象である。

1) -3 -2 重水素実験に取り組む際の方針

(1) NBIの高エネルギー化による加熱パワー増大

前述したように、重水素実験に伴って加熱パワーを増強し、吸収パワー25MWを達成することが目標の達成の手段として求められる。

重水素ビームはプラズマ中での吸収効率が高いため、加速電圧を増やして高エネルギー化をはかっても、加熱効率を劣化させることはない。あるいは、加速電圧を上げなければ、ビームがプラズマの中心まで届かず、有効な加熱が得られないということになる。すなわち、加速電圧の増強によって、加熱パワーを増大しつつ、軽水素と同様の加熱吸収効率が得られることが期待される。このためには電源の増強とイオン源の改造が必要となるが、パワー増強の効率的な手段たりえる。

また、重水素実験で発生する中性子およびトリチウムの多くは重水素ビームと重水素プラズマの間の核融合反応によるものであり、この量は入射エネルギーと共に増加する。したがって、NBIの重水素化を図るに当たって、必要とされる技術開発要素、設備投資、および発生する中性子・トリチウムの量と、期待される効果のバランスを最適化することが必要である。

この最適化にあたり、考慮すべきことは比較的低エネルギーの垂直入射NBIの採用である。LHD実験計画当初は、ヘリカル系に特有な捕捉粒子の振る舞いを懸念し、損失の少ない環状のプラズマに対して接線方向からの入射を採用した。このため、プラズマ中のビーム経路が長くなり、中心まで加熱を行うために高い加速電圧が必要となり、また、接線ポート径の制約からも収束がよいイオン源が必要なことから、180keVの負イオン源からなる設計がなされ、現在3ビームラインで14MWの入射が行われている。そして、従来の重水素化案ではこれらについて250keV程度に増強することとされていた。

この9年間の実験研究の進展に伴い、磁気軸を内寄せすることによる新古典拡散の最適化配位が、そこで心配されたMHD不安定性の影響が深刻なものでなく、プラズマ自身の閉じ込め及び、ICRFによって生成された高エネルギーの捕捉粒子の閉じ込めに優れていることが明らかとされた。これはLHD実験で得られた顕著な成果である。つまり、NBIの入射方向が接線方向であるという制約は排除して考えてよいと判断されるに至った。

さらに、接線入射NBIは加速電圧が高いため、その加熱パワーの大部分がターゲットプラズマの電子に吸収される。核融合条件では核融合で生じたアルファ粒子による加熱が同様に電子に対してもつぱら起こることに対応してはいるが、イオンの閉じ込め物理を研究するため現段階の実験にあつては必ずしも望ましい状況とは言えない。加速電圧を電子温度の15倍程度までに抑えれば、NBIの加熱パワーをターゲットプラズマのイオンに付与することができる。これは現在のLHDでは40-80keV程度に対応し、もし接線入射であれば、その長い経路長によって周辺部にしかビームは侵入できない。しかし、垂直方向へ入射することができれば、この程度の低いエネルギーでも、プラズマ中心を加熱することが可能である。

また、閉じ込め改善の観点からプラズマ中心部への高エネルギーの粒子補給を取り入れるべきであり、電流の大きなNBIを採用することが望まれる。

さらに垂直入射ビームの加速電圧は接線入射に比べて低く設定することになり、正イオン源を採用することになる。この場合、重水素化によってイオンビームから中性粒子ビームへの変換効率が改善し、加熱パワーを向上させることが容易となる。負イオン源の場合はこの変換効率は水素と重水素で変わらない。

これらの検討結果により、NBIの加熱パワーの増強は垂直入射NBIで進めることとし、実際、平成17年度の第9サイクル実験から正イオン加速による40keVの垂直入射NBI(3MW)を稼働させている。

以上の状況を総合して、重水素実験への対応として以下の方針を採用する。

- ① NBIの重水素化および加速電圧の増強は垂直入射NBIについて行う。
- ② そのエネルギーは60-80keVに最適値があると考えられる。今年からの実験結果に基づき、対費用効果を含めた判断をする必要があるが、80keVを主案として検討する。

重水素実験前の垂直 NBI2 ビームラインで入射加熱（ポート通過）パワーを 12MW(40keV)から 18MW への増強を図るものとする。

- ③ 接線入射 NBI はすでに高エネルギーであり、重水素化に際してエネルギーを増大させるには、垂直入射 NBI に比べて技術的な困難さおよび設備投資が大きくなる。このため、加熱パワーの増強は有利な点が多い垂直入射 NBI に因るものとし、接線入射 NBI の加速電圧の増強は行わない。一方、これらの接線入射 NBI の重水素化については、高エネルギー粒子に伴う特有の物理現象の研究や荷電交換反応の増大により低密度での加熱パワーを促進させ高いプラズマ温度を指向した実験には適切な手法足りえる。また、低密度時の加熱パワー吸収を改善し、高い温度を得る手段として重水素を用いることは有効である。したがって、既存の 3 ビームラインいずれも軽水素－重水素運転の切り替えを容易にできる設備の準備を行う。エネルギーおよび入射加熱パワーは軽水素、重水素のいずれの場合もそれぞれ、180keV、14MW とする。ただし、重水素運転時は引き出し電流の劣化が予想されるため、これに対する措置の検討が必要である。
- ④ NBI の総加熱パワーは最大では 32MW となる。
- ⑤ 重水素ビーム入射実験は主として高加熱パワー時での研究に当て、必要な実験機会を確保し、機器の高負荷運転の繰り返し再現性を優先するため、放電時間は 3 秒を基本とする（従来の計画は 10 秒）。長時間運転については目的を絞り、見込みが十分ある場合については、全体計画での整合性を考慮し、合理的にそのショット数を定める。

以上の方針に基づいて、代表的な放電条件を以下にあげる。

まず、最大の性能を引き出すことができる条件として以下を仮定する。

- ・磁場強度： 3 T
- ・NBI 加熱： 180keV： 14MW(重水素) （ポート通過パワー）
80keV： 18MW(重水素) （ポート通過パワー）

下図の突き抜け損失を考慮し、軌道損失は垂直の場合 18%、接線の場合はないとする。

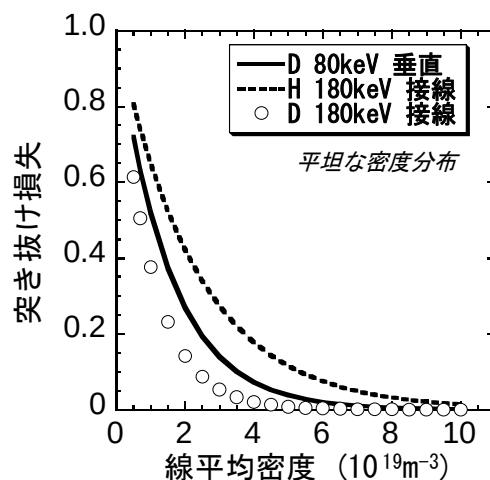


図3. 6. 1－2 線平均密度に対する NBI 入射電力の突き抜け損失の比率。

- ・ICH 加熱と ECH 加熱：合わせて 3MW
- ・閉じ込め時間 ISS95 則の 2 倍
- ・電子とイオンの温度は等しいとする。
- ・密度は平坦な分布 $(1-\rho^8)^2$ 、温度はパラボラ分布 $(1-\rho^2)^2$ 、NBI 加熱吸収分布は $1-\rho^2$ とする。

この条件では、密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、中心温度は10.3keVとなり、LHD計画の所期の温度目標条件にかなう放電が期待される。また、密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において、蓄積エネルギーは3.8MJとなり、3Tの強磁場においても β 値が3%を越え、かつ高温(体積平均温度で2keV以上)のプラズマを実現できることが予想される。

(2)ICRF の増強と運転形態

重水素を利用することにより、水素マイノリティの標準的なICRF加熱実験が可能となる。定常実験の加熱パワーを重水素実験期間中に現状の2MWから3MWへ増強する。

例として、目標に謳われている3MW での1時間放電については、 $\langle n_e \rangle = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e = T_i$ とし、重水素の利用による閉じ込め改善によって $\tau_E = 2\tau_E^{\text{ISS95}}$ が得られたと仮定すると、温度は2.7keV、蓄積エネルギーは1MJとなる。

(3)閉ダイバータ構造の導入による粒子制御性能の向上

これまでの重水素を用いた実験から、その同位体効果は大型装置もしくは中型装置であってもダイバータおよび壁コンディショニングによって良好な粒子制御を実現できた場合により顕著に現れることが示唆されている。また、その差異の同位体効果は周辺プラズマのみならず、コアプラズマへ影響を及ぼしている。LHDはコアプラズマが原子過程の影響を直接には受けないだけの大きさを持っているが、良好な粒子制御によって、周辺プラズマでの原子過程による放射や運動量損失を抑制することが、重水素実験にとって重要となる。したがって、閉ダイバータの導入による粒子制御性能の向上を合わせて考えることが求められる。

1) - 4 実験スケジュール

重水素実験計画は段階的に進める。

重水素プラズマ放電の回数は DD 反応生成物の積分量を以下に決める値を上限とし、

(i) 開始初年度から6年間

年間最大中性子発生量 2.1×10^{19} 個

年間最大トリチウム発生量 37 GBq (1 Ci)

(ii) 開始から7年目から3年間

年間最大中性子発生量 3.2×10^{19} 個

年間最大トリチウム発生量 56 GBq (1.5 Ci)

によって管理される。

実験計画の策定に当たって、年間総中性子発生量の制限の観点から放電回数の大略を推定する上で、この標準放電条件が多種多様な実験の平均として適切であると考え。これによると、後述する標準放電に換算して、初期6年間では年間6400秒、後期3年間では年間9600秒が許容範囲となる。1ショット3秒とすると、それぞれ、約2100ショットと3200ショットとなる。

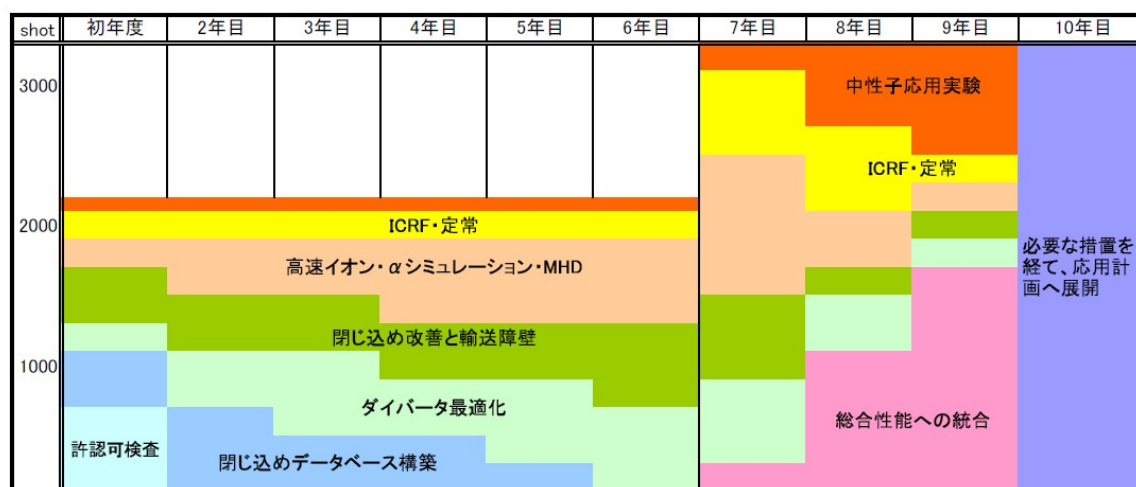
年間4ヶ月のプラズマ実験期間中の約4分の1から3分の1が重水素実験に充てられる。NBIのコンディショニングの最適化時期は通常、この期間中に2回設けられ、各々の時期に合わせて重水素実験を効率的に実施することになる。

重水素準備期間および重水素実験は以下のように段階的に進める。総表を表3. 6.1 - 1に示す。実験機会は5)に記された標準放電換算のショット数で表す。

(1) 準備期間

前節にあげた項目について適切な準備を行う。特に垂直入射 NBI2ビームラインの80keV・重水素化の整備、総中性子発生量計測、トリチウム処理装置は必須項目であり、かつクリティカルパスとなる可能性が高いため、重点的に配慮されるべきである。

表3. 6.1 - 1 LHD における重水素実験スケジュール案



(2) 初年度

中性子・トリチウムの扱い、計測・加熱機器の重水素実験対応についてのコミショニングを行うための予備実験を実施する。法令に基づく規制課の許認可を受ける検査のための運転を行う。

許認可検査を含めて標準条件で1000ショット程度の重水素実験を行う。そこでは

- 1) トリチウムおよび中性子の発生を把握、制御するために必要な排気、計測機器の動作確認
- 2) NBIを中心とした、重水素プラズマ加熱機器の基盤整備

3) 輸送に対する質量比効果を検証するための閉じ込めデータベースの作成に着手を目的とする。

実験終了前の 2 ヶ月は軽水素放電を行い、重水素の置換履歴および重・軽水素運転の比較のためのデータを収集する。

(3) 2年度目～6年度目

80keV 垂直重水素 NBI の加熱パワー増強のための調整、および 180keV 接線 NBI の重水素化を進める。平行して特に、中性子およびガンマ線計測機器の充実および既存計測の耐中性子化を図り、同位体効果の物理に取り組むとともに、閉じ込め障壁の形成などの閉じ込め改善に注目した実験を進める。

1) 閉じ込めデータベースの構築

磁場配位、加熱、密度、ダイバータ、燃料補給の条件などを精査し、重水素化以前の軽水素のデータベースと比較可能なデータベースを整備する。このために初期 600 ショットから 5 年度目 200 ショット程度まで漸減させながら重水素実験を充てる。

2) ダイバータ運転の最適化および閉じ込め改善と輸送障壁の形成

この目的に年間 400-800 ショット程度の重水素実験を充てる。従来にない閉じ込め改善モードが発見された場合は、この実験を1)、3)に優先させる。ダイバータにおいては長時間運転を見込んだ最適化も行う。ダイバータ運転と同位体効果による閉じ込め改善の協調効果を目指す。

3) ICRF/ECH 加熱

軽水素と重水素の混合ガスを用いた、ICRF のマイノリティイオン加熱の最適化を年間最大中性子発生量の 10 分の 1 未満の範囲で進める。アンテナ系を 5 ペアに増強するとともに、高速イオンテールの形成に注目して、その物理モデルを構築し、中性子発生量の推定の精度を高める。ECH 加熱では局所加熱電力の増大によるプラズマポテンシャルの制御による閉じ込め改善実験を進める。

4) 高速イオンの閉じ込め・ α 粒子シミュレーション・MHD

NBI や ICRF によって発生される高速イオンの閉じ込め性能の評価を進め、将来の核融合炉の α 粒子閉じ込めの評価に資す。MHD については、高速イオン励起の MHD 不安定性がもたらす、損失に注目した研究を進める。この目的のために年間 400-600 ショット程度の重水素実験を充てる。

5) 新しい概念の実験

LHD で有効なプラズマおよびその環境を利用して、核融合の分野に留まらない、分野間の連携を目指した学際的研究を広く受け入れ、7 年度目以降の本格化を目指して全体計画

の1割程度までの範囲において予備実験を行う。

(4)7年度目～9年度目

年間の中性子発生量の管理値を1.5倍とする。この重水素実験計画のまとめの時期において、特記すべきことは以下の3事項である。

- 1) 重水素実験開始後6年間で得られた知見を体系的に総合して、総合機能への統合を図る。もって、ヘリカル系核融合炉の展望を明らかなものとする。
- 2) ICRF を中軸とし、ダイバータ機能の応用と合わせて高性能プラズマの長時間保持を実証する。
- 3) 重水素実験終了後の LHD の再利用までを考慮しつつ、学術的な応用実験をとりあげ、以後の展開を図る。

(5)10年度目

実験終了後の管理および新しい目的での LHD の活用が容易となるようトリチウム除去、放射化物低減のための後処理を行う。

1) - 5 中性子・トリチウム発生量評価

以下に運転回数を制限する要素となる中性子およびトリチウム発生量について考察する。

(1)NBI 加熱によるもの

(A)想定最大中性子発生率

中性子が最も多く発生する条件は3. 3. 2(1)で述べたNBIを中心として加熱能力が最大となる場合から得られる。これらを基にしたプラズマパラメータと中性子発生率の計算結果を図3. 6. 1-3に示す。

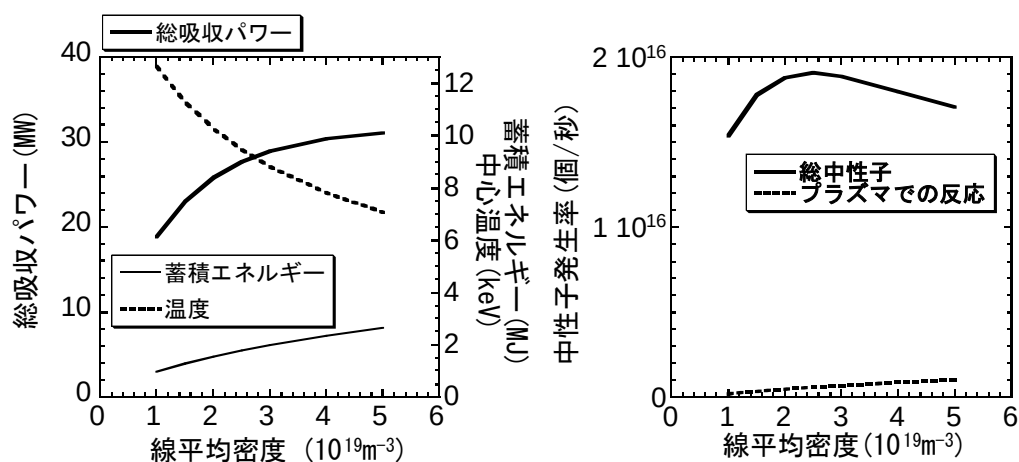


図3. 6. 1-3 最大加熱条件時の線平均密度に対する総吸収加熱パワーとその時のプラズマパラメータ(左図)および中性子発生率(右図)。

最大中性子発生率は密度が $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で見られる。これらの結果より、最大中性子発生率が想定される運転条件は上記加熱条件に加えて、下記ようになる。

線平均密度	$2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
総加熱吸収パワー	27.7 MW
中心温度	9.46 keV
蓄積エネルギー	1.77 MJ
中性子発生率	1.91×10^{16} 個/秒 (このうち熱中性子反応は 5.98×10^{14} 個/秒)

となる。また、3 秒間の放電1回で生じるトリチウム量は 0.10GBq (2.7×10^{-3} Ci) となる。

(B)標準放電

中性子発生の最大想定条件は加熱入力が最適化された理想的な状態であり、平均的に見て、この 6 割程度の加熱入力が多くの実験に供せられると考えられる。180keV 接線入射については 1 機のみを重水素運転とする。すなわち、入射加熱パワーとして、80keV 垂直入射 10.8MW、180keV 接線入射は軽水素ビームが 5.4MW、重水素ビームが 3MW とする。さらに、ICH、ECH については複数の加熱を組み合わせる複合加熱にも特殊な有効条件と研究開発要素があるため、ここでは用いないものとする。

さらに、閉じ込め磁場配位などを調べるために変化させるので、平均的には ISS95 則に対する改善度は 1.5 を仮定する。

磁場は 3T とする。

密度を変化させた時のプラズマパラメータと中性子発生率の計算結果を図3. 6. 1－4 に示す。

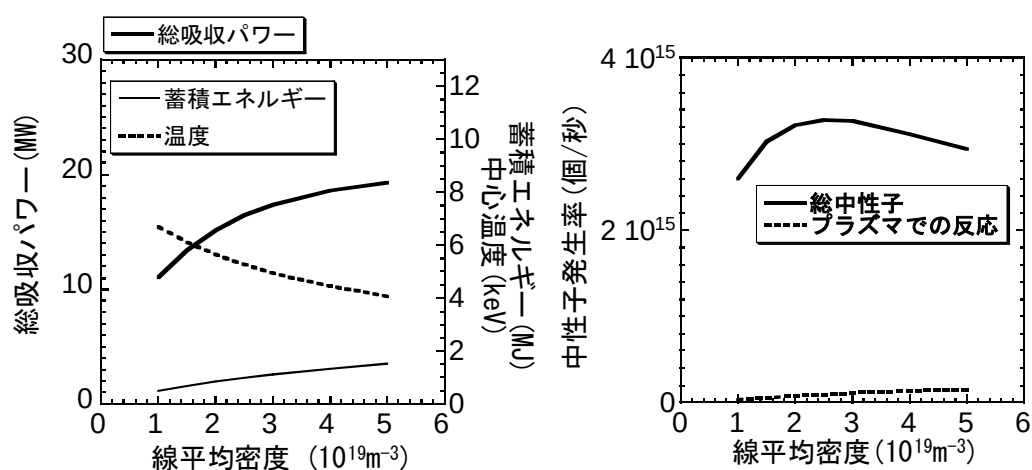


図3. 6. 1－4 標準放電時の線平均密度に対する総吸収加熱パワーとその時のプラズマパラメータ(左図)および中性子発生率(右図)。

これらの条件での、中性子発生は密度に対して比較的变化は小さく、最大値は(A)と同じ

く $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度で生じ、その値は(A)の想定最大値約6分の1となる。

線平均密度	$2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
総加熱吸収パワー	13.5 MW
中心温度	5.28 keV
蓄積エネルギー	0.99 MJ
中性子発生率	3.28×10^{15} 個/秒 (このうち熱中性子反応は 9.69×10^{13} 個/秒)

となる。

3 秒間の放電1回で生じるトリチウム量は 0.017 GBq ($4.7 \times 10^{-4} \text{ Ci}$) となる。

許認可申請に当たっては最大中性子発生率の 3 分の 1 程度となる条件を検査用放電とすることが求められるとすれば、この放電条件では中性子発生率が不足しており、もう1機の 180keV 接線ビームの重水素化が求められる可能性があるため、許認可条件と NBI 整備計画との合理的な合致を今後、詳細に詰める必要がある。

この検討においては、加熱吸収分布を固定した計算を行っているため、閉じ込め改善などを見込んだ特に中程度の密度領域における加熱吸収分布の影響と効果を今後の実験において明らかにし、実験機会回数の考え方とのバランスにおいて判断していくことが必要である。

また、垂直入射 NBI のエネルギーを 60keV とした場合は、ビームとプラズマとの核融合反応が軽減され、80keV の場合と比べて、中性子発生率はおおよそ1割減る。

(2) ICRF 加熱による定常実験

水素マイノリティの標準的な ICRF 加熱実験では、重水素はバルクプラズマであって、高エネルギーに加速されないと考えられるため、バルクプラズマでの DD 反応を考慮すればよいと考えられる。しかしながら、加熱モードによっては高エネルギーの重水素が発生することはないため、特に放電時間を 10 秒までに限った条件から研究を進め、加熱機構を明らかにしつつ、全体計画に支障をきたさない範囲で長時間化を図る。上述の 3MW での 1 時間放電 ($\langle n_e \rangle = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e = T_i = 2.7 \text{ keV}$) について、バルクプラズマ中での DD 熱核反応を考えると中性子発生率は 2.9×10^{13} 個/秒であり、1 時間で、 1.0×10^{17} 個となる。この仮定が正しければ、長時間 ICRF 運転も実現可能と考えられるが、イオン温度に敏感な領域であり、実験データの蓄積による判断が必要である。

(3) 中性子発生量についてのまとめ

以上の中性子発生量の予測をトリチウムの発生量および実効線量当量と合わせて表 3.6.1-2 にまとめた。ICRF 加熱による定常放電(1 時間)では、中性子およびトリチウムの発生量は最大中性子発生率が想定される実験のほぼ 2 回分に相当する。

表3. 6.1 - 2 各種放電条件における実験放電 1 回当たりに発生する中性子とトリチウム量

運転条件	放電時間	中性子 発生量	トリチウム量
従前の標準放電 NBI 250keV, 20MW	10 秒	2.4×10^{17} 個	0.41GBq (1.1×10^{-2} Ci)
今回検討の中性子最大 発生率を伴う放電 NBI 80 keV, 18MW 180 keV, 14MW など	3 秒	5.7×10^{16} 個	0.10GBq (2.7×10^{-3} Ci)
今回検討の平均放電 NBI 80 keV, 10.8MW 180 keV, 8.4MW など	3 秒	9.8×10^{15} 個	0.017GBq (4.7×10^{-4} Ci)
ICRF 定常放電	3600 秒	1.0×10^{17} 個	0.17GBq (4.6×10^{-3} Ci)

1) - 6 まとめ

これまでの9年間の水素を用いた実験により、物理・工学研究の両面において所期の目標に対し、現在の実験条件では十分に評価できる結果を得てきた。プラズマパラメータにおいてトカマク方式と同等の性能を出しており、プラズマの安定性、定常保持能力ではヘリカル方式の特長を十分に実証してきた。しかしながら重点研究課題の中で残された研究課題も多くあり、将来のヘリカル系核融合炉を目指した研究には、この研究課題のさらなる進展が不可欠となっている。ここに述べた重水素実験計画により、これらの課題の研究を進展させることが出来ると考えている。閉じ込めの改善と加熱パワーの増強、ダイバータの強化、計測の充実等により、新たにパラメータ領域と物理研究領域を拡大し、ヘリカル系の核融合炉の設計をより明確におこなうことを可能とするデータが得られると期待される。大型トカマク装置のデータと比較することにより、環状閉じ込め装置の高温プラズマ物理に対し総合的理解が一層すすむことも同時に期待されている。

ここに示した重水素実験計画については、運営会議の下に「LHD における重水素実験計画検討小委員会」が設けられ、これらの計画と検討内容について学術的観点に重点を置き検討していただいた。委員会における検討は報告書にまとめられており、LHD の成果と計画について時宜を得た適切な計画との評価を戴いている。

2) 閉ダイバータ

LHDでは主として、ヘリオトロン型磁場配位に備え付けのダイバータ磁力線構造を用いたヘリカルダイバータ配位においてプラズマ実験を行っているが、主プラズマの閉じ込め性能のさらなる向上及び高性能プラズマの長時間保持を目的として、ヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化を計画している。バッフル構造を設置してダイバータ室を形成し、ダイバータ板上で再結合した粒子やダイバータ板から発生した不純物がダイバータ部から流出することを防ぐことを閉構造化という。閉構造化とともにダイバータ部に排気装置を設置することにより、効率的なリサイクリング及び不純物制御、及び長時間放電における粒子制御が可能となる。本節ではヘリカルダイバータの閉構造化に関する準備研究状況について記述する。

3. 6. 2. 1 ヘリカルダイバータの磁力線構造

図3. 6. 2-1にLHDにおけるヘリカルダイバータ配位磁場構造の概要を示す。ヘリカルダイバータ配位では明確なX点は存在しない。最外殻磁気面直ぐ外側には、磁気島同士が重なり合った領域であるエルゴディック領域が形成されている。さらにエルゴディック領域の外側には、磁力線が真空容器で終端されることにより生じる、磁力線の折りたたみ構造をもったヒゲ領域が形成されている。エルゴディック領域の磁力線は、トーラスを周回する間に径方向にも移動するため、トカマク型装置のような層構造を形成するのではなく、エルゴディック「領域」を形成する。エルゴディック領域の磁力線はさらに、ヒゲ領域を通り、残留X点 (residual X-point) を経て最後はダイバータ板に接続する。図3. 6. 2-2に、縦長断面上部における開いた磁

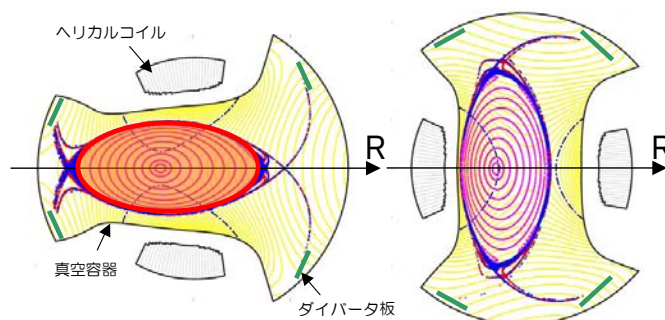


図3. 6. 2-1 LHD ヘリカルダイバータ配位におけるポロイダル磁力線貫通図。左は横長断面、右は縦長断面を示し、それぞれの左側が装置中心方向である。左図橙ハッチング部が閉じた磁気面領域、赤太線が最外殻磁気面を示す。

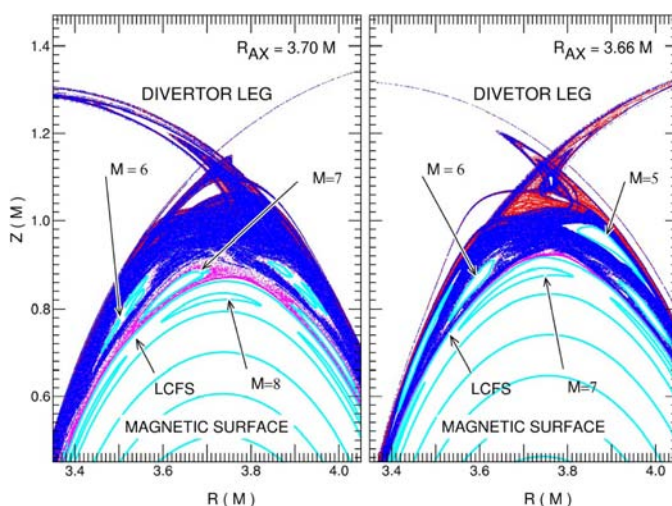


図3. 6. 2-2 LHD の縦長断面上部の開いた磁力線領域の磁力線貫通プロット拡大図。図中、 R_{ax} は磁気軸位置、 M はポロイダルモード数、LCFS は最外殻磁気面をそれぞれ示す。

力線構造の拡大図を示す。M はトロイダルモード数、LCFS は最外殻磁気面をそれぞれ示す。HD 配位の開いた磁力線領域の構造は、「タマネギの皮」に例えられるトカマク型装置の開いた磁力線領域及びダイバータ部と比べると複雑であることが分かる。さらに、運転磁場配位（この図の場合、磁気軸位置）により、磁場構造が変化することがわかる。図 3. 6. 2-3 に、LHD 横長断面上におけるトーラス外側赤道上的磁力線接続長分布を示す。この図は、磁力線追跡計算の出発点を LHD 横長断面上の赤道面に並べ、それぞれの点から真空容器までの磁力線に沿った長さを求めた結果である。磁力線長分布は複雑な構造を示し、最外殻磁気面近傍の接続長は数千 m に及んでいることが分かる。トカマク型装置の場合、接続長の分布は大半径と安全係数で決まり、その分布はなめらかな曲線になる。また、磁力線の接続長は高々 100m 程度である。ヘリカルダイバータ配位の

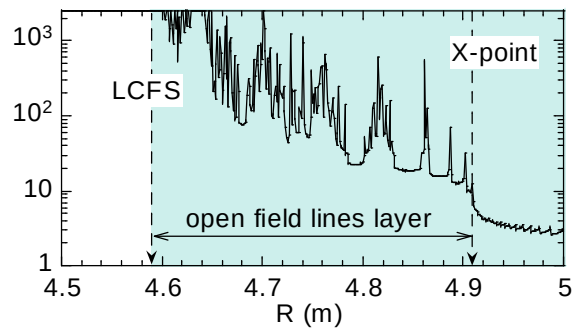


図3. 6. 2-3 LHD の横長断面赤道面上(トーラス外側部)における磁力線接続長分布

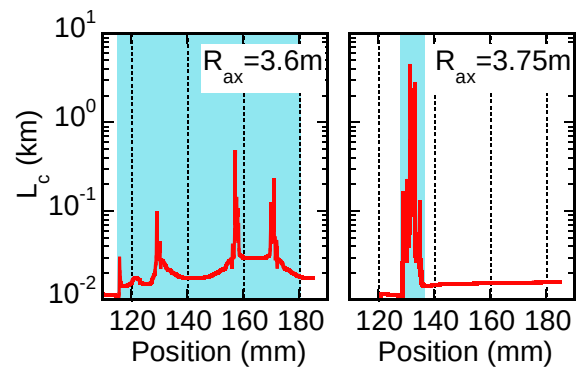


図3. 6. 2-4 トーラス内側のダイバータ板に接続する磁力線の接続長分布。横軸はダイバータ板上の位置を示す。

最外殻磁気面近傍の磁力線長はそれに比べて極めて長いといえる。このような長い磁力線が、最外殻磁気面近傍に、またさらに外側に離散的に存在している。最外殻磁気面近傍はエルゴディック領域であり、また離散的に現れる構造をヒゲ構造と呼ぶ。ヒゲ構造とヒゲ構造の間には、接続長分布が平坦な領域が存在し、これを間ヒゲ領域、またはラミナー (Laminar) 領域と呼ぶ。この領域の磁力線はエルゴディック領域中には入らず、従って最外殻磁気面には近づかない。またこの領域の磁力線群は、エルゴディック層中の磁力線群とは異なり、揃って壁と壁をつないでいる。磁力線追跡計算の空間分解能を上げて見ると、ヒゲ構造の中も、エルゴディック領域に繋がるような長い磁力線群と間ヒゲ領域から形成されていること、すなわち、フラクタル構造を有していることが分かる。図中 X-point 外側の磁力線は 10m 以下の短い磁力線群であり、図中の開いた磁力線領域 (Open field lines layer) の中に入ることなく、その周りを動き、トロイダル 1 セクション程度で壁と壁をつないでいる。LHD の場合、本図で示した位置は開いた磁力線構造領域が最も広がる位置であるが、その領域は約 30cm の幅をもって存在していることが分かる。この領域の広がり最も小さくなるヘリカルコイル直下でも、その幅は数 cm にわたる。図 3. 6. 2-4 に、トーラス内側に設置したダイバータ板に接続する磁力線の接続長分布を示す。開いた磁力線領域

のヒゲ構造や間ヒゲ構造がそのままダイバータ板に接続していることが分かる。また、ダイバータ板に接続する磁力線構造も、運転磁場配位によって変化していることが分かる。図中左の磁気軸位置 $R_{ax}=3.6\text{m}$ の場合は複数のヒゲ構造が、また右の $R_{ax}=3.75\text{m}$ の場合は一つのヒゲ構造がダイバータ板に接続しているが、前述のように、空間分解能を上げて見ると、これらもフラクタル構造をもち、ヒゲ構造と間ヒゲ領域から形成されていることが分かる。

トカマク型装置のダイバータでは、トロイダル磁場成分がポロイダル磁場成分に比べて非常に大きく、X 点近傍からダイバータ板までの磁力線長が長いのに対して、ヘリカルダイバータ (HD) 配位ダイバータ部はヘリカルコイルの平均小半径よりも外側に位置するため、ポロイダル磁場成分がトロイダル磁場成分よりも大きく、したがって、残留 X 点からダイバータ板に至る磁力線長は、エルゴディック領域から繋がる磁力線でも間ヒゲ領域の磁力線でも 2, 3m 程度でしかないことも HD 配位の大きな特徴である。このため、HD 配位ではダイバータ板に接続する磁力線構造がヘリカル方向にも不均一である。図 3. 6. 2-5 に、ランダムウォーク過程を取り入れた磁力線追跡計算による、ダイバータ上の粒子負荷分布予測結果を示す。磁力線構造を反映し、ヘリカル方向にも不均一になっている。また、

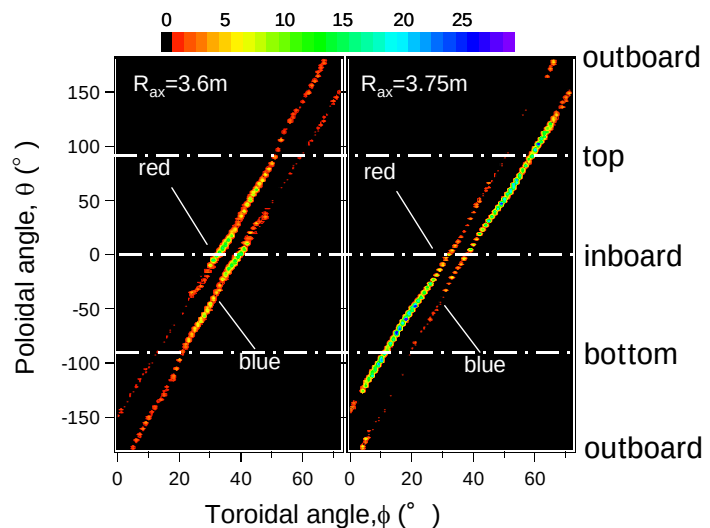


図3. 6. 2-5 ランダムウォーク過程を取り入れた磁力線追跡計算による、ダイバータ上の粒子負荷分布予測。磁力線追跡の出発点は最外殻磁気面近傍に設定。図中の red, blue は、図3. 6. 2-6(b)図に対応している。

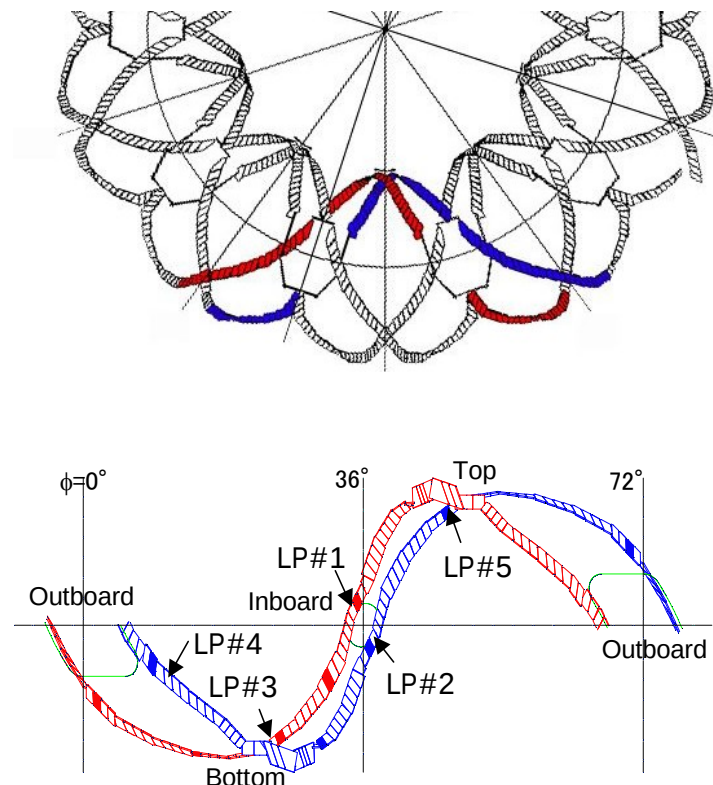


図3.6.2-6 (a) LHDにおけるダイバータ板列、(b) ダイバータ板列拡大図。(b)において、赤、青でハッチングしたダイバータ板には熱電対を、LP#1-5 と示したダイバータ板には静電プローブアレイをそれぞれ埋め込んでいる。

運転磁場配位によって、粒子負荷分布が大きく変化していることも分かる。

3. 6. 2. 2 LHD のヘリカルダイバータ ～設備の現状～

LHD では、設計当初の標準的な運転磁場配位であった磁気軸 3.75m 配位を基準に、磁力線追跡計算結果を基に、ダイバータ板を配置した。図 3. 6. 2-6 (a) に LHD におけるヘリカルダイバータ板の配置を示す（トーラス半周分）。特に、赤と青で色をつけたダイバータ板列を同図 (b) に示している。ダイバータ板の総数は 1 7 0 0 枚程度であり、その材料には等方性黒鉛（東洋炭素 I G-4 3 0 U）を用いている。

図 3. 6. 2-7 に、ダイバータ板構造を示す。ステンレス製（SUS316L）の水冷配管に、銅製のヒートシンクをボルトで機械的に接合し、そのヒートシンクに等方性黒鉛製のダイバータ板をボルトで機械的に接合している。ダイバータ板構造の開発は、核融合科学研究所の電子ビーム照射装置 ACT において行われた。

最もダイバータ板の温度が上昇するのは、高加熱パワーで数秒程度の短時間放電よりも LHD の実験目標である加熱入力 3 MW の 1 時間放電である。ACT における実験では、加熱入力の半分は放射損失で壁へ失われ、残りの 1.5 MW がダイバータへ流入すると仮定し、さらに HD の 3 次元構造によるピーキングファクターを 2 として、 0.75 MW/m^2 の熱負荷に耐えうるダイバータ板構造の開発を目指した。図 3. 6. 2-8 に ACT における実験結果を示す。現在 LHD に設置しているダイバータ板構造は、熱流束が 0.4 MW/m^2 を超えると、熱負荷と温度の関係が線形からずれる。これは銅ヒートシンクの温度が 200°C を超えると、ヒートシンクが変形し、ダイバータ板との熱接触が劣化するためである。ヒートシンクは変形すると元に戻ることはないため、以後の実験に支障を来す可能性がある。LHD では、1998 年の実験開始から現在まで、ダイバータ板で発生した不純物やリサイクリング

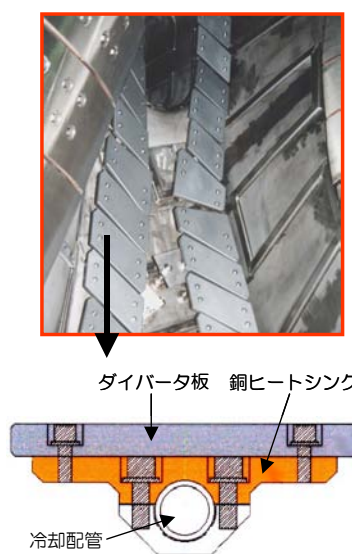


図3. 6. 2-7 (上)LHD真空容器内のダイバータ板列、(下) ダイバータ板構造

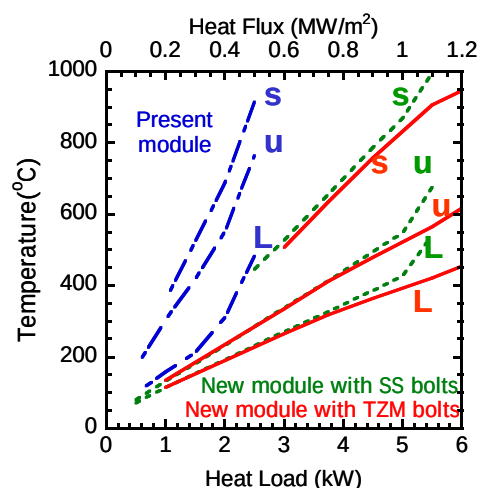


図3. 6. 2-8 ダイバータ板構造熱負荷試験結果。各熱負荷条件における定常状態での温度を示す。青線は現在設置されているダイバータ板、緑及び赤線は最近開発された改良型ダイバータ板。図中 s, u, L はそれぞれ、ダイバータ板表面、ヒートシンク上部、ヒートシンク下部を示す。

粒子を積極的に制御するような設備（例えば排気装置）は設置していない、いわゆる「開いた」HD 配位において実験を行い、LHD における HD プラズマ特性の研究を進めている。

3. 6. 2. 3 LHDのヘリカルダイバータプラズマ特性

ヘリカルダイバータプラズマ特性研究は、主としてダイバータ板に埋め込んだ静電プローブアレイ及び熱電対を用いて行っている。静電プローブアレイにより、ダイバータ板へ流入するイオン束と、ダイバータ板に接続する磁力線構造の関係が明らかにされている。図3. 6. 2-9に、両者の関係をいくつかの運転磁場配位について示す。イオン束（イオン飽和電流）分布のピークは、数百 m 以上の長い磁力線群の位置にあることが分かる。長い磁力線群はエルゴディック領域につながる磁力線群であり、したがって最外殻磁気面近傍を周回する。そのため、これら長い磁力線群が主たる熱と粒子輸送のチャンネルとなっていると考えられる。磁力線の接続長は、イオン-イオンあるいは電子-電子衝突の平均自由行程に比べて長く、そのため磁力線を横切る輸送も無視できない。間ヒゲ領域において、ピークに比べて少なくないイオン束が観測されていることが、そのことを示している。一方、磁力線長が 10m より短い領域は、図3. 6. 2-3において X-point よりも外側の領域に相当し、この領域へのイオン束分布の広がりや、拡散で理解できる程度である。3. 6. 2-10は図3. 6. 2

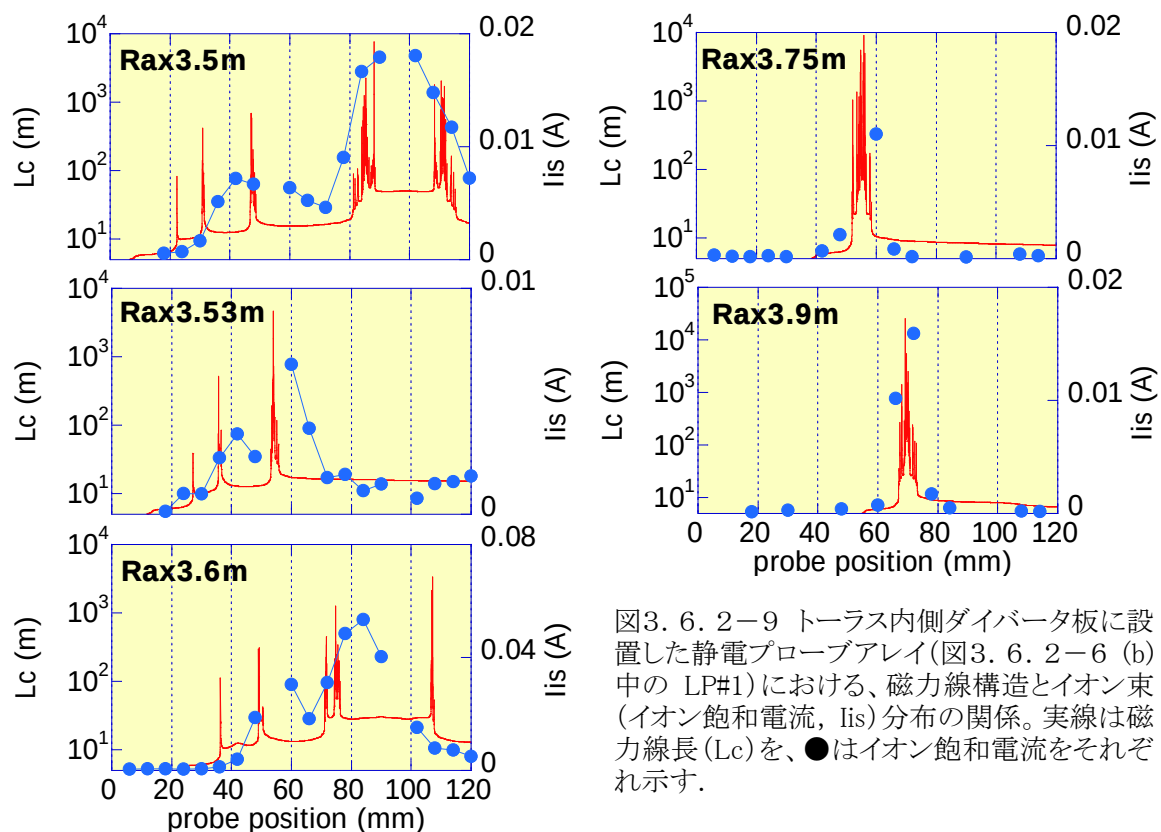


図3. 6. 2-9 トーラス内側ダイバータ板に設置した静電プローブアレイ(図3. 6. 2-6 (b)中の LP#1)における、磁力線構造とイオン束(イオン飽和電流, I_{is})分布の関係。実線は磁力線長(L_c)を、●はイオン飽和電流をそれぞれ示す。

ー5に示した、磁力線追跡計算によるダイバータ粒子負荷分布予測と、熱電対で計測

したダイバータへの熱負荷分布の比較である。両者は定性的に一致している。粒子負荷分布は磁力線構造を反映しており、エルゴディック領域につながる磁力線群が接続する領域で大きな粒子負荷が予測されているが、熱負荷についても同様であることが示された。また図3. 6. 2-6 (b)に示した複数の静電プローブアレイでの観測から、粒子負荷についても実験と計算は定性的に一致することが確かめられている。これらの観測から、複雑な磁力線構造と3次元構造をもつヘリカルダイバータ配位においても、磁力線追跡計算により、熱及び粒子負荷分布を予測することが可能であることが示された。この結果は、将来のヘリオトロン型核融合炉設計において、ダイバータへの熱・粒子負荷分布を予測し得るという点において重要である。

次に、開いた磁力線領域の最下流であるダイバータ部と、上流である最外殻磁気面近傍のプラズマパラメータの関係について、図3. 6. 2-11に示す。ダイバータ部の電子密度・温度は静電プローブにより、最外殻磁気面近傍の電子密度はFIR干渉計、電子温度はトムソン散乱計測により得られた値である。横軸は線平均電子密度である。ダイバータ部の電子密度・温度が、ともに上流の値に比べて一桁近く低下して

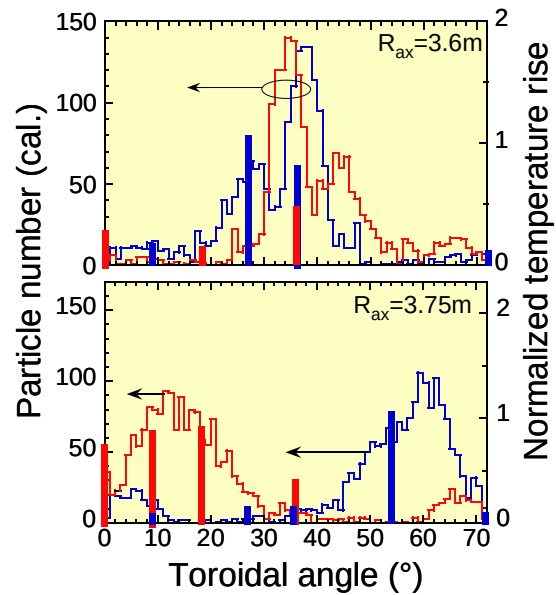


図3. 6. 2-10 エルゴディック領域につながる磁力線の本数 (particle number) と、熱電対で計測したダイバータ板の温度上昇分布。前者は図3. 6. 2-5を、横軸にトロイダル角をとって書き直した分布である。実線及びバーの色は、図3. 6. 2-6 (b) に対応している。

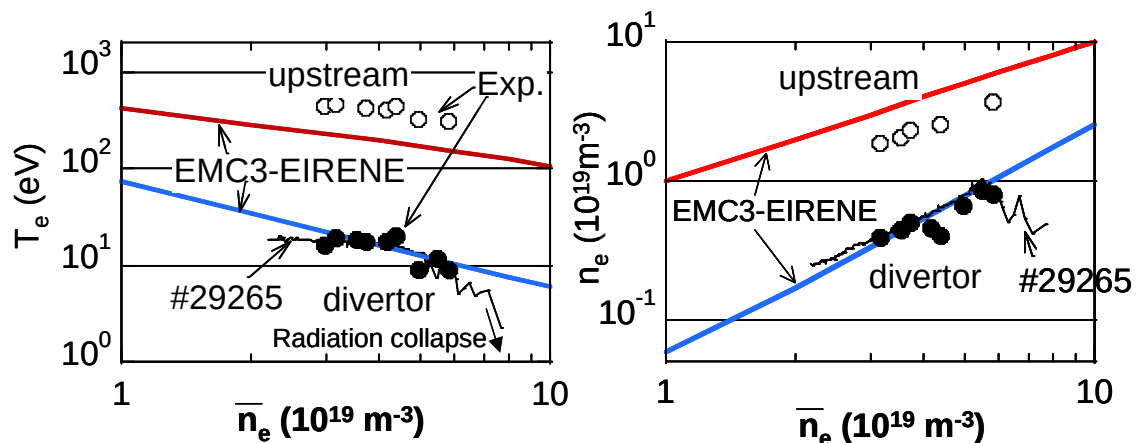


図3. 6. 2-11 ダイバータ部及び最外殻磁気面近傍 (upstream) の電子温度 (左)、電子密度 (右) 比較。●及び○は蓄積エネルギー最大のタイミングにおける計測値、赤線及び青線はEMC3-EIRENEコードによる計算値をそれぞれ示す。黒の実線は、1つの放電 (#29265) における電子密度・温度の時間変化を示している。P_{NBI} ~ 4-5 MW、R_{ax} = 3.75 m。

いることが一つの特徴である。この結果は、磁力線方向の圧力保存が成り立っていないことを示している。線平均電子密度の増大につれ、最外殻磁気面近傍の電子密度も増大する。一方、電子温度は線平均電子密度に弱く依存して低下している。ダイバータ部の電子密度・温度も、上流の密度・温度と同様の变化をしているが、線平均電子密度が $6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度になると、電子温度は上流の変化に比べて急速に低下し、電子密度も同様に低下する。トカマク型装置のダイバータにおけるダイバータデタッチメントに似た現象である。トカマク型装置のダイバータに比べて、上流電子密度の増加に対して強い依存性をもってダイバータ電子密度が増加する高リサイクリング状態が観測されていないことは特徴といえる。ダイバータデタッチメントは、ダイバータの熱及び粒子負荷を低減することができるため、高性能プラズマの長時間保持の観点から有用であるが、現在までのところ、LHD ではこの状態を安定に維持できておらず、ダイバータ板へのイオン束が全周にわたって大きく低下し、上流の電子密度・温度まで低下する完全デタッチメント、あるいは放射崩壊に至っている。

図 3. 6. 2-12 に、ダイバータ部中性粒子圧力の線平均電子密度依存性を示す。

10^{20}m^{-3} に近い高密度放電でも、中性粒子圧力は高々 10^{-2}Pa のオーダーである。ダイバータ部の高い中性粒子圧力は、ダイバータ部での排気によるリサイクリング粒子制御にとって必須であるが、この値はトカマク型装置のダイバータ部に比べて一桁程度低い。LHD のダイバータ部中性粒子圧力が低い原因の一つとして、図 3. 6. 2-6 で見られるようなダイバータプラズマの 3 次元構造が挙げられる。例えば $R_{ax}=3.6 \text{m}$ の場合、トーラス内側では強いリサイクリングが起きているが、トーラス上下部にはほとんどプラズマが来ない領域があるため、リサイクリング粒子はそのような場所から容易にダイバータ領域を抜け出すことができる。また、先に示したように上流に比べてダイバータ部は比較的低い電子密度が低いこともあり、HD 配位はダイバータ部での粒子遮蔽効率が悪いと考えられる。

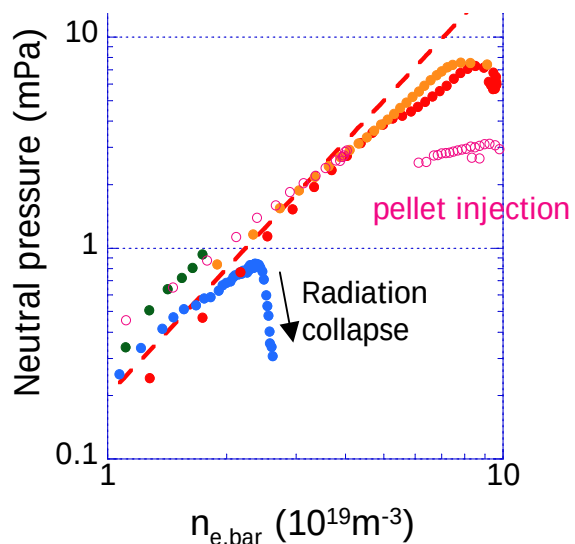


図3. 6. 2-12 縦長断面位置におけるダイバータ部中性粒子圧力の線平均電子密度依存性。

この節の最後に、壁ポンプについて示す。真空容器壁やダイバータ板は、ある程度水素などの燃料粒子を吸蔵することができる。すなわち、ポンプとして働き得る。LHDは真空容器温度が 95℃で制限されているため、プラズマ対向材中の水素蓄積飽和量は比較的大きいと考えられる。

図 3. 6. 2-13 は、ある実験日に、真空容器中にガスパフ及びペレットにより供給された粒子数と、真空排気装置により系外へ排出された粒子数を示している。両者の差し引きが壁に吸蔵された粒子数になる。この実験日の場合、供給された粒子のうち、排気された粒子数は約 20% 程度であり、壁ポンプに飽和の兆候は見られていないことが分かる。壁に蓄積された粒子数は 10^{24} atoms のオーダーであり、LHD のプラズマ対向面面積約 700m^2 で平均すると、 $10^{21}\text{--}10^{22}\text{atoms/m}^2$ のオーダーになる。この値は、実験期間を通してプラズマ対向面上に設置されていた材料プローブに最終的に吸蔵されている粒子数と同じオーダーである。またダイバータ板にも同程度の粒子が吸蔵されていることが分かっている。図 3. 6. 2-14 は、電子密度でガスパフの帰還制御を行った放電シリーズにおいて、密度とガスパフ量の時間波形を示している。放電が繰り返されると、必要なガス量が減少し

ていき、最後にはガスパフをしなくても目標電子密度まで到達していることが分かる。この場合、電子密度は壁からの放出ガスとリサイクリングのみで保持されており、外部からの密度制御はできない状態になっていると言える。図 3. 6. 2-15 は、先の図で示した放電に続いて、ガスパフなしの NBI 放電を繰り返した際の、各放電での到達密度と排気された粒子の積分量を示している。放電を繰り返すにつれて、到達密

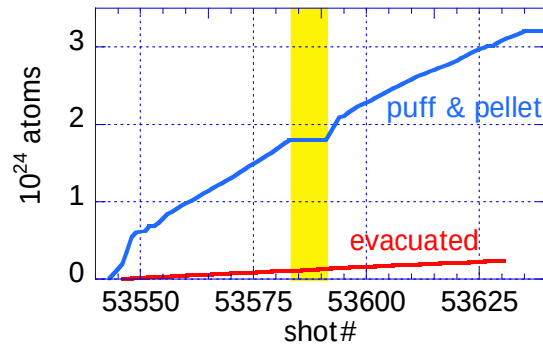


図3. 6. 2-13 ある実験日において、ガスパフとペレットにより供給された粒子数と、真空排気設備により排気された粒子数。

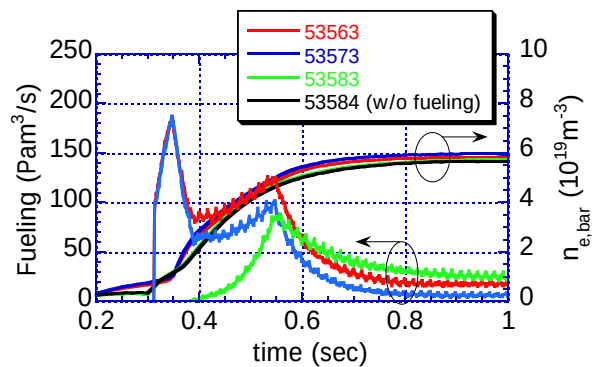


図3. 6. 2-14 $6 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ に到達するのに必要なガスパフ量の変化。

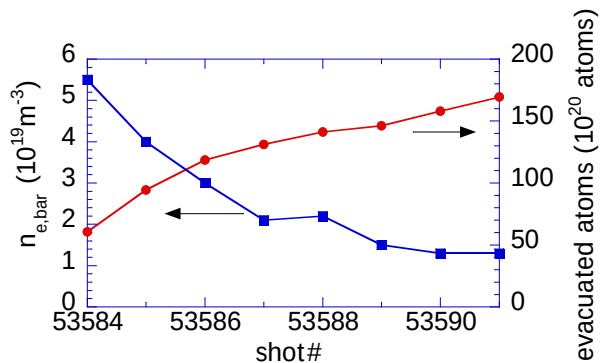


図3. 6. 2-15 連続した、ガスパフ無し放電における到達密度と排気された粒子数。

度は低下し、最終的には $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度で一定になっており、密度の制御性は回復している。これらの放電で排気された粒子数は 10^{22}atoms のオーダーであり、これは1回のガスパフ放電で壁に吸蔵される粒子数と同程度である。図 3. 6. 2-14 と 15 から、これらの放電までに壁に吸蔵されている粒子数 10^{24}atoms のオーダーの 1% を排気することで密度制御性が回復したことになる。またこれらの結果は、壁は飽和はしないが、壁ポンプの容量は放電を重ねることにより低下することを示している。

3. 6. 2. 4 ローカルアイランドダイバータ配位実験からの知見

ローカルアイランドダイバータ (LID) 配位実験は、粒子排気が主プラズマ閉じ込め性能にどのように影響を及ぼすかを調べるために行っている。図 3. 6. 2-16 に LID 配位の概要を示す。外部擾乱磁場を印加し、閉じた磁気面周辺部に $m/n=1/1$ の磁気島を形成する。磁気島幅が最大となる横長断面位置に、トラス外側ポートから、ダイバータ板 (ダイバータヘッド) と排気ダクト (baffle) から成る閉ダイバータモジュールを磁気島内に挿入する。閉ダイバータモジュールの後方には強力な排気装置が備えられている。この配位では、最外殻磁気面は磁気島の内側セパトリクスで規定され、外側セパトリクスはダイバータレグとなる。主プラズマから漏れ出すプラズマは、磁気島の磁力線に導かれてダイバータヘッドへ流入する。外側セパトリクスとダイバータヘッドが接続する位置を、排気ダクトの内側に置くことにより、ダイバータヘッド上で中性化したリサイクリング粒子を効率的に排気することが可能である。実際この配位では、排気粒子数は供給粒子数の 80% 以上に達している。図 3. 6.

2-17 に、LID 配位で見出された、内部拡散障壁 (Internal Diffusion Barrier, IDB) を備えた密度分

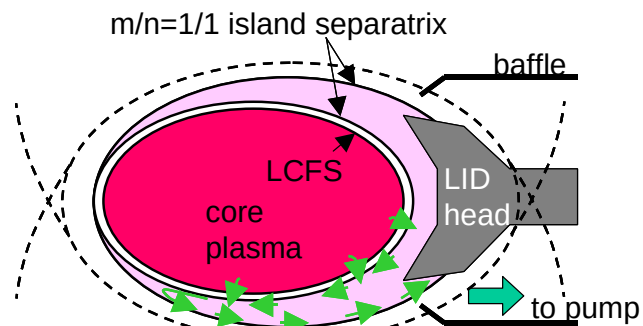


図3. 6. 2-16 ローカルアイランドダイバータ(LID)配位の概要

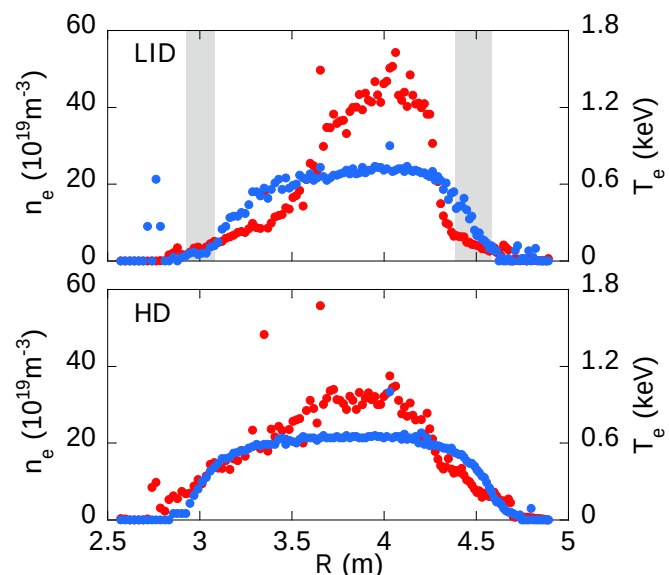


図3. 6. 2-17 LID及びヘリカルダイバータ配位において、ペレット入射による燃料供給放電で得られた電子密度(赤)・電子温度(青)分布。(上)LID配位で得られた内部拡散障壁を備えた密度分布。(下)ヘリカルダイバータ配位で高密度放電を繰り返している最中の分布。 $R_{ax}=3.75\text{m}$ 。

布を示す。中心密度は $4 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ を超えて、非常に高くなっていること、中心部で急な密度勾配が形成されていること、シャフラノフシフトにより、密度・温度分布のピーク位置が真空磁気軸位置 ($R=3.75\text{m}$) から大きく外側へずれていること、が分かる。一方、同図下図に示すように、高密度放電を繰り返し行っている場合、ヘリカルダイバータ配位放電時の分布には急な密度勾配は見られない。このことから、IDB形成にはリサイクリングの制御が必要である可能性が示されている。

LID配位は粒子制御性能に優れるが、ダイバータヘッドの受熱面積が極めて小さく、高性能のプラズマを長時間維持することは難しい。そこで、ヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化を計画している。

3. 6. 2. 5 ヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化検討

3. 6. 2. 3 節で示したように、ヘリカルダイバータ配位におけるダイバータプラズマ特性についての理解は進んでいる。これを踏まえて、主プラズマの閉じ込め性能を向上する計画の1つとしてヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化を計画している。

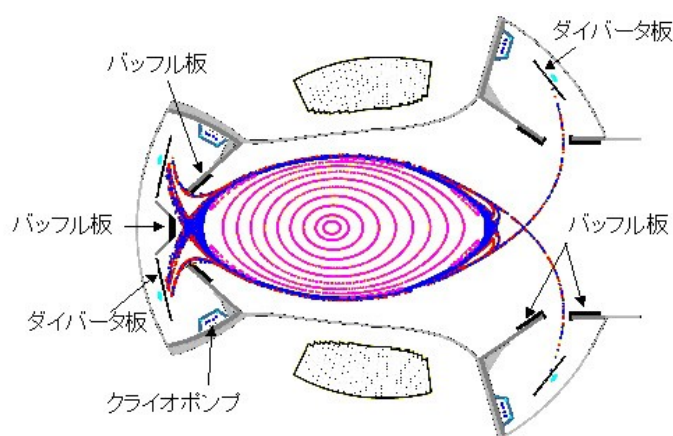


図3. 6. 2-18 ヘリカルダイバータの1つの閉構造化案

バップル構造の設置によりダイバータ室を形成し、ダイバータでリサイクリングした粒子がダイバータ部から流出することを防ぐ。すなわち閉構造化である。図3. 6. 2-18に閉構造ヘリカルダイバータの概要図を示す。これにより、ダイバータ部の中性粒子圧を上昇し、ダイバータ排気系の設置およびペレット入射による燃料粒子の中心供給と組み合わせることにより、効率的なリサイクリング及び不純物制御が可能となる。リサイクリング粒子をダイバータ部に閉じ込めることにより、プラズマ周辺部の中性粒子圧を減じることができる。これにより、LID配位で得られているIDB形成を伴う超高密度プラズマを、ヘリカルダイバータ配位で再現性よく得ることができる。また、ダイバータ部の中性粒子圧力が上がることで、ダイバータデタッチメントを安定維持することができる可能性がある。

効率的な閉構造化を行うため、中性粒子輸送コードEIRENEを用いた計算を行っている。磁気軸位置3.60 mの磁場配位を基準としている。この磁場配位では、ダイバータへの熱・粒子負荷はトーラス内側で大きいことが、図3. 6. 2-5及び10で示されている。したがってリサイクリングで発生する中性粒子もトーラス内側で高い密度をもつと考えられる。そこで、トーラス内側領域にバップル板、ドーム構造、ダイバータタイルを設置し、その形状・場所等を変化させた場合の中性水素分子密度分布をEIRENEコード

によって計算した。その結果を図3. 6. 2-19に示す。閉ダイバータ構造を最適化することによって、トーラス内側領域の中性粒子圧力を、図3. 6. 2-12で示した現状の開ダイバータ配位における中性粒子圧力と比較して約20倍上昇させることが可能であることが分かった。図3. 6. 2-20に最適化された閉ダイバータ構造の3次元モデルを示す。なお、図中のいくつかの黒い点は最外殻磁気面から追跡された磁力線のダイバータタイル上でのストライク点分布を示している($R_{ax}=3.60m$ の場合)。

閉ダイバータ領域の中性水素分子密度の絶対値を中性粒子輸送コードによって定量的に求めるためには、周辺プラズマと中性粒子との相互作用を考慮した解析を行って、ダイバータタイル等から放出される各種中性粒子の量と分布を定めなければならない。完全3次元体系でのこれらの相互作用を考慮した解析は現在の計算機の処理速度では事実上困難であるので、下記の条件を仮定することにより解析を行った。つまり、エルゴディック領域から内側の主プラズマ領域の各プラズマパラメーターの分布および、Xポイント付近でダイバータレッグに沿って主プラズマから流れ出るプラズマの流速と分布はEMC3-EIRENEコードによって求められた計算結果で常に一定であると仮定し、エルゴディック領域よりも外側(ダイバータレッグ部)においてはダイバータタイル等から放出される中性粒子との相互作用を考慮して各プラズマパラメーターの分布を計算した。ここでは、レッグ上のプラズマを流体として近似し、磁力線に沿った1次元座標系でプラズマの密度、運動量、エネルギーの3つの微分方程式を、ルンゲクッタ法を用いて解いている。

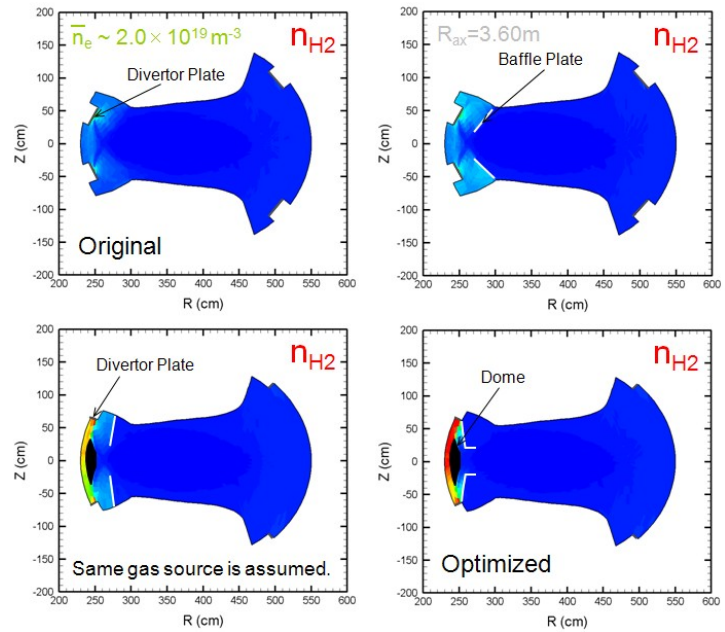


図3. 6. 2-19 開ダイバータ配位(左上)および、様々な閉ダイバータ配位におけるプラズマ周辺部の中性水素分子密度の(EIRENEコードによる計算結果)

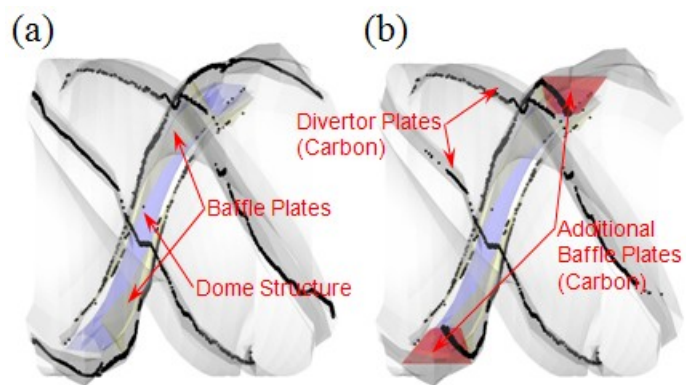


図3. 6. 2-20 (a)最適化された開ダイバータ配位および、(b)更に遮蔽板を追加した場合における3次元モデルとストライク点分布

このような手法によって求められた現状の開ダイバータ配位および、閉ダイバータ配位時のプラズマ周辺部の中性水素分子の密度分布の計算結果をそれぞれ図3. 6. 2-21 (a)と(b)に示す。トーラス内側部での中性水素分子密度が 1mPa のオーダーである一方で、閉ダイバータ配位においては中性水素分子密度が約 20mPa にまで上昇することが示されている。

プラズマ周辺部の効率的な粒子排気・制御のためには更なる中性水素分子密度の増加が必要であると考えられるため、トーラス内側の閉ダイバータ構造の両端部(上下ポート付近)に新たに遮蔽板を追加した。この遮蔽板の目的は、トーラス内側に閉じ込められた中性粒子がトーラス上下方向に流出するのを防ぐとともに、主プラズマからダイバータレッグに沿って流れ出てきたプラズマ粒子を遮蔽板に積極的に衝突させてストライク点分布をトーラス内側に集中させることにより、更なる中性水素分子密度の増加を図ることである。この遮蔽板を設置した場合の3次元モデルを図3. 6. 2-20 (b)に示すが、多数のストライク点が遮蔽板上に存在していることが分かる。全てのストライク点の数と、遮蔽板に衝突するストライク点の数の比を、磁気軸 R_{ax} が 3.50~3.90m の範囲の磁場配位で調査したところ、LHDで最も高いパフォーマンスのプラズマが得られている $R_{ax}=3.60m$ においてその比率が最大(>0.6)となることが分かった。このことから、遮蔽板はこの磁場配位で最大限に機能すると期待される。遮蔽板がある場合におけるプラズマ周辺部の中性水素分子の

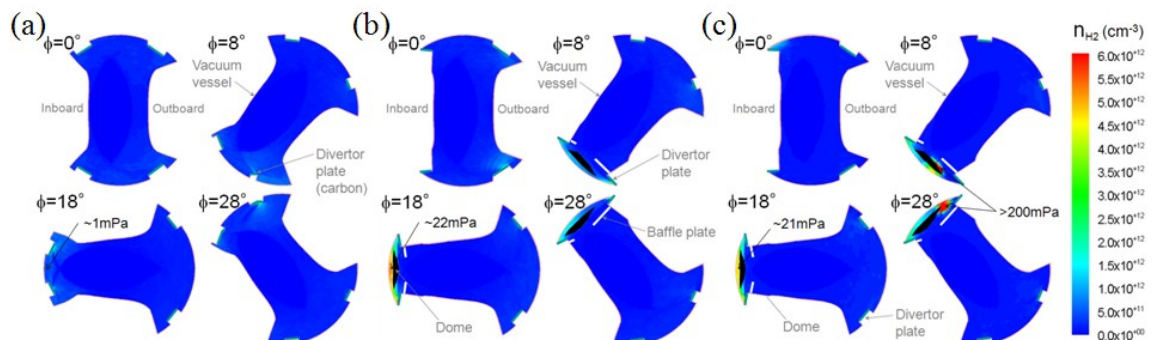


図3. 6. 2-21 (a)従来の開ダイバータ配位、(b)最適化された閉ダイバータ配位、(c)更に遮蔽板を追加した場合における中性粒子輸送コードによって求められた各トロイダル断面での中性水素分子の密度分布の計算結果($R_{ax}=3.60m$)

密度分布の計算結果を図3. 6. 2-21 (c)に示す。トーラス内側部における中性水素分子密度は約 20mPa となっており、顕著な密度の増加は期待できないが、遮蔽板が設置されている近傍の中性水素分子密度は200mPa以上に達している。このことからトーラス内側部のみならず、遮蔽板の近くに位置するドーム構造の内部にも更に排気装置を設置することによって、効率的な粒子排気を実現できる可能性がある。

ダイバータ排気系は、排気速度の観点からは、ダイバータ室内にクライオパネルあるいはクライオパイプ型のポンプを設置することが望ましい。この場合、液体ヘリウムの流路は上下ポートを通して設置する。クライオポンプの設置位置は、トーラス部、あるいはヘリカルコイル容器側板部(2箇所)について検討している。いずれの場合も、例えばトーラス内側のみにポンプを設置した場合、長手方向に約 4 m のクライオ

パネルあるいはパイプを設置することになる。クライオポンプはシェブロン及び 80K シールドで放射熱から遮蔽する。ダイバータ排気系に必要な排気速度について、単位時間当たりペレットで供給する粒子数を基準として考えてみる。定常運転が可能な現有の連続入射ペレット (10 Hz、ペレット 1 個当たり 1×10^{21} atoms) では、 1×10^{22} atoms/s が単位時間当たりの入射粒子数であり、したがって必要な排気粒子束としては約 $20 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。ダイバータ室内の中性粒子圧力を 10^{-1} Pa のオーダーまで上げることができれば、排気系の必要排気速度は $100 \text{ m}^3/\text{s}$ のオーダーになり、これはクライオポンプとしては達成し得る値である。しかしながら、実際の設置及び運用を考えると、クライオポンプの使用には多くの困難が考えられる。そこで、例えばサエスゲッターポンプのような非蒸着型のゲッターポンプ、あるいは核融合科学研究所で開発が進められたメンブレンポンプの適用も検討している。

3. 6. 2. 1 節で述べたように、高性能定常プラズマ保持実験時に熱負荷が高い部位では、現在設置しているダイバータ板の熱特性が劣化する可能性がある。そこでダイバータ板構造を、より高熱負荷に耐え得る構造に交換する。これを高性能化という。黒鉛-銅のロウ付け材を用いることが理想的である。ITER のダイバータ板開発などで、LHD 設計時に比べて技術的には進んでいるが、高コストが問題ではある。また、ボルトを用いた機械接合タイプでも、最近核融合科学研究所で開発した新型機械接合型ダイバータ板構造 (図 3. 6. 2-22) は、図 3. 6. 2-8 に示すように (図中、"new module") 現在のダイバータ板構造に比べて熱除去性能は大きく向上している。現在のダイバータ板の場合、ダイバータ板からヒートシンクへの熱流束は主として、これらを接合するボルトを通して流れていたが、新型機械接合型ダイバータ板構造ではダイバータ板とヒートシンクが等方性黒鉛で一体構造となっているため、図 3.

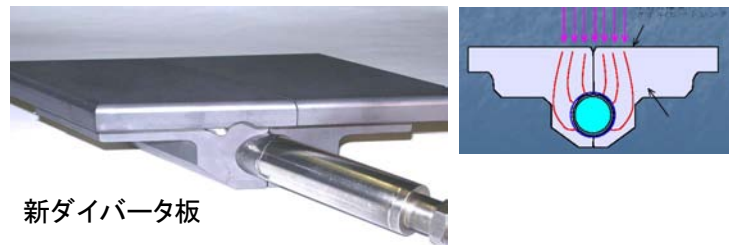


図3. 6. 2-22 新型機械接合型ダイバータ板構造。(右)冷却配管への熱の流れの模式図。

6. 2-22 右図に示すようにダイバータ表面から冷却管までの熱流路長が短く、熱抵抗が小さいと考えられる。

さらに新型機械接合型ダイバータ板構造では、これまでプラズマ対向部に露出していた金属製ボルトがなくなるため、金属不純物発生抑制という観点からも有利である。ダイバータ板構造の交換・改造としては、ロウ付け型あるいは新型機械接合型ダイバータ板構造を用いることにより、より加熱入力の高い長時間放電実験に対応することができる。

3) ポロイダル磁場実時間制御

(1) ポロイダルコイル電流動的制御の目的

大型ヘリカル実験装置では、定常磁場でのプラズマ実験を主目的とするため、磁場発生用超伝導コイルの励磁電源としては低電圧の直流電源(定常電源)を採用している。この電源により長時間プラズマ運転では、電源の出力電圧の許容する範囲内でプラズマ点火中に磁気軸の掃引を行い、ダイバータへの入熱の分散を実現してきた[3. 6. 2-1]。さらに、プラズマ実験の進展に伴い、高エネルギープラズマにより生じる磁気軸移動をポロイダルコイル電流を動的に制御し、外部磁場により補正すれば、更なるプラズマ特性の改善が可能であると考えられている。

この運転には現状の定常電源ではコイル印加電圧が不足のため、新たに高電圧の電源を併設し、電流の掃引速度を向上する必要がある。

(2) ポロイダルコイル電流動的制御のための電源の増設計画

LHD の超伝導コイル群は磁気軸の位置のみでなく、磁気面の断面形状も制御可能となるように設計製作している。ここで、全てのパラメータに対して動的制御を可能にするよう増力を行うためには、6電源同時にパルス電源を増設する必要がある。しかし、磁気軸掃引に限定すれば、6コイル群のうちヘリカルコイルおよび OV コイルの電圧は比較的低く済むため、IS および IV コイル用の 2 電源の増力で済む。

そこで、第一期増力として、1.5T までの磁気軸掃引に対応できる電源の増設を検討した。

第一期の設計条件として、

- ・磁気軸 3.6m、1.5T の通電が可能であること。
 - ・磁気軸の掃引速度を 10cm/2 秒程度とすること。
 - ・1T において、定常電源設計時に想定した範囲の通電に対応できること。
- とした。

コイル電源の検討を行った結果、図3. 6. 3-1のようにパルス電源を製作し、動的制御時に空圧駆動スイッチにより電源回路に直列に投入する構成とした。運転の概要を図3. 6. 3-2に示す。この設計により、パルス電源電源本体は空冷とすることが可能となった。表3. 6. 3-1に各電源の仕様を示す。

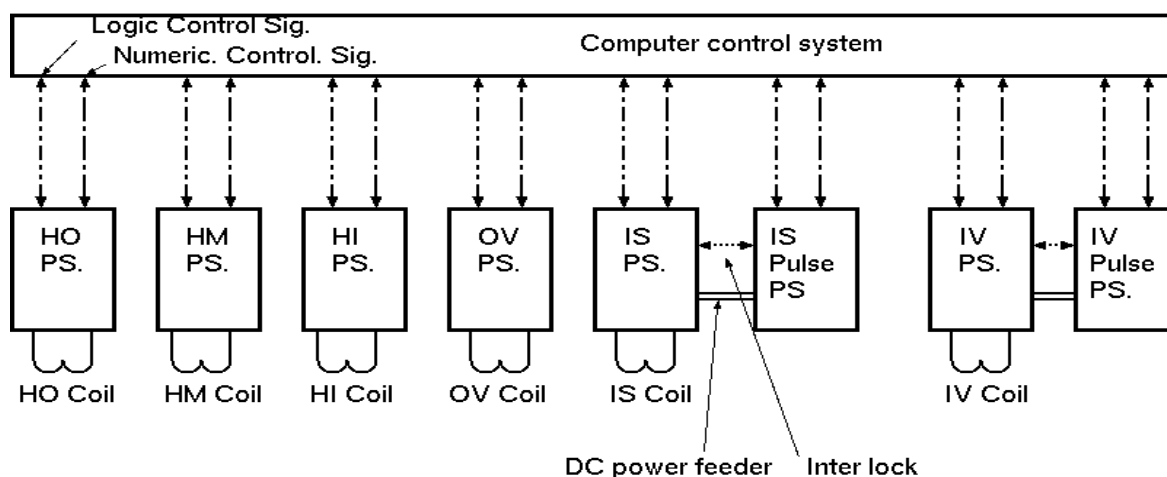


図3. 6. 3-1 LHD 超伝導コイル電源の増力

パルス電源と定常電源を併用して運転するとき中心磁場1T において実現可能な磁気軸中心の掃引時間を表3. 6. 2-2に示す。表において、右上三角部分は磁気軸での磁束密度を一定に保つ場合、左下三角部分はヘリカルコイル電流を一定に保つ場合、カッコ内は総員時間を制限しているコイル電源の名称である。例えば、ヘリカルコイル電流を一定に保つ場合の磁気軸 3.5 m から 3.6 m への遷移時間は 2.9 s であることを示している。

表3. 6. 2- 1 定常電源およびパルス電源の仕様

	HO, HM, HI 定常電源	OV 定常電源	IS 定常電源	IV 定常電源	IS パルス電源	IV パルス電源
電圧	45 V	33V	33V	33V	180V	180V
電流	17 kA	14kA	16kA	15.6kA	6.2kA	6.2kA
運転時間	連続	連続	連続	連続	1 0 秒	1 0 秒

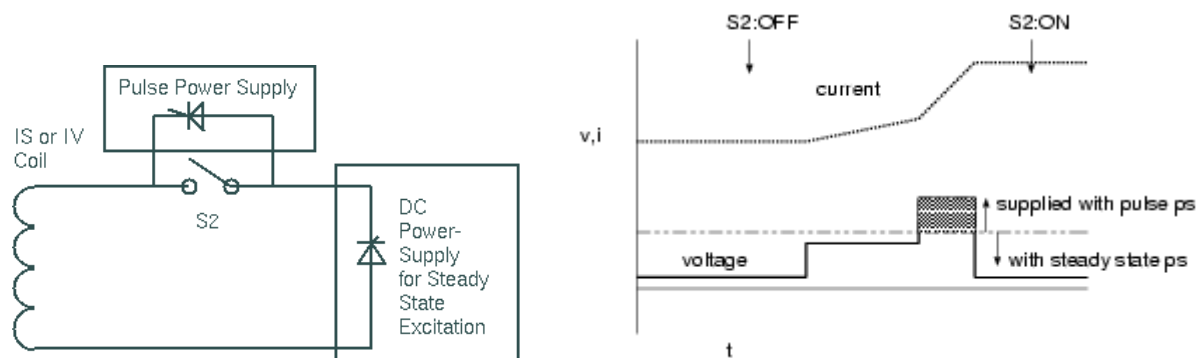


図3. 6. 3-2 パルス電源の増設と併用運転

表3. 6. 3-2 中心磁場1Tにおいて実現可能な磁気軸掃引時間(単位:秒)

Magnetic axis						
	3.45m	3.5m	3.6m	3.7m	3.8m	3.9m
3.45m	-	3.3(HI)	8.3(HI)	12.07(HI)	15.3(HI)	18.9(HI)
3.5m	1.4(IV)	--	5.0(HI)	8.8(HI)	12.0(HI)	15.6(HI)
3.6m	3.6(HM)	2.9(HM)	--	3.8(HI)	7.0(HI)	10.6(HI)
3.7m	7.4(HM)	6.7(HM)	3.8(HM)	--	3.2(HI)	6.8(HI)
3.8m	11.6(HM)	10.9(HM)	8.0(HM)	4.2(HM)	--	3.6(HI)
3.9m	15.3(HM)	14.5(HM)	11.6(HM)	7.8(HM)	3.6(HM)	--

(3) 動的制御における超伝導コイルシステムの冷却

磁気軸遷移やプラズマ断面変形のためにコイル電流値を変化させると、超伝導コイル内および支持構造物に交流損失が発生して、温度上昇やヘリウム蒸発量の増加を引き起こす。1-1.5 T の低磁場運転においては冷却安定性の低下を心配する必要はないが、将来の高磁場における動的制御に備えて、パルス運転時の発熱を評価する予定である。

参考文献

1. S.Sudo, et., al., "Control, data acquisition and remote participation for steady-state operation in LHD", Fusion Engineering and Design, (2006) 05 vol.81 no. pp.1713-1721

4. 支援研究（CHS実験）

LHD実験に対する支援研究として、CHS実験は、小型装置としての小回りの良さと、二台の重イオン・ビーム・プローブなどの先進的な計測装置を活かして、高温プラズマ閉じ込めに関わる現象の物理的な理解を得ることに重点を置いた研究を行ってきた。また閉じ込め改善の研究においても、プラズマ加熱入力に絶対値こそLHDと比較して小さいが、プラズマの単位体積あるいは単位表面積当たりの加熱入力が大きいために、Hモードなどの改善閉じ込め現象の研究には有利であり、常に新しい閉じ込め改善現象の発見を目指したテーマを中心に置いて研究を進めてきた。また装置サイズに比較して大きなNBI加熱入力は、アルヴェン固有モードなどの高速イオン励起のMHDモードの研究にも好都合である。平成16年度以降の研究成果として、特に重イオン・ビーム・プローブ(HIBP)計測による乱流と帯状流との相互作用の観測と、高速イオンとMHD不安定性との相互作用、ヘリカル系閉じ込めにおけるHモードの研究に話題を絞って実験結果成果を報告する。

4. 1 イオン・ビーム・プローブ計測による乱流と帯状流の研究

CHSでは、2台の重イオン・ビーム・プローブ(Heavy Ion Beam Probe: HIBP)による測定から多くの物理的課題に対する研究成果を挙げている。特に近年では、帯状流の存在が世界に先駆けて検証され、トーラスプラズマの異常輸送を、従来のドリフト波乱流から捉える枠組みから、ドリフト波と帯状流からなる系として考える新しい枠組みへと移行を促す実験として世界的に注目されている。その後、従来より指摘されてきたHIBPの磁場揺動の潜在的観測能力の開発が進められ、実際にトロイダルプラズマには帯状流のみならず帯状磁場が存在していることが観測された。また、帯状流の実証以後、乱流と帯状流との相互作用の確認が課題として残されていたが、この課題についても多大な進展が見られた。

CHSのHIBP測定の概念図について図4. 1-1に示す。図に示すように1/4 トーラス(90度)離れた場所に2台のHIBPを設置し揺動の局所的かつ大域的構造を探求することを目的として実験を行ってきた。各々のHIBPではビームのエネルギー変化から空間電位、ビーム軌道の変化からベクトルポテンシャルが測定できる。それぞれのHIBPは3点の測定点の空間電位を同時観測可能であり、並んだ二点の空間電位およびベクトルポテンシャルの差からその場所での電場と磁場の値が得られる。

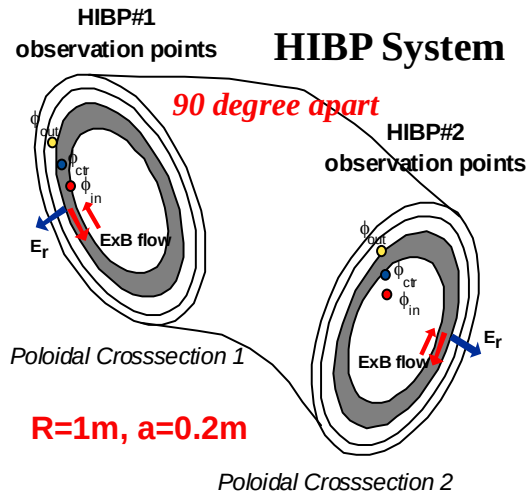


図4. 1-1 二台の HIBP 測定器の配置

次に、乱流と帯状流との非線形相互作用についての進展について述べる。乱流と帯状流の間には擬似的なエネルギー保存則が成立する。輸送に寄与しない帯状流に乱流のエネルギーが流れることで系の閉じ込めは良くなると考えられるため、その相互作用について実験的に観測することは理論の基礎を与える意味で極めて重要である。実際に、実験的にウェーブレット解析を用い、帯状流と乱流の関係を調べてみると、乱流成分と帯状流成分との間に負の相関が見つかり擬似的なエネルギー保存則が示された。また、乱流のパワーが帯状流の位相によってモジュレーションを受けていることが確認された。この関係を更に定量的に分析するためにウェーブレットバイコヒーレンス法を用いた解析を行った。その結果を図4. 1-2に示す。ここでバイコヒーレンス解析とは、三波結合の強さを定量化する解析法である。ここでは、乱流成分が帯状流の位相により影響を受けることから、時間分解能をもつウェーブレットバイコヒーレンス解析を行い帯状流の位相によって背景乱流と帯状流の結合の変化を調べている。2つの波の周波数が決まれば3波の周波数間には $f_1+f_2=f_3$ の結合条件をみたす必要があるため、3つ目の波の周波数は自動的に決定される。図では、2つの波の周波数が縦軸・横軸に示され自動的に決定される3つ目の波との結合の強さが色で示されている。帯状流の大きさがゼロ付近にあるとき結合は小さく、一方帯状流がバルクの流れに対して正方向の場合図(a)と負方向図(c)の場合で背景乱流と帯状流(~ 0.5 kHz)の結合が強くなっている(すなわち $f_1+f_2=\pm 0.5$ kHz の線上でバイコヒーレンスの値が大きい)ことがわかる。よって乱流と帯状流の、帯状流の位相に依存した間欠的な結合が実証された。また、帯状流がバルクの流れと反対方向にあるとき、乱流成分同士の結合が強まり、乱流同士の結合も帯状流の位相によって変化することも示されている。

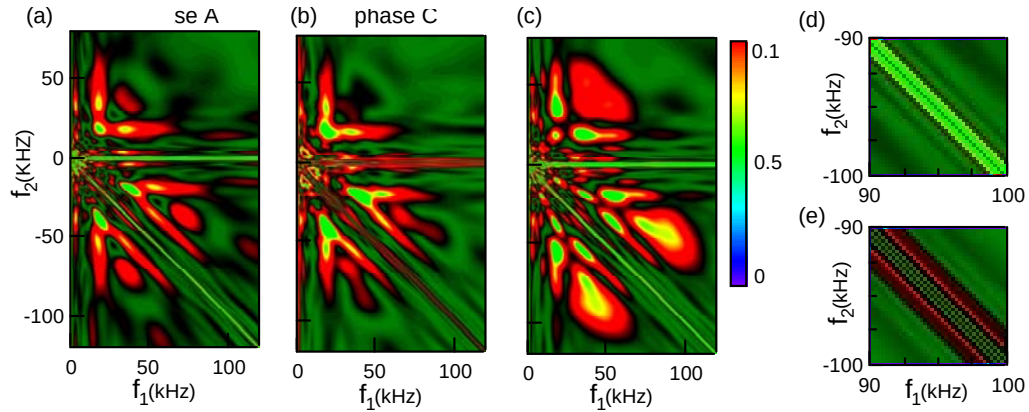


図4. 1-2 帯状流の位相を条件として計算されたバイコヒーレンスのグラフ. (a)帯状流がバルクの流れに対して正方向の場合、(b)帯状流の大きさがゼロ付近にあるとき結合、(c)帯状流がバルクの流れに対して負方向、(d)帯状流がバルクの流れに対して正方向の場合の拡大図、(e)帯状流の大きさがゼロ付近にあるときの拡大図

次に帯状磁場の発見について報告する。磁場閉じ込めプラズマ中では流れは $E \times B$ を通じて電場と結びついている。そのため実際に帯状流は帯状電場といってもよく、電場のみならず帯状磁場が乱流から生成される可能性が指摘されている。電子サイクロトロン加熱によって生成された密度 $5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、電子温度 1.5 keV、イオン温度 0.1 keV のプラズマに対して、帯状磁場の検出を目指して磁場揺動の計測が行われた。図 4. 1-3 (a) に、得られた磁場のスペクトルを示す。また同図には、おおよそ 1kHz より低い周波数の領域の磁場揺動は 1/4 トーラス離れても非常に高い相関を示すことが示されている。図 4. 1-3 (b) に示すように、磁場揺動は測定点が同一磁気面上にある場合ほとんどトレースが重なっており、この磁場揺動が磁気軸周りに対称であることを示し、また近接する磁気面上にある場合コヒーレントではあるが位相が異なることから、有限の径方向波長を持つことを示している。

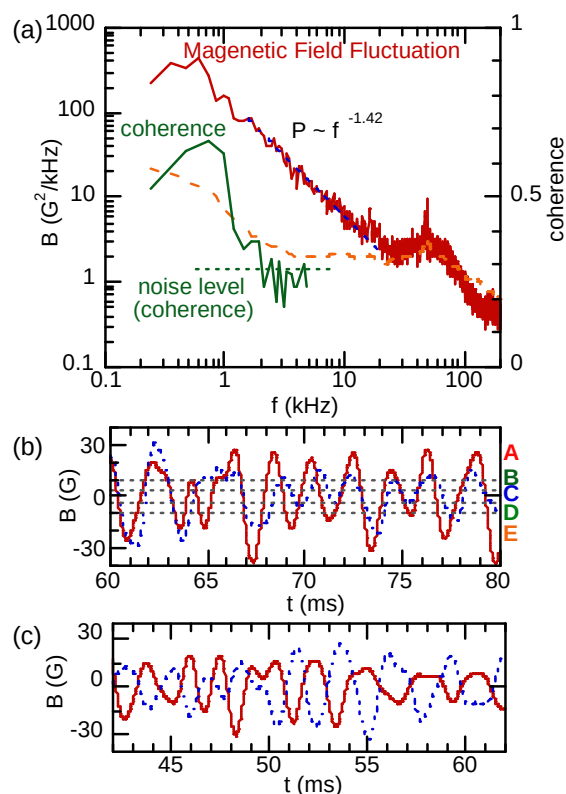


図4. 1-3 (a)磁場揺動のスペクトルとトロイダル方向に 90 度はなれた位置での磁場揺動の相関、(b)同一磁気面にある場合の磁場揺動、(c)1cm 程度離れた磁気面上での磁場揺動

帯状流の構造の同定と同様に、相関関数を作ることにより帯状磁場の時空間構造を詳細に調べることが可能である。図4. 1-4に一台の HIBP の測定点を固定し、もう一台の HIBP で測定するプラズマ半径位置を変えながら磁場揺動の位相の構造を測定した結果を示す。まさに帯状（層状）の構造を持っていることが明確に示されている。位相の変化する特徴的な長さ、すなわち径方向波長は約 1.5cm、帯状磁場の相関時間、すなわち寿命は 2ms 程度であることがわかる。

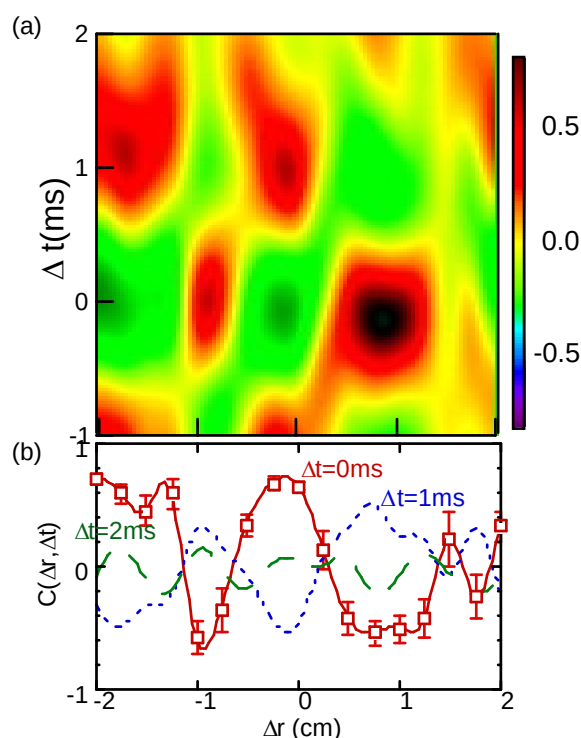


図4. 1-4 帯状磁場の時空間構造。(a) $r=12$ cm の位置で計測された径方向相関関数, $C(\Delta r, \Delta t)$ 。(b) 遅延時間を固定した場合の相関関数。 $\Delta t=0,1,2$ ms の三つの場合について示す

また、帯状流と背景乱流との結合を調べたのと同様に、ウェーブレットバイコヒーレンス法を用いて帯状磁場と背景乱流との結合について調べたところ、帯状磁場の位相に依存した帯状磁場と背景乱流の結合が検証された。よって乱流によって磁気軸周りに対称な大域的磁場が生成されていることが実験的に示された。地磁気形成などで知られるダイナモ現象を説明する仮説として乱流による磁場生成が有力であることは周知の事実であるが、ここで得られた帯状流の発見は、実際に乱流場、構造をもつ磁場を生成することが可能であるということを実験的に示した最初の例として位置づけることができる。

4. 2 高速イオン励起 MHD 不安定性と高速イオンの相互作用に関する研究

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける、アルヴェン固有モードに代表される高速イオン励起 MHD 不安定性と高速イオンの相互作用に関する研究は、将来の核燃焼プラズマにおける MHD 不安定性による D-T 反応生成アルファ粒子の異常損失の危惧から、近年重要な研究対象となっている。CHS では、高速イオン駆動 MHD 不安定性が高速イオン輸送に与える影響、並びにその結果として生ずる高速イオン損失について調べる実験を行ったので報告する。

図 4. 2-1 に、中性粒子ビーム(NB)を接線方向に co-入射した際に観測される典型的な磁気揺動の時間変化を示す。この MHD バーストは、ビームイオンの圧力がプラズマの圧力と同じ程度になる低密度条件下で現れる。このバースト現象は、CHS 実験の

比較的初期の段階から観測されており、当初は交換型不安定性との関連を中心に議論されたが、その後の研究の進展から NB 入射高速イオンに関連した現象であることが分かってきた。磁気プローブアレイ信号の解析から、このモードはイオン反磁性方向に伝搬していることが分かった。揺動周波数は、トロイダルアルヴェン固有モード (TAE) ギャップ周波数 ($f_{TAE} = V_A/4\pi R q^*$, $q^* = (2m+1)/2n$) よりも低く、アルヴェン共鳴により連続減衰を強く受けると考えられる周波数帯にある。また個々の MHD バーストは、非常に速い周波数の下方掃引を伴っており、これらの特徴から図に示した磁気揺動は、高速粒子モード (EPM) と考えてよい。因みにトカマクにおいて有名な、 $q=1$ 近傍の弱磁場側に深く捕捉された高速イオンの歳差ドリフト運動により励起されるフィッシュボーン不安定性は、現在 EPM に分類される。

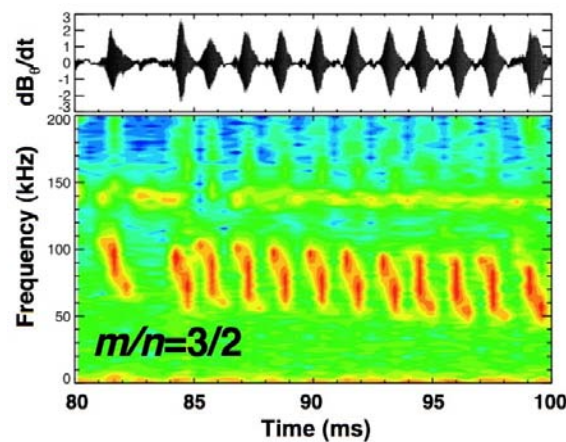


図4. 2-1 接線方向に NB を co-入射した際に観られる磁気揺動

EPM の励起に伴い、NB 入射高速イオンの異常輸送が観測された。図4. 2-2に、磁気揺動、co-通過高速イオンに向き合う形に視線を置いた中性粒子分析器にて測定された高速中性粒子束、 $H\alpha$ 光強度、並びに最外殻磁気面外側において損失高速イオンプローブにより検出された損失高速イオン束の時間変化を示す。高速中性粒子束は、磁気揺動の成長、かつ周波数掃引が始まるのとほぼ同時に増大し始める一方で、それに幾分遅れて $H\alpha$ 光強度が、更にやや遅れて損失高速イオン束が増大を始める。この短いながらもそれぞれの測定信号に観られる立ち上がり時刻の差異は、モードによりプラズマ内部にてビームイオンが輸送される様子を反映している。

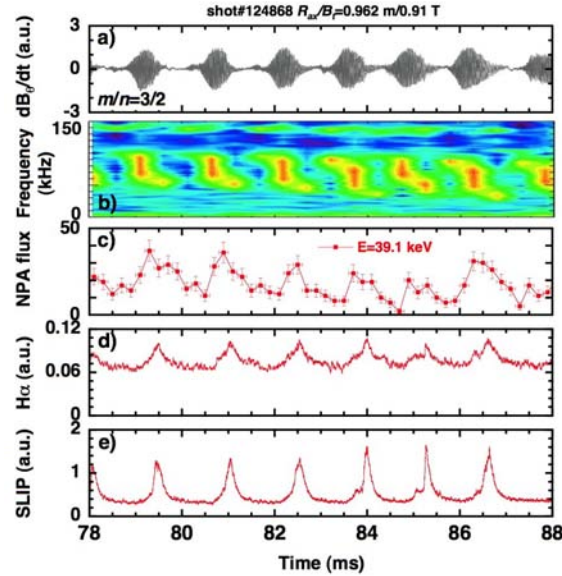


図4. 2-2 EPMによる高速イオン異常輸送。a)磁気揺動、b)スペクトログラム、c)高速中性粒子束(E=39.1 keV)、d) H α 光強度、e)損失高速イオン束

高速中性粒子束は、プラズマ内部における NB 入射高速イオンの情報を包含している。中性粒子密度は、中心部から周辺部に向けて急激に増大するので、高速イオンの径方向への輸送が始まると、そこでの荷電交換反応確率が増し、その結果高速中性粒子束の増大という形になって現れる。H α 光強度の増大は、輸送され周辺部までやってきた高速イオンと残留中性粒子との衝突に起因するものと考えられる。最終的に、高速イオンは最外殻磁気面を横切り損失高速イオンプローブに到達する。図に観られる各測定結果の時間差は、上記により定性的に理解できる。周波数掃引と異常輸送による高速イオン空間分布の変化は密接に関係していることが当該分野のシミュレーション研究により示されており、それと矛盾しない結果である。

また、図4. 2-2はトーラスの大半径方向外側にて観測された結果であるが、大半径方向内側にて測定された H α 光強度、損失高速イオン束には EPM に関連した変化が特に認められず、co-方向の通過軌道を持つ高速イオンが、大半径方向外側に排出されていると判断できる。高速多チャンネル方向性ラングミュアプローブをプラズマ中に挿入し、EPM 励起時の高速イオン束の振る舞いを調べたところ、高速イオンの径方向への輸送速度は、約 600 m/s 程度と見積もられ、一旦磁気揺動による輸送を受けると、1 ms 以下の時間スケールで磁気面を横切りプラズマから逃げてしまうことを示唆している。磁気揺動振幅 δB_θ と損失高速イオン束 $\delta \Gamma_{fast-ion}$ の関係は、磁場配位にもよるが概ね $\delta \Gamma_{fast-ion} \sim (\delta B_\theta)^{2 \sim 3}$ で表され、Heidbrink 等の理論を参照すると、CHS で観られる EPM に誘起された高速イオンの異常損失は、拡散的損失に対応していることが分かった。

4. 3 ヘリカル系閉じ込めにおける H-モードの研究

C H S 実験は、内部輸送障壁の研究で世界のヘリカル系閉じ込め研究をリードしてきた実績を持っているが、平成 16 年度にみつかった境界部輸送障壁 (Edge Transport Barrier: ETB) 生成の現象は、いわゆる H-mode 放電と共通のものであり、閉じ込め改善の研究では基礎的な課題とも言える重要なテーマである。H-mode 放電としては約 10 年程前に C H S 実験の成果として、オーミック電流を用いた回転変換制御を伴った実験により、ヘリカル系閉じ込め研究では最初の H-mode を報告している。新しい ETB 放電はオーミック電流を流すという特殊な運転を必要としないために、加熱入力値の範囲や磁場配位の選択など広い運転領域で実現することが可能となり、輸送障壁生成の物理機構の解明のために有利な環境を与えている。このタイプの ETB 放電は、二台の NBI の入射方向を同一のものとして加熱効率を上げたことと、真空容器壁のコンディショニングの改善によってもたらされたものである。

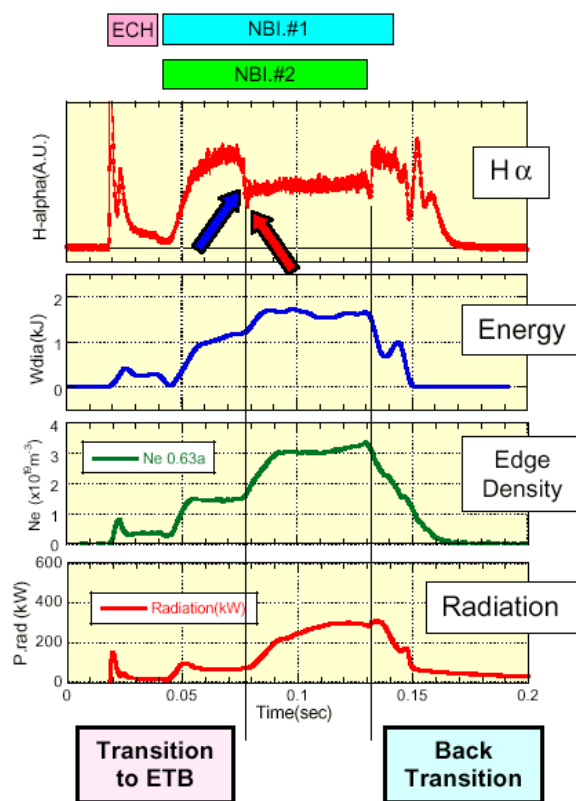


図 4. 3-1 ETB 放電の時間発展

図 4. 3-1 には、典型的な ETB 放電の時間発展を示す。ECH によって生成されたプラズマに NBI を入射して追加加熱した時、密度領域と加熱入力値がある条件を満たした場合に、 $H\alpha$ 信号が急激に減少し、それと同時にプラズマ密度とエネルギーの増加が観測された (H-mode 遷移)。放射損失の量も増加する。また図にあるように、一台

の NBI を早い時間に終了させた場合は、反対に $H\alpha$ 信号が増加してプラズマ・エネルギーが減少する、いわゆる逆遷移 (back transition) も観測されている。このことは ETB 生成に加熱入力値の閾値があることを示唆している。広範な範囲で密度と加熱入力を変化させて ETB 生成の条件を調べたところ、加熱入力の閾値は密度にほぼ比例していることがわかった。またこの閾値は磁場強度にも比例していて、この依存性はトカマクの H-mode の加熱入力閾値と共通である。

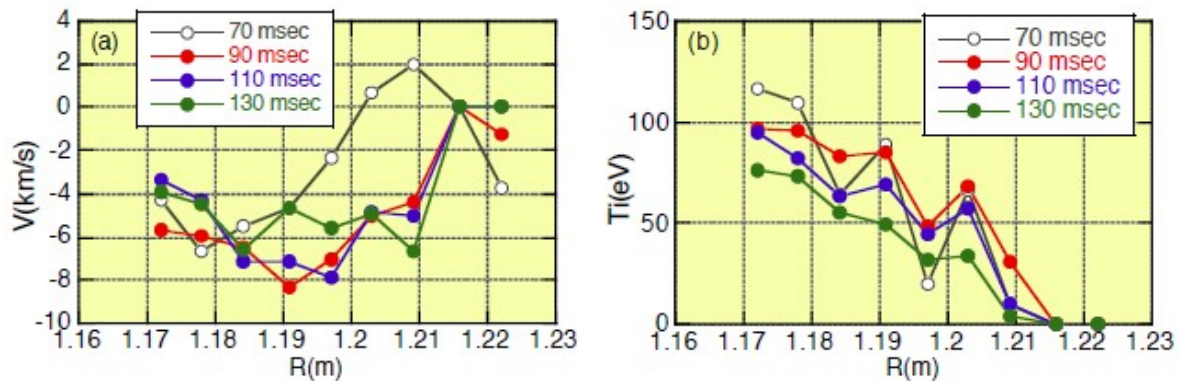


図4. 3-2 荷電交換分光法で測定された (a) プラズマのポロイダル方向の流れの空間分布と (b)イオン温度空間分布

トカマク実験では、H-mode 遷移において電場の勾配が大きく変化することが観測されており、それが原因であるのか結果であるのか、といった議論が今でも盛んに行われている。CHS では実験当初より電場とプラズマの流れについての研究については先進的な成果を出してきているが、H-mode 実験においてもプラズマ周辺部において電場の勾配が急激に変化していることを観測することに成功した。図4. 3-2は荷電交換分光法によって完全電離状態の炭素(C^{6+})のポロイダル方向の流れの速度と温度を測定したものである。左図の縦軸の正値はイオンの反磁性方向である。H-mode 遷移は 80 msec に起こっているが、その直後からポロイダル方向の流れは電子反磁性方向に大きく変化する。図において流れの速度の分布はトーラスの大半径位置に対して示してあるが、最外殻の位置は $R=1.214$ m、規格化半径 0.9 の位置は $R=1.195$ m である。ポロイダル方向の流れが大きく変化するの、最外殻のすぐ内側であることがわかる。炭素イオンの反磁性ドリフトは小さいので、この速度はほぼ電場による $E \times B$ の速度と考えてよく、その電場の値は $E_r \sim 10$ kV/m と見積もられる。この速度はポロイダル・マッハ数を超えており、H-mode 遷移を引き起こすための一つの条件を満たしている。また左図にも明らかであるがプラズマのエッジにおいて急激な電場勾配が生成されており、その値は 2 MV/m² に達する。この電場勾配の値は、速度シアーに基づく乱流輸送の抑制のモデルでは、輸送改善をもたらすのために十分の値であると言える。

CHS 実験は平成 18 年の夏をもって終了したが、その最後のフェイズにおいて高密度放電における H-mode 生成に成功したので、その結果について報告する。このモードは核融合燃焼に有利な高密度 (CHS の実験では $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) で閉じ込め改善を実現

している。実験は良好なリヒートモードが得られる高磁場($B_T=1.85T$)で ETB を形成するために入射 Power の閾値が低くなる磁気軸が $R_{ax}=94.9cm$ の磁場配位において行った。ETB 形成には P/n_e に対して閾値が存在するので入射パワー一定の条件下では、ある密度より大きい領域では ETB が形成されない。そこで放電はガスパフによって密度を一度 ETB が消滅する状態まで高くし、そこから粒子供給を遮断してリヒートモードにプラズマを移行させ再び ETB を形成する方法で行った。図 4. 3-3 に示されるように、 H_α 信号は 45ms において急減し ETB が形成されたことを示すが、密度上昇によって 95ms に再び L-mode に逆遷移する。100ms に粒子供給を遮断すると密度は減少に転じるが蓄積エネルギーは 115ms より上昇し、リヒートモードにプラズマが移行したことがわかる。密度が P/n_e 閾値の値より減少すると、再びプラズマ周辺領域に ETB が形成されることによって(127ms)周辺領域での密度減少が抑制され蓄積エネルギーが ~ 9.4 kJ に上昇した。

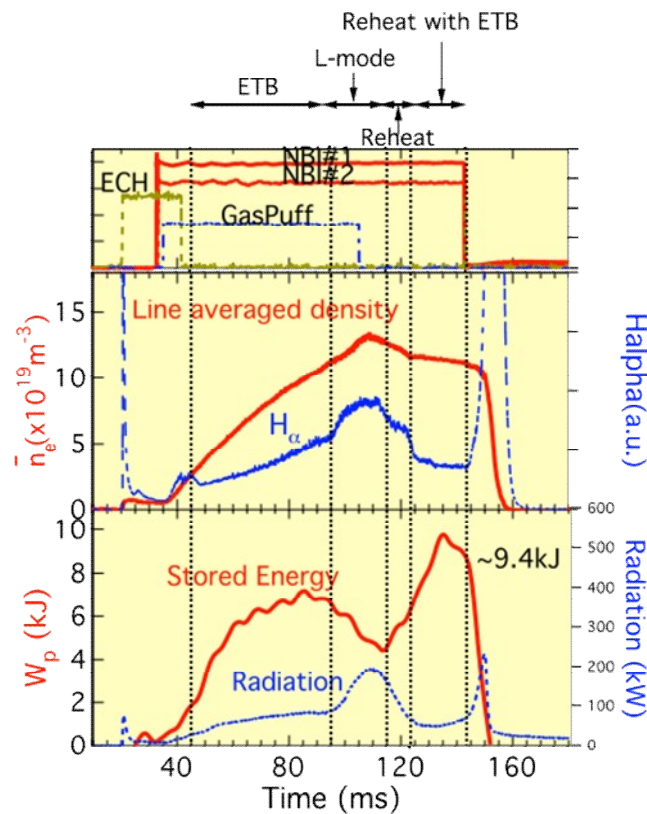


図4. 3-3 高密度 H-mode の放電波形

図 4. 3-4 は、このプラズマの YAG トムソン散乱計測による分布測定結果である。リヒートモードは、プラズマ中への粒子供給を停止することによって起こすことができ、ETB はヒートモード時に、密度が閾値より小さくなったときに遷移すると考えられる。分布は粒子供給停止直後 (100ms)、リヒートモード直前 (110ms)、リヒートモード時 (120ms)、リヒートモード中に ETB が形成された時 (130ms) についてプロットした。まず、図 4. 3-4 (b) から明らかなようにリヒートモードによる効果によって、プラズマの周辺温度が上昇しているが、一方粒子供給を遮断している

ためプラズマ周辺部の密度が減少し、周辺の密度勾配の減少とプラズマ中心部における密度上昇によってプラズマの密度分布がピークする（図4．3-4(a)）。このとき **ETB** が形成されると周辺密度勾配の減少が停止してプラズマの密度分布が維持されるようになる。一方プラズマの周辺温度はリヒートモードによって **ETB** 形成後も上昇し続ける（図4．3-4(b)）。その結果、プラズマの圧力分布に顕著なペデスタル構造が見られるようになる（図4．3-4(c)）。これまでの **ETB** 形成実験ではプラズマ周辺が高密度になるとプラズマ温度が増加しないという問題があり、高い密度領域で良好な閉じ込め改善を達成することができなかった。**ETB** を伴うリヒートモードでは、このようにリヒート単独の場合に比べて周辺密度が高く維持され、**ETB** 単独の場合に比べて周辺温度上昇が大きくプラズマ周辺領域の圧力及びそれに伴う圧力勾配が、より高い状態に到達する。このことはプラズマの輸送が **ETB** やリヒートモード単独の場合に比べて周辺領域で大きく改善されたことを示している。

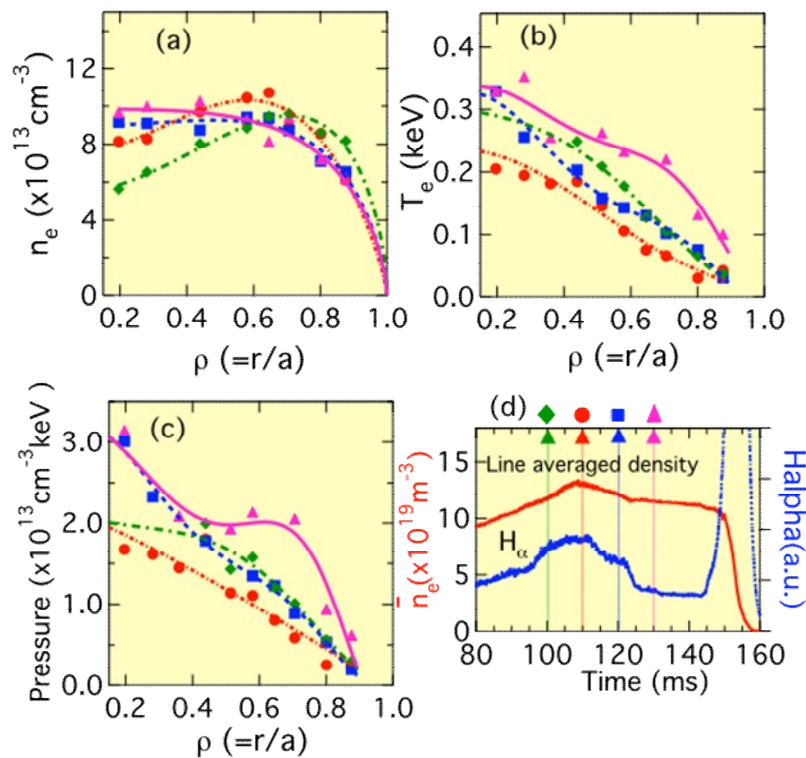


図4. 3-4 高密度 H-mode におけるプラズマ分布の変化

この優れた閉じ込め改善が実現された原因を調べるために密度揺動を YAG レーザ一位相コントラスト干渉計で測定した。結果を図4．3-5に示す。45ms の時間において H_α 信号が減少しているため、最初の **ETB** 遷移がこの時間に起こったことがわかる。遷移後密度上昇につれて H_α 信号も上昇し、同時に閉じ込めも劣化する。このショットでは逆遷移ははっきりしないが、密度上昇によって自然消滅したと考えられる。しかし 115 ms に粒子供給を停止した後プラズマがリヒートモードに移行し、リヒートモード中に 130 ms にて再び **ETB** がプラズマ周辺に形成され、明確な H_α 信

号の再減少が観測されている。このときの揺動の計測結果を図4. 3-5 (c)に示した。揺動はポロイダル方向の成分 k_θ をプラズマ断面の中心コードに沿って積分した量を示している。プラズマの密度揺動は **ETB** 遷移によって最初の H_α 信号の減少の少し前から減少を始めるが、密度上昇にともなって上昇し同時に閉じ込めも劣化する。しかし粒子供給を停止することによって揺動は減少しはじめ、リヒートモードに移行することによって大きく減少する。さらにリヒートモード中に **ETB** が再形成されることによって周辺プラズマの密度揺動が顕著に急減するのが観測された。また **HCN** レーザー散乱計測法や **BES** による周辺領域の密度揺動結果においても **YAG** レーザー位相コントラスト干渉計とほぼ同様の結果が得られている。このことはヘリカルプラズマの従来の輸送改善現象に比べて、リヒートモード中に **ETB** が形成されると周辺領域における異常輸送が低減し、エネルギー輸送が大きく減少したために高い周辺圧力勾配が得られた可能性を示している。その結果、これまで良い閉じ込めを得にくい高密度領域において良好な閉じ込め改善を実現することが可能になったと考えられる。

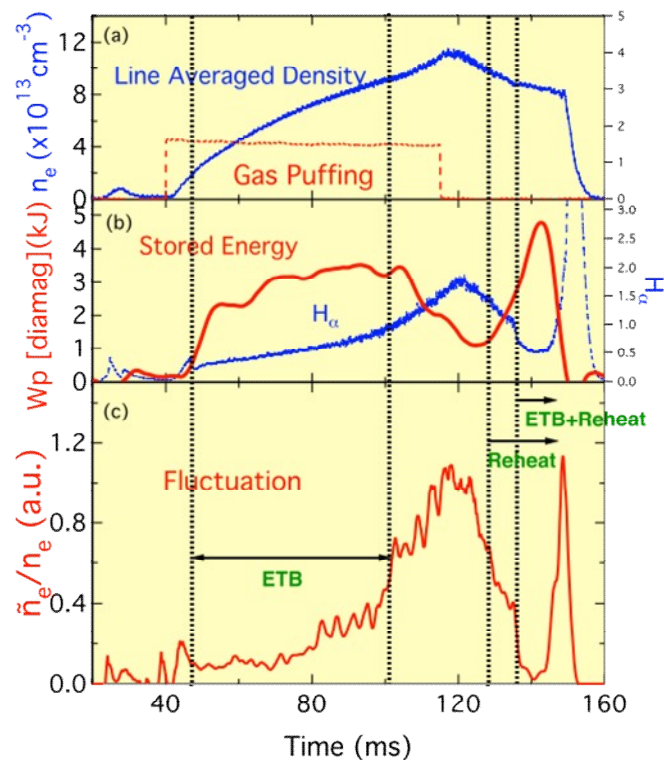


図4. 3-5 高密度 H-mode 放電における密度揺動測定

5. ヘリカル炉設計研究

1) 研究の目的

LHD の建設、運転、実験による物理及び工学成果の蓄積が着実に進展している。これらの豊富なデータベースを積極的に取り入れると共に、全国規模の共同研究として炉心プラズマ及び炉工学の広い分野と連携することによって、ヘリカル型核融合炉の概念設計の構築を目指している。これによって、ヘリカル系装置の特長を最大限に引き出すと共に、各種プラズマ閉じ込め方式に共通な研究課題も含めて、基幹エネルギー総合システムの観点から、各研究分野の課題と展望を明らかにすることを主目的としている。

2) 研究の特徴

炉設計においては基本となる設計指針を定め、これに基づいたバランスの良い設計統合が重要である。当該研究においては、LHD 型の特長であるところの、無電流、定常、造り付けダイバータ、に立脚すると共に、

- ・ 連続ヘリカルコイル巻きピッチ角 (γ) の低減による電磁力低減の長所に着目した設計指針 (フォースフリー・ヘリカル炉: FFHR)、および
- ・ 漏出安全性、MHD 効果抑制、トリチウム回収性に優れた先進液体ブランケットの熔融塩 Flibe ブランケットの採用、

の2点を最大の特徴としている。適切な範囲でのピッチ角 (γ) 低減にはブランケット空間の拡大効果もあるので、これらは全体として矛盾のない設計概念を形成している。この設計指針を基本として、LHD 建設、実験と並行して一貫した概念設計活動を段階的に推進してきている。特に熔融塩ブランケットに関しては、当該研究が国内外の炉工学研究を啓発した経緯は高く評価されており、構造材料、化学制御、伝熱流動、等の要素研究への課題提示と設計評価において先導的役割を果たしている。

3) 平成16～17年度の成果

これまでは炉のサイズ (大半径 R) を可能な限り小さくする方針で設計を進めて来たが、それに伴い、プラズマとコイルの間隔が狭まるヘリカル特有の課題が大きかった。このことは磁場の増強に伴うコイル支持構造の肥大化につながり、炉内機器交換ポートの確保を難しくする。同時に中性子壁負荷増大によるブランケット交換頻度の増加となり、設計統合の観点か

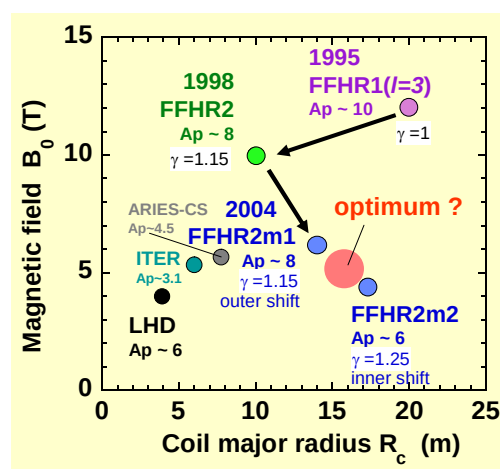
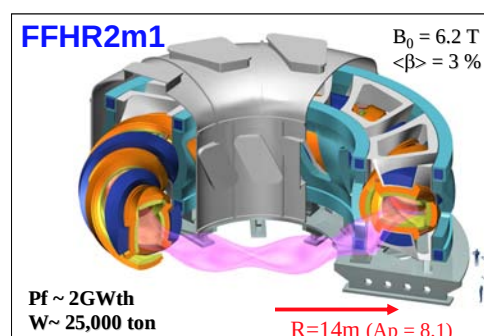


図 5.1-1 FFHR 炉の全体外観と設計の進展マップ

ら大幅に見直す必要があった。

そこで、これまでの FFHR2 の炉サイズを増やし、閉じ込め磁場を下げて、連続コイル巻きピッチ角 (γ) に関して 1.15 と 1.25 の 2 通りの FFHR2m1 (LHD の磁気軸 $R_{ax}=3.9$ m 相当の外寄配位) および FFHR2m2 (LHD の磁気軸 $R_{ax}=3.6$ m 相当の内寄配位) の設計を実施した (図 5.1-1) [1]。

その結果、十分なトリチウム増殖と遮蔽性能を確保できる 1.2 m 程度のブランケット空間の確保と、コイル支持構造の最大応力 1.5Sm 以下での簡素化 (図 5.1-2) による保守ポートの拡大、に関する工学課題を同時に軽減できるブレークスルーが十分に可能であることが分かった。また、[燃焼炉心プラズマの動特性解析 \(九州東海大：御手洗修\)](#) においても、密度上限の向上に関する最近の LHD 成果を導入することによって、自己点火条件到達に必要な閉じ込め改善度を ISS95 則に対して 2 以下に緩和出来ることが分かった。

熔融塩 Flibe ブランケットに関しても新しい提案を試みた。中性子減速能に優れた炭素材を第 1 壁保護タイルに用いるスペクトル調整概念を採用し、新たに中性子増倍の炭化ベリリウム材を最適配置する増殖ブランケット (STB) を設計した (図 5.1-3)。これに関して、[高プラントル流体伝熱促進実験 \(東北大：結城和久、橋爪秀利\)](#) とその MHD 効果解析 (東京理科大：佐竹信一、京大：功刀資彰) に基づく熱構造解析、及び増殖トリチウム回収と熱交換システム設計 (九大：深田智、清水昭比古) に基づく核特性解析を実施し

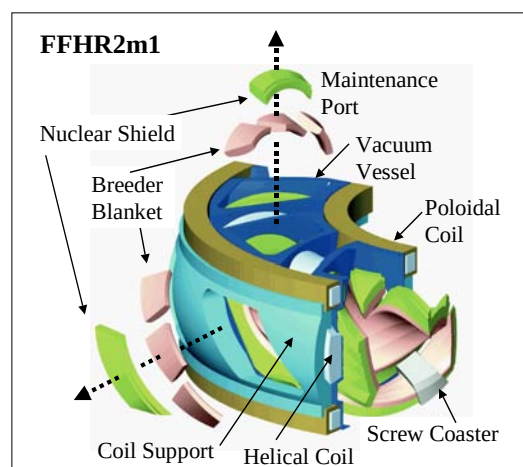
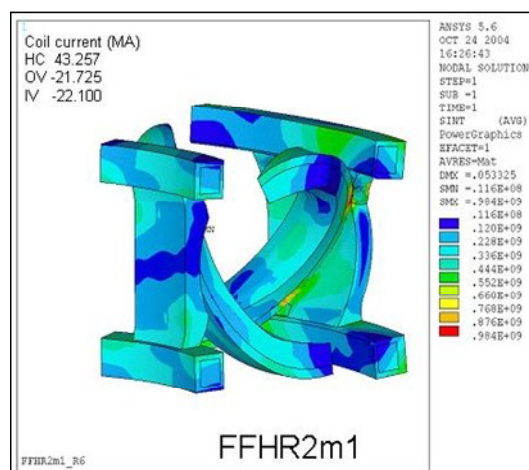


図 5.1-2 電磁力支持構造の応力分布とブランケット交換概念

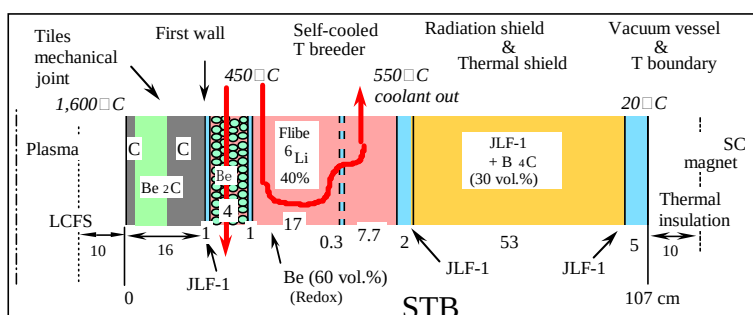
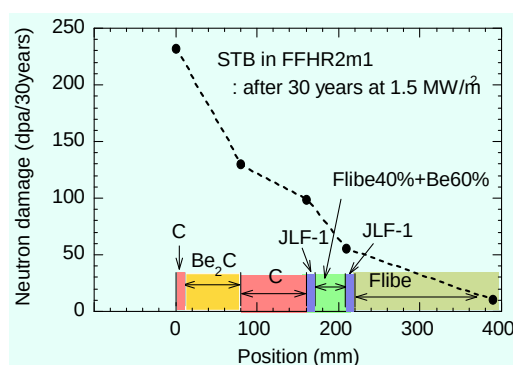


図 5.1-3 長寿命増殖ブランケット STB の 30 年での中性子損傷 (dpa)と構造概念

た[2]。その結果、制約のあるブランケット空間内でのブランケットの長寿命化、即ち炉寿命30年での交換不要(約100 dpa以下)、トリチウム増殖、および超伝導コイルに対する放射線遮蔽の3要求を同時達成できる可能性が充分にあることが分かった。他方、保護タイルの片面冷却、中性子照射による物性劣化、それに伴う保護タイルの定期交換、等の研究開発課題が明らかとなった[3]。

4) 平成18～19年度の成果

FFHR2m1を基準として、ブランケットと炉サイズ、加熱点火と制御、核設計と超伝導(SC)マグネット、等の概念最適化に向けての設計統合を進めた[4]。ブランケットに関しては、ヘリカルXポイントダイバータ(HXD)の提案によって周辺カオス磁場との干渉を回避する設計であったが[5]、アルファ加熱効率を下げる事が分かったので(図5.1-4)、トラス内側のみWC材によって放射線遮蔽を約20cm薄くする(図5.1-5)、ヘリカルコイルのスプリット化によって縦長磁気断面を整形する、中性子壁負荷 1.5MW/m^2 を増やさない条件で炉サイズを増やす、等を新たに提案し解析するとともに、ITERコスト評価データ(2002

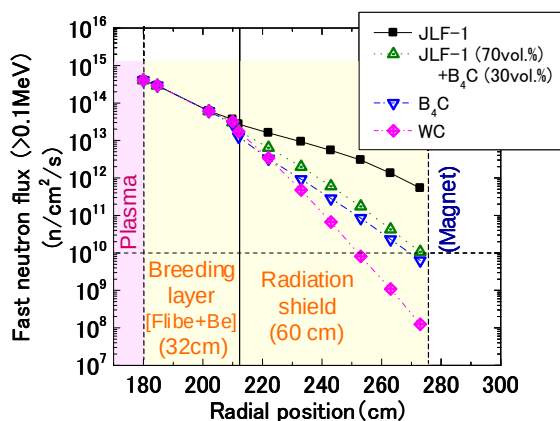


図 5.1-5 高速中性子遮蔽に対する材料依存性

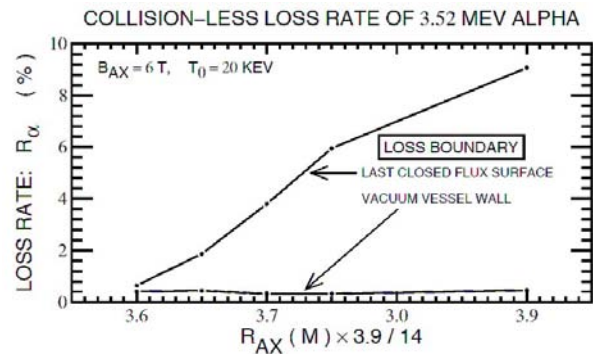


図 5.1-4 壁境界に依存した高エネルギーアルファ粒子損失率の磁気軸依存性

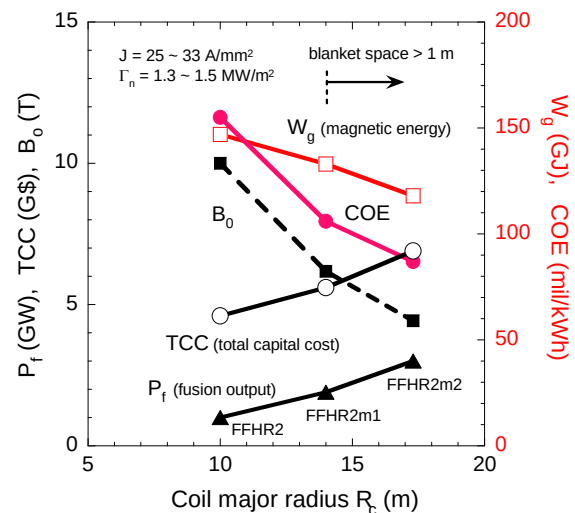


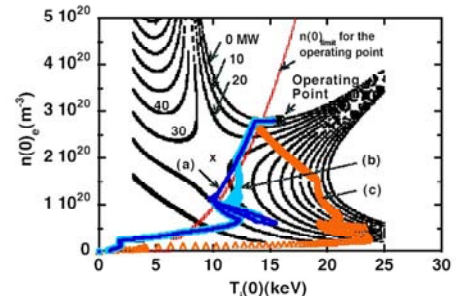
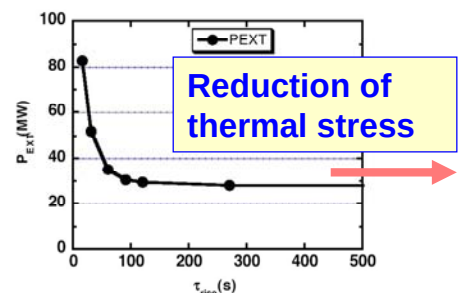
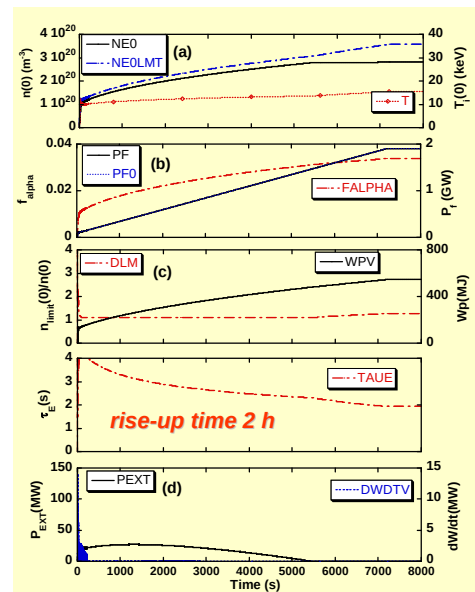
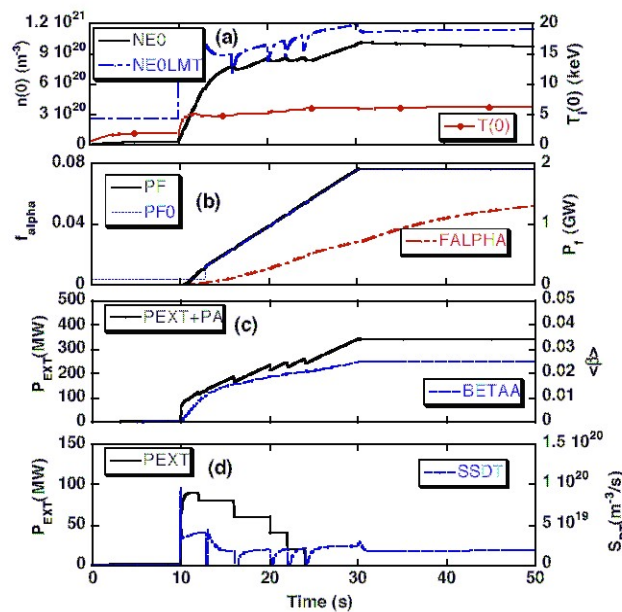
図 5.1-6 主要炉設計パラメータの大半径 R 依存性

表 5.1-1 FFHR 設計パラメータ

Design parameters			LHD	FFHR2	FFHR2m1	FFHR2m2
Polarity	l		2	2	2	2
Field periods	m		10	10	10	10
Coil pitch parameter	γ		1.25	1.15	1.15	1.25
Coil major Radius	R_c	m	3.9	10	14.0	17.3
Coil minor radius	a_c	m	0.98	2.3	3.22	4.33
Plasma major radius	R_p	m	3.75	10	14.0	16.0
Plasma radius	a_p	m	0.61	1.24	1.73	2.80
Plasma volume	V_p	m ³	30	303	827	2471
Blanket space	Δ	m	0.12	0.7	1.1	1.15
Magnetic field	B_0	T	4	10	6.18	4.43
Max. field on coils	B_{max}	T	9.2	14.8	13.3	13.0
Coil current density	j	MA/m ²	53	25	26.6	32.8
Magnetic energy		GJ	1.64	147	133	118
Fusion power	P_F	GW		1	1.9	3
Neutron wall load	Γ_n	MW/m ²		1.5	1.5	1.3
External heating power	P_{ext}	MW		70	80	100
α heating efficiency	η_α			0.7	0.9	0.9
Density lim.improvement				1	1.5	1.5
H factor of ISS95				2.40	1.92	1.76
Effective ion charge	Z_{eff}			1.40	1.34	1.35
Electron density	$n_e(0)$	10 ¹⁹ m ³		27.4	26.7	19.0
Temperature	$T_i(0)$	keV		21	15.8	16.1
Plasma beta	$\langle\beta\rangle$	%		1.6	3.0	4.1
Plasma conduction loss	P_L	MW		290	463	463
Diverter heat load	Γ_{div}	MW/m ²			1.6	2.3
Total capital cost	G\$(2003)			4.6	5.6	6.9
COE	mill/kWh			155	106	87

年)に基づくFFHRの経済性解析を実施した。その結果、建設費(TCC)の増大と発電単価(COE)の低下から概ねR=16m前後が有望であることが分かった(表5.1-1)(図5.1-6)。

加热点火と制御に関しては(九州東海大:御手洗修)、プラズマ電流不要の長所を利用して、自己点火立ち上げ時間を長くすることによって外部加熱入力を30MW程度に低減でき且つ機器の熱ひずみ緩和にも有利であること(図5.1-7)[6]、最近のLHD高密度プラズマ達成(IDB)に基づく高密度燃焼炉での熱的不安定性制御が、通常のPID制御の符号反転によって制御可能であること(図5.1-8)[7]、が分かった。



(a) 2 hours rise-up time (b) 300 sec (c) 150 sec

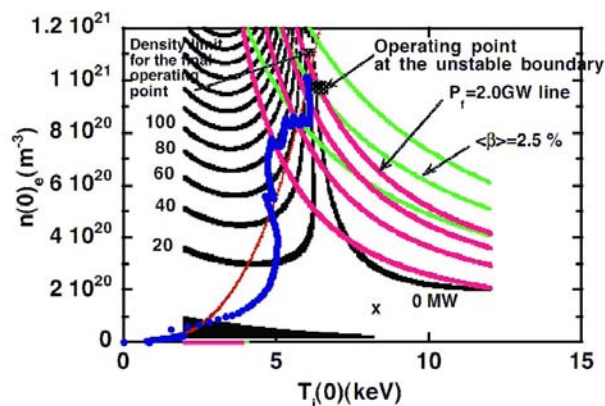


図 5.1-8 PID 法での熱的不安定制御による高密度点火接近と POPCON 図での経路

図 5.1-7 自己点火への2時間立ち上げ例、加熱パワーの立ち上げ時間依存性、および POPCON 図上での経路の違い

核設計に関しては、3次元モンテカルロ計算コードとCADデータとを解析関数でつなげることによって、非軸対称系での設計・計算の迅速なフィードバックを可能にし[8]、プラズマ分布に依存した中性子壁負荷分布のピーキングが高々1.3であることが分かった(図5.1-9)。また内側ダイバータポンプダクト以外を完全に遮蔽する Discrete Pumping with Semi-closed Shield (DPSS)の提案によって(図5.1-10)、SCマグネットでの高速中性子束 $<3 \times 10^{14} \text{n/m}^2 \text{s}$ 、最大放射線発熱 $<0.2 \text{mW/cm}^3$ (図5.1-11)、全放射線発熱 $\sim 40 \text{kW}$ (冷凍系電力 $<1\% P_f$)、の設計仕様を満たせる見通しが得られた。

超伝導マグネットに関しては、 Nb_3Al の React & Wind 円形ケーブル・イン・コンジット(CICC)連続巻き大型ヘリカルコイルの基本設計を実施し(図5.1-12)、最大冷却長 $<500 \text{m}$ 、電流 $<100 \text{A}$ 、最大磁場 $<13 \text{T}$ 、コイル電流密度 $<30 \text{A/mm}^2$ 、核発熱 $<1 \text{mW/cm}^3$ の仕様を満たせる見通しが得られ、ITER TFコイル仕様とも整合する。また約16,000トンに対す断熱支持脚にはLHD型支持脚30本で設計可能であり(図5.1-13)、4Kでの熱侵入も 0.34kW 程度と、ITERのステンレス仕様より1/20に抑制できることが分かった。

他方、外部加熱関連、燃料供給関連、ダイバータ排気構造、および炉内交換機器支持構造、等の概念設計が今後の課題として明らかとなった。

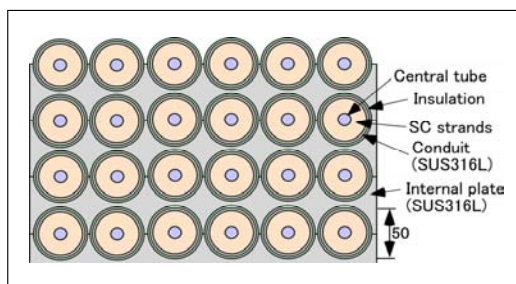


図 5.1-12 CICC ヘリカルコイル概念設計断面構造

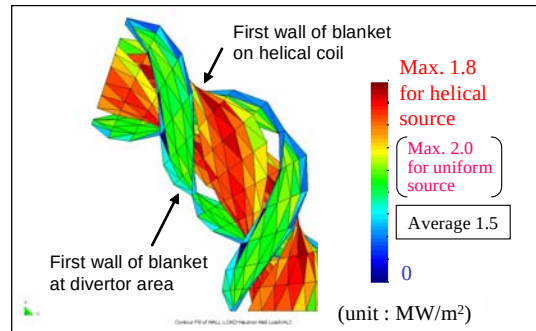


図 5.1-9 中性子壁負荷分布

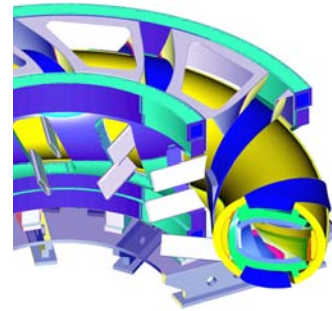


図 5.1-10 Discrete Pumping with Semi-closed Shield (DPSS)

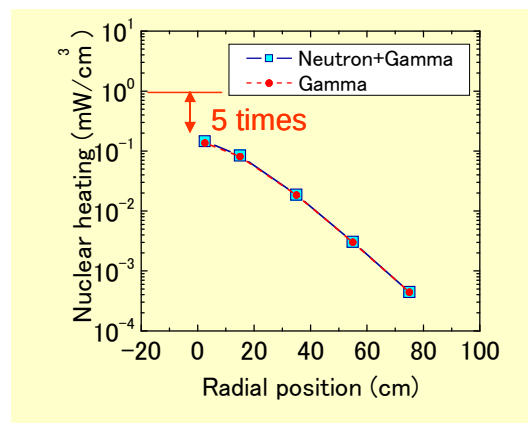


図 5.1-11 超伝導ヘリカルコイルでの放射線発熱分布

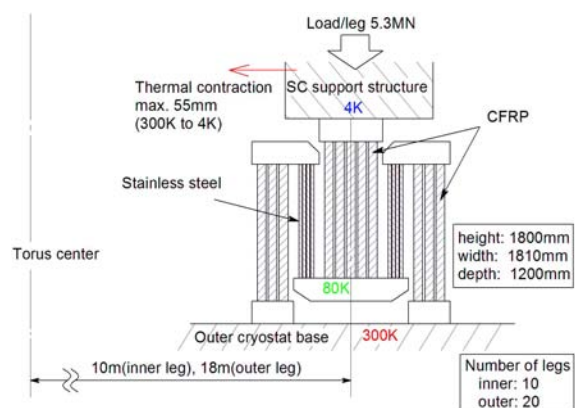


図 5.1-13 FFHR の LHD 型断熱支持脚

- [1] A. Sagara et al., Improved structure and long-life blanket concepts for heliotron reactors, *Nuclear Fusion*, 45 (2005) pp.258-263.
- [2] A. Sagara et al., Innovative Liquid Breeder Blanket Design Activities in Japan, *Fusion Sci. and Tech.*, 47 (2005) pp.524-529.
- [3] A. Sagara et al., Carbon tiles as spectral-shifter for long-life liquid blanket in LHD-type reactor FFHR, *Fusion Engineering and Design* 81 (2006) 1299–1304.
- [4] A. Sagara et al., Conceptual design activities and key issues on LHD-type reactor FFHR, *Fusion Eng. and Design*, 81 (2006) pp.2703-2721.
- [5] T. Morisaki et al., Numerical study of magnetic field configuration for FFHR from a viewpoint of divertor and edge field structure, *Fusion Eng. and Design* 81 (2006) 2749–2754.
- [6] O. Mitarai et al., Minimization of the External Heating Power by Long Fusion Power Rise-up Time for Self-ignition Access in the Helical Reactor FFHR2m, *Nucl. Fusion* 47 (2007) 1411.
- [7] O. Mitarai et al., New Control Method of the Unstable Operating Point in the FFHR Helical Reactor, *Plasma and Fusion Research, Rapid Communications*, 2, 021 (2007) .
- [8] T. Tanaka et al., Neutronics Investigation of Advanced Self-Cooled Liquid Blanket Systems in Helical Reactor, 21st IAEA Fusion Energy Conf., 2006, Chengdu, China.

6. 教育・人材育成活動

6. 1 大学院教育

LHD 実験は大学院教育にも大きな貢献をしてきている。LHD 装置のように規模の大きな実験の場合は、関係する研究者が大人数であるために、研究方針の決定や全体の実験スケジュール等は総合的な観点から決定され、個々の研究者なり学生の希望をそのまま取り込むことは難しい。学生の教育の観点からは、確定的な長期的スケジュールや失敗の許されない固定的な教育方針等よりも、計画の融通性や研究方針の柔軟性等が求められるが、この意味では LHD 実験は学性教育にはあまり向いていないとの見方もあり得る。しかしこれまでの実績が示すように、様々な工夫によってこのような表面的な困難さを克服することは可能であり、LHD 実験は大型装置においても充分大学院教育を行うことができることを実証してきたと言える。

核融合科学研究所の大学院教育は、総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻、名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科、北海道大学大学院工学研究科、富山大学大学院理工学教育部との連携大学院、特別共同利用研究員としての他大学の学生の教育委託、以上の三本の柱によって成り立っており、LHD 実験においてもこの三種の学生教育が行われている。名古屋大学との連携大学院と特別共同利用研究員制度では、博士前期課程と後期課程を通して大学院教育を行ってきているが、総合研究大学院大学では平成 17 年度までは博士後期課程のみを受け入れてきた。その後、総合研究大学院大学は平成 18 年度より 5 年一貫制博士課程教育を開始し、現在は学部卒業生を直接受け入れている。

総合研究大学院大学は、新しい国立大学として昭和 63 年 10 月に創設された。他の一般の国立大学とは極めて異なった特徴を持ち、全国の国立共同利用機関がその教育のための基盤となり、学生の教育は主としてそれぞれの研究所において行われる。さらに大学全体を統括するための本部が葉山に設置された。基本的な構想としては、博士研究者を育てることを主目的とし、そのために発足当初においては博士後期課程のみを設置していた。核融合科学研究所は、数物科学研究科の核融合科学専攻として平成 4 年 4 月から総合研究大学院大学に加わっている。このような大学院大学としての特徴は、そのまま核融合科学専攻における学性教育の特徴となる訳で、優れた研究環境の中で豊富な教員に囲まれた大学院教育が特徴である。また、学生の指導を主任指導教員と指導教員の二人制で行っていることも、他に見られない特徴となっている。

平成 16 年度以降、LHD 実験に関連した研究テーマに基づいて総合研究大学院大学の博士課程を終了した学生は 14 人である。以下に、学生の名前と卒業論文の題目、また研究指導にあたった指導教員名を表に示す。

表6. 1-1 LHD 実験における総合研究大学院大学博士課程卒業生

学位取得年度	学生氏名	博士論文題目	主任指導 教員	指導教員
平成16年度 3月	金場貴宏	LHDにおける超短パルスマイクロ波反射計に 関する開発研究	川端一男	井口春和
〃	辺見 努	高温超伝導コイルの電磁特性に対する線材内 遮蔽電流の影響に関する研究	三戸利行	高畑一也
〃	Kalinina, Diana	Studies of Impurity Behavior in NBI and ECR Heated LHD Plasmas by means of Tracer Encapsulated Solid Pellet Injection	須藤 滋	川端一男
〃	姚 振宇	Development of Insulating Coating on Vanadium Alloys for Liquid Lithium Blanket of Fusion Reactors	室賀健夫	西村 新
〃	Yakovlev, Mykhaylo	Transient Electron Heat Transport in LHD	小森彰夫	山田弘司
平成17年度 3月	中野治久	重イオンビームプローブを用いた揺動分布計 測と経路積分効果の評価法の確立	藤澤彰英	松岡啓介
〃	松下啓行	計測用ビームと中性粒子分析器を用いた高エ ネルギー粒子閉じ込めの研究	岡村昇一	松岡啓介
〃	山口太樹	磁気計測による3次元配位のMHD平衡量同 定	渡邊清政	山田弘司
〃	若林英紀	ヘリカル系における非中性プラズマの生成と空 間電位の磁気面上不均一分布	松岡啓介	岡村昇一
〃	Li, Huailin	Low Cycle Fatigue Properties of Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel(JLF-1) at Elevated Temperature	西村 新	室賀健夫
平成18年度 3月	片井隆志	Spectroscopic study on forbidden magnetic dipole transitions in LHD	森田 繁	榊原 悟
平成19年度 9月	小川博紀	LHD周辺プラズマにおける熱及び粒子輸送に 関する研究	大藪修義	増崎 貴
〃	Veshchev, Evgeny	Development of Fast Neutral Particle Diagnostics and Study of Suprathermal Ion Behaviors in LHD Plasmas	須藤 滋	尾崎 哲
〃	Li, Zaixin	Benchmark study on neutronics performance of liquid blankets	室賀健夫	田中照也

また同じく LHD 実験に関連した研究テーマに基づいて、平成 16 年度以降に連携大学院の名古屋大学工学研究科の博士課程を終了した、あるいは終了見込みの学生は以下の 7 名である。

表6. 1-2 LHD 実験における名古屋大学博士課程卒業生および終了見込学生

学位取得年度	学生氏名	博士論文題目	指導教員
平成 15 年度	鳥居祐樹	I C R F 領域速波及び遅波を用いたヘリカル磁場配位プ ラズマの加熱研究	渡利徹夫
平成 16 年度	野竹孝志	大型ヘリカル装置における電子サイクロトロン共鳴加熱 に関する研究	渡利徹夫

平成 16 年度	竹内伯夫	速波を用いたヘリカルプラズマの電流分布制御の検討	渡利徹夫
平成 19 年度	竹内正樹	静電プローブによるヘリカルプラズマにおける L-H 遷移現象と周辺輸送障壁形成の研究	東井和夫
平成 19 年度	大島慎介	重イオンビームプローブを用いたプラズマ内部のコヒーレントモード耕造の研究	熊澤隆平
平成 19 年度	池田亮介	CHS 装置における長波長マイクロ波によるオーバードレンスプラズマ生成と電力吸収特性	東井和夫
平成 19 年度	渡辺文武	大型ヘリカル装置における周辺 MHD 不安定性の特性と閉じ込めへの影響に関する研究	東井和夫

6. 2 ポスドク・若手研究者育成

6. 2. 1 ポスドクの雇用

核融合科学研究所では、いわゆる「ポスドク」に相当する若手研究者に対して、COE 研究者として雇用することによりその研究活動を促進し、有力な人材として育てる努力を行っている。平成 16 年度から 19 年度までの期間で、LHD 実験関連の COE 研究者として採用された若手研究者とその研究課題は以下の通りである。

表6. 1-3 LHD 実験を研究課題とするCOE研究員の採択実績

年度	氏名	研究課題
平成 1 6	Clive Alvin Michael	Development of electron density turbulence and profile diagnostics using CO2 laser imaging technique
	糟谷直宏	異常輸送の側面から見た多次元的な構造形成の研究
	高木尚志	LHD プラズマにおける鋸歯状振動の発生条件の理解
	中村希一郎	最外殻磁気面外側の周辺領域でのプラズマ密度の 2 次元計測
	ゴンチャロフ・パベル	Study of suprathermal ion physics in helical plasma by multi-chord passive NPA
平成 1 7	野竹孝志	電子サイクロトロン共鳴加熱電力伝送システムの最適化
	辺見 努	核融合炉用大型超伝導コイルへ適用するための大容量先進的高温超伝導導体の開発
	Kalinina Diana	Study of the titanium transport properties in LHD plasmas
	糟谷直宏	異常輸送の側面から見た多次元的な構造形成の研究
平成 1 8	中野治久	大型閉じ込め装置における HIBP を用いた研究
	大石鉄太郎	輸送障壁の形成による閉じ込め改善時の密度揺動の計測
平成 1 9	Clive Alvin Michael	Studies of density fluctuations and profiles in LHD using CO2 laser interferometer and phase-contrast imaging system
	時谷政行	等方性黒鉛製ダイバータタイルにおける粒子捕捉特性の把握と高 Z ダイバータタイルとプラズマ制御の両立性に関する研究
	Veshchev Evgeny	Study of fast particle loss-cone in LHD with multi-channel NPA system
	大島慎介	LHD 装置における HIBP による高速イオン励起不安定性の構造解明
	竹内正樹	LHD におけるエルゴディック層や磁気島を有する L-H 遷移プラズマの特性の解明、及び CHS における L-H 遷移プラズマとの比較研究

6. 2. 2 若手研究者の研究活動促進

核融合科学研究所では、若手研究者の研究意欲を促進し、研究能力の国際性を高めることを配慮して、研究上の必然性がある場合は積極的に海外に派遣するための努力を行っている。LHD 実験関連の研究活動として、平成 16 年度から 19 年度にかけての若手研究者(45 才以下)の海外派遣実績を以下に示す。

表6. 1-4 LHD 実験に関連した海外派遣実績

年度	教授	助教授	助手
平成16	3	7	40
平成17	3	15	60
平成18	0	25	61

7. 将来計画

7. 1 第1期中期目標・計画の達成に向けて

大型ヘリカル研究部は、第1期「中期計画」の「1 研究に関する目標を達成するための措置」の「(1) 研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置」の項目において、下記のような計画を立てている。

制御熱核融合の実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げる。

① 大型ヘリカル実験装置(LHD)の性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。このためにプラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進め、核融合炉心プラズマを見通せるLHDプラズマの高性能化を目指す。

② プラズマの高性能化に必要な物理機構の解明を、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進める。さらなる閉じ込め改善を実現するための先進的な磁場配位を持つ新規実験装置の検討を、コミュニティの共通の課題として推進する。

上記中期計画を履行し、中期目標を達成するため、平成20年度は、下記の計画を進める。

① プラズマ加熱機器の整備・増強、改良を進めることにより、平均電荷数の小さい高イオン温度プラズマ、プラズマと磁場の圧力の比の大きいプラズマ、入力エネルギーの大きい長時間放電プラズマ等を実現し、核融合炉心プラズマを見通せるLHDプラズマの高性能化を目指す。また、関連する学術研究を行う。

磁場電源を整備し、プラズマの位置を時間的に制御することによって、プラズマと磁場の圧力の比の大きいプラズマを実現し、LHDプラズマのさらなる高性能化を目指す。

プラズマの詳細な分布が得られる計測機器の整備・増強、改良を進め、プラズマの高性能化に必要なデータの取得に努める。

② 筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター及び九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターと研究所の間で双方向型共同研究を推進する。また、双方向型共同研究の一環として研究センターが持っている全国共同利用機関の機能により、研究センターと大学等との共同研究のさらなる活性化を図る。

双方向型共同研究の研究推進基盤をさらに強固にするため、必要な装置の整備等をコミュニティの意見も反映させて進める。

さらなる閉じ込め改善を実現するための先進的な磁場配位を持つ新規実験装置の検討を、コミュニティの共通の課題として推進する。

平成21年度は、下記のような計画を進め、6年間のまとめとして中期計画を完全に履行するものとする。

① プラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進め、核融合炉心プラズマを見通せるLHDプラズマの高性能化を目指す。これにより、LHDの性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。

② プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明を、研究所や大学・附置研究所・センターの装置・設備を有機的に活用し、双方向型共同研究として進める。さらなる閉じ込め改善を実現するための先進的な磁場配位を持つ新規実験装置の検討を、コミュニティの共通の課題として推進する。

これにより、制御熱核融合の実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学などにおいて、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げる。

さらに、大型ヘリカル研究部は、第1期「中期計画」の「2 共同利用等に関する目標を達成するための措置」の「(1) 共同利用等の内容・水準に関する目標を達成するための措置」及び「(2) 共同利用等の実施体制等に関する目標を達成するための措置」の項目において、それぞれ下記のような計画を立てている。

(1) 共同利用等の内容・水準に関する目標を達成するための措置

大型ヘリカル装置(LHD)などの実験装置を用いた共同利用・共同研究を推進するために、環境を整備する。

(2) 共同利用等の実施体制等に関する目標を達成するための措置

大学及び研究機関にある研究者コミュニティとの双方向性を持った共同研究を推進するための制度を新たに構築する。

上記中期計画を履行し、中期目標を達成するため、平成20、21年度は、下記の計画を進める。

(1) 共同研究の成果は、成果報告会等により広く公開し、意見を求めるとともに、共同研究委員会、あるいは専門委員会で評価する。また、これらの意見、評価等を共同研究課題の採択の審査等に反映させることにより、研究水準の向上を図る。

共同研究の採択審査時に、応募者の必要とするLHDの実験条件について実験責任者の意見を求め、採択後は必ずLHDで実験を行えるように配慮する。共同研究として受け入れた後は、遠隔実験参加システムやメールを活用する等して、実験の実施、実験データへのアクセス、情報提供等で所内と同等に近い研究環境を提供し、共同研究者がLHD実験に参加し易いようにして共同研究のさらなる発展を図る。

(2) 大学及び研究機関にある研究者コミュニティとの双方向性を持った共同研究を推進するための制度として新たに構築され、平成16年度に運用を開始した双方

向型共同研究により、双方向性を持った共同研究をさらに推進する。また、この双方向型共同研究に加えて、LHD計画共同研究と一般共同研究の計3つのカテゴリーを利用して、共同利用・共同研究をより活発に推進する。即ち、研究所と大学等の間で共同研究契約を結んで行う双方向型共同研究、大学等で育まれている各種の研究、技術等をLHD実験に適用・集約するため、大学等で先ず行うLHD計画共同研究、大学等からの研究者が研究所の設備を使って行う一般共同研究により、研究所を中心とした種々の形態の共同利用・共同研究に対応する。これらにより、中期計画に記述した上記2つの項目の措置を履行し、対応する中期目標を達成することができる。

上述のように、大型ヘリカル研究部が関わる中期目標については、平成20、21年度の年度計画を実施して中期計画を履行することにより、達成できる見通しである。さらに、大型ヘリカル研究部は、第1期中期目標を達成したと判断した時点で、第2期中期計画を立案するために、即ち、第2期中期計画の見通しを得るために必要な、プラズマ加熱機器、計測機器等の整備、増強、改良等を行う計画である。この場合、LHDの実験期間は、上述の平成20、21年の年度計画で予定しているものより短くなる、あるいはLHD実験を行わない可能性がある。

7. 2 第2期中期目標・計画への展望

LHDは定常無電流という特長を持つ磁場閉じ込め装置として、これまで世界に先駆けた高性能プラズマ実験を遂行してきた。今後もさらに、将来の核融合実証炉建設に向け、革新的概念を実証し、データベースの蓄積を図っていく必要がある。

核融合炉心プラズマ及びそれを実現する磁場や加熱等の諸装置は、極めて複雑な関係を相互に持ったシステムである。そこに起こる様々な現象の科学的裏づけを得ずしては、信頼性ある核融合炉を構築することはできない。

将来の核融合炉では重水素・三重水素が燃料として用いられるが、LHDにおいては軽水素あるいはヘリウムのみを用いるプラズマ実験をこれまでに10年あまり実施してきた。LHD計画は、核融合反応そのものを研究対象とするのではなく、核融合反応の実現に必要とされる高温プラズマの物理の体系化および要素技術の実証を行うことが役割である。

これまでに集積された実験データは大型トカマク実験と比較・対照できるレベル（物理量の差異が1桁以内）に達している。そこでは多くの科学的な知見が蓄積されてきており、今後さらにヘリカル系核融合炉を見通すために研究の集約を図っていくことが中長期的な目的となる。このためには加熱装置の増力等の整備とともに、プラズマ閉じ込めの改善を利用した性能向上が見込める方策を実行することが必要不可欠である。

水素の同位体である重水素を用いることによって閉じ込めが改善することが他の多くの研究で示されており、これによって装置の大きさが現有のままだも、より高性能なプラズマを研究対象として手にすることが可能である。同時に質量の違いに代表される同位体効果を明らかにすることができる。さらに、主要な加熱装置である中性粒子入射（NBI）装置の増強が重水素を用いることによって効果的に行うことができる。このように重水素の利用は相乗的にLHD実験計画の飛躍的な進展に直接つながるものである。

このように、重水素実験は、プラズマ性能のさらなる向上を図ると同時に、プラズマ燃料である水素の同位体効果を把握することも本質的な課題として位置づけられる。

したがって、現在得られつつある物理的理解および実験設備整備の基盤の上に、現有のLHDを用いた重水素実験の遂行により、プラズマの高性能化を図り、閉じ込め物理の質量依存性（同位体効果）を明らかにして、将来の核融合炉心プラズマを十分な確度で予測できるモデルを構築することを重要課題として取り組むことが是非とも必要である。

以上のことから、第2期中期計画では、重水素実験を中心に据え、これに閉構造フルヘリカルダイバータの整備とプラズマ加熱機器、計測機器等の整備、増強、改良を図ることにより、プラズマの閉じ込めを改善し、より核融合炉心プラズマに近い高性能プラズマを実現して、制御熱核融合の実現を目指した核融合科学とその基盤となるプラズマ物理学、炉工学等において、学術的体系化を図り、世界に先駆けた成果を上げることが可能である。

具体的には、

- ① LHDの性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。このために、重水素実験対応機器の整備、閉構造フルヘリカルダイバータの整備、プラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、改良を図り、核融合炉心プラズマを見通せるより高性能のLHDプラズマの実現を目指す。
- ② 重水素実験等を効率良く推進するため、プラズマの高性能化に必要となる物理機構の解明研究等を、例えば、材料の研究を、ネットワーク型共同研究として進める。このために、双方向型共同研究あるいは一般共同研究の枠組みの下に、研究テーマを限定したネットワークを構築する、即ち、双方向型共同研究で代表されるネットワーク型共同研究の多層化を図る。

第2期中期目標・計画の期間中に、上記計画に示された、重水素実験対応機器の整備、閉構造フルヘリカルダイバータの整備、プラズマ加熱機器の整備等が予定通り実施されれば、LHD計画で目標としているプラズマパラメータをほぼ達成できると予測している。また、関連して、閉じ込め改善のメカニズムの解明等、比較的個別的な

学術研究も大きく進展するものと考えられる。これに対して、ヘリカル装置の物理の体系化、環状プラズマの総合的理解等、個別の問題を、謂わば、有機的に結合させて理解しなければならない課題については、個々の課題が第2期中期目標・計画の期間中に解明された後、第3期中期目標・計画の期間に入ってから大きく進展するものと期待している。また、そのような計画となっている。

第2期中期目標・計画期間は、LHDが核融合研究に大きく貢献し、実証炉に繋がる学術的研究成果を残せるか否かの重要な時期である。世界に先駆けて現在行われている革新的なLHD実験の現状や第2期中期目標・計画期間に予定されている種々の機器整備の見通しからは、第2期中期目標・計画期間中に予定通りの成果が得られる見通しであり、第2期中期目標・計画終了時には、核融合炉への展望が現実的に大きく拓けると思われる。

8. まとめ

LHD は、安定性と定常性に特長がある。このことは短いショットのプラズマ実験も安定に行えることを意味しており、事実、実験開始以来、今年度までの10年間で約8万回のプラズマ放電を、トカマクにおけるディスラプションのような現象を起こすことなく実施し、新たな発想による試みを含めた物理実験に多くの研究機会を作り出してきた。このような状況の下、第1期中期目標・計画期間中、LHD は、初期実験を足掛かりに、LHD 計画の最終目標を実現するための手掛かりを見出すことに成功している。

これまでの LHD 実験における最大の発見は、小さな粒子輸送係数と MHD 安定性が両立することを見出したことである。即ち、ベータ値が小さい時、LHD で発見される以前は、粒子の軌道が磁気面と一致する粒子輸送が小さい磁場配位では、磁気丘が強調されるために、MHD 的に不安定であり、逆に、MHD 的に安定な磁場配位では、粒子軌道が磁気面と一致せず粒子輸送が大きくなると、理論的に予測されていた。LHD の実験で、粒子軌道が磁気面と一致し粒子輸送が小さいと考えられる磁気軸を標準位置より内側にシフトさせた磁場配位では、確かに MHD 不安定が励起されるが、プラズマの非線形性によって振幅が閉じ込めに大きく影響する前に飽和するため、平衡が保たれることはもちろん、輸送係数も大きく損なわれることはないことが示された。これにより、LHD はそれまでの ISS95 と呼ばれるスケーリング則を約1.5倍上回る閉じ込め改善が実現された。MHD線形安定性理論の適用範囲と限界を示す体系的な実験解析に基づき、プラズマ自由境界の扱いや圧縮性、非線形効果などを扱う理論の高度化が図られた。また、これらの内寄せ磁場配位による閉じ込め改善が体系的に調べられ、閉じ込め改善度とヘリカルリップルとの間に強い相関があることが見出された。この発見は国際協力による国際ステラレータ/ヘリオトロン閉じ込めデータベース活動によって、多くのヘリカル装置に共通して見られる性質であることもLHD実験を基点として検証された。ここで注目すべきことは、この閉じ込め改善が新古典輸送だけでなく、異常輸送の抑制によるものであることである。ヘリカルリップルの低減による異常輸送の抑制は、今後のヘリカル系装置設計の方針に大きな影響を持つため、後述する帯状流（ゾーナル・フロー）との関係において、ジャイロ運動論に基づくイオン温度勾配モードによる乱流を対象とした大規模シミュレーションなどの高度な理論的アプローチからも解明が急がれている。

上記、粒子輸送と MHD 不安定性の関係から、NBI を垂直方向から入射してプラズマを効率的に加熱できると考えられる内寄せ磁気軸位置を選んでも、以前予想したように MHD 不安定性が起り、平衡が保てなくなるという事態は生じないと考えられた。また、後述するが ICRF による加熱の有効性がこの磁場配位で検証され、高エネルギーの捕捉イオンの良好な閉じ込めが実証された。この検証には、実空間3次

元・位相空間 2 次元の大規模なモンテカルロ計算が大きな貢献をなしている。このため、第 1 期中期目標・計画が開始されてから、イオン温度の詳細な小半径方向分布を得るための計測機器として整備を進めていた、計測用垂直入射 NBI を利用して、イオン温度の加熱実験を行った。その結果、水素ガスを用いた実験で、平成 19 年度は 6.8keV のイオン温度を達成し、18 年度の 5.2keV を更に超えた値をより高密度 ($2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) の条件下で実現することができた。これにより、LHD 計画が最終目標としている 10 keV のイオン温度を実現するための展望を大きく拓くことができた。LHD では、これまでプラズマの加熱用として接線 NBI を整備してきたが、接線 NBI の場合、中心部に打ち込むには大きな加速電圧を必要とするため、プラズマとの荷電交換は主に電子との間で起こり、イオンは NBI によって直接加熱されない。このため、高イオン温度を実現することが難しく、如何にイオン温度を加熱するかが課題となっていた。

第 1 期中期目標・計画期間中、プラズマの詳細な密度分布が得られる計測機器等の整備を進め、プラズマの高性能化に必要な多くの基礎データを取得することができた。重イオンビームプローブは、定格エネルギーで稼働させることに成功し、プラズマの詳細な分布計測を開始している。また、トムソン散乱計測や炭酸ガスレーザ干渉計による密度分布の精細計測や、偏光計測にゼーマン分離を利用した中性原子 2 次元分布計測なども順調に稼働を始め、周辺プラズマの物理量分布を同時に取得することが可能となり、プラズマの構造形成に関する理解が進んでいる。支援実験装置 CHS では、2 台の重イオンビームプローブの同時計測によりトロイダルプラズマ中に帯状流が存在する事を世界に先駆けて実験的に明らかにした。さらに、先に述べたように、計測用垂直入射 NBI を利用した荷電交換分光の整備を進めた結果、イオン温度の詳細な小半径方向分布やプラズマの回転などを計測することに成功している。

これらのプラズマの回転と電場（静電ポテンシャル）の計測を基にしたプラズマの流れと乱流の研究はすでに核融合科学研究所において CHS を用いた先駆的な研究がある。CHS では世界で初めて帯状流を同定し、その乱流とのエネルギー交換などとも、極めて学術的価値の高い成果を挙げた。ミクロスケールの乱流とメゾスケールの帯状流そして、輸送障壁などのマクロスケールの構造形成に関する理論は、これらの実験結果ともに大きく進展してきた。

荷電交換分光を用いた計測では、水素プラズマの中心イオン温度 6.8keV を計測するとともに、その詳細な小半径方向分布も計測している。イオン温度の勾配は、周辺部と中心部で明らかに異なっており、中心部で急峻となっていることから、中心部で閉じ込めの改善が起こった可能性を示唆している。垂直 NBI のみ入射した場合には、周辺部と中心部でイオン温度の勾配に変わりはなく、接線 NBI が入射して始めてイオン温度勾配に違いが現れることから、垂直 NBI によりある程度高いイオン温度が実現しているところへ、接線 NBI が入射すると相乗効果により閉じ込めの改善が起こるものと考えられる。何故このような閉じ込めの改善が起こるのか、現在、解析を進めているところであるが、何れにせよ、接線 NBI は垂直 NBI と組み合わせること

により、その真価を発揮することが実験的に明らかとなった。

計測用垂直入射 NBI を利用した荷電交換分光によるイオン温度の計測は、プラズマ中に不純物として含まれている炭素を利用して行われるため、炭素がなくなるとイオン温度の計測はできないことになる。高イオン温度を達成したショットでは、よりイオン温度の低いショットに比べて、プラズマ中心部の炭素が減少していることが見出された。即ち、閉じ込めが改善され、中心部の温度が高くなると、不純物は中心部から排除されることが明らかとなった。トカマクでは、プラズマの閉じ込めが改善されると、不純物の閉じ込めも改善され、不純物がプラズマに蓄積されるという問題が生じるが、LHD では、このような問題は生じず、一旦閉じ込めが改善されると、ますます閉じ込めが改善される方向に向かうことが明らかとなった。より高いイオン温度を実現するため、密度を減少させて実験を行った場合には、イオン温度は高くなっている可能性は大きいですが、中心部の炭素がより減少するため、信頼性のある計測ができない結果となり、今後とも、高イオン温度の分布計測の改良、開発を引き続き行う必要があり、第2期中期目標・計画への課題として残っている。

プラズマ制御法を工夫し、LHD プラズマの高性能化を目指した研究では、革新的な排気法であるローカルアイランドダイバータ (LID) を利用した周辺プラズマ制御研究が進展し、超高密度プラズマの生成に成功している。LID は期待していた通りの周辺プラズマ制御機能を有していることが確認され、粒子制御によって周辺プラズマの電子温度勾配が急峻となる良好な閉じ込め状態が実現されるなど、能動的な周辺プラズマ制御に成功した。LID 磁場配位では、プラズマの体積が LID 磁場配位でない時の約 60% にまで減少するにも拘わらず、中心温度は、LID 磁場配位でない時と同じ値を達成している。これらのデータは、第2期中期目標・計画で予定している閉構造フルヘリカルダイバータの設計に活かされる。

LID が稼動すると、ガスパフによって供給されるガスは、セパトリックス近傍で電離するため、LID によって排気され、プラズマ閉じ込め領域に到達しないと予想されていたが、実験的にもこれが確かめられた。実際、ガスパフによって生成されるプラズマは、密度が低く、ガスパフ量を増やしても密度を増加させることは難しかった。このため、LID 稼動時にペレットを入射させることによりプラズマを制御する研究を進め、連続的にペレットを用いることによって内部拡散障壁 (IDB) を形成し、IDB 内部で 500 兆個/cc に達する超高密度プラズマを生成することに成功した。さらに、壁で排気する手法を用いて、IDB を形成し、1, 100 兆個/cc に達する超高密度プラズマを形成することにも成功している。IDB の形成メカニズムは、現在、MHD 平衡・安定性およびプラズマ流体と中性粒子モンテカルロ計算を組み合わせた 3 次元周辺プラズマ解析を中心として理論的に検討中である。

上記結果を受け、核融合炉心プラズマとして従来の高温高密度プラズマを生成・利用するシナリオから、IDB を利用した、超高密度で比較的低温のプラズマを使うシナリオを提案し、その研究を推進している。このシナリオの利点は、従来のものに比

べて達成し易いことである。さらに、この新しいシナリオに基づく炉設計の研究も開始している。

第2期中期目標・計画では、閉構造フルヘリカルダイバータでL I Dと同等以上のダイバータ機能を実現し、プラズマの閉じ込めのさらなる改善を目指す。閉構造フルヘリカルダイバータでは、プラズマの体積が減少しないため、プラズマの温度の改善も望めるものと期待されている。

高ベータ実験では、磁場配位の最適化を行った結果、第1期中期目標・計画期間中に5%の体積平均ベータ値を達成することに成功した。低磁場を用いて行っている高ベータ実験では、これまで、蓄積エネルギーを大きくするため、プラズマ体積が大きい磁場配位で、安定性を考慮して磁気井戸が形成され易いものを使ってきた。平成15年度からは、プラズマの体積は多少小さいが回転変換が大きく、シャフラノフシフトの少ない磁場配位で実験を行っている。この場合、磁気井戸は形成され難いが、通常の磁場強度での実験同様、たとえ不安定性が励起されたとしても非線形性により振幅が小さい段階で飽和し、閉じ込めに大きな影響を与えないことを期待している。実際、閉じ込めを破壊するような不安定性は、これまでのところ見出されていない。新しく採用した磁場配位の長所は、シャフラノフシフトが小さいため、NBIからの高速粒子の閉じ込め、即ち、加熱効率が高く、ベータ値を上げ易いことである。実際、平成15年度の実験では、ベータ値を高くすることが可能となり、ベータ値がある閾値を超えると、周辺部で励起した複数のMHDモードがプラズマ内側から外側に向けて徐々に安定化される現象が現れることが明らかとなった。ベータ値が低い場合には、 $m/n = 1/1$ モードが不安定となっているが、ベータ値を上げると、 $1/1$ モードは安定化され、より高次モードの $m/n = 2/3$ と $1/2$ が励起されることが明らかとなった。さらにベータ値を上げると、 $2/3$ と $1/2$ モードも安定化され、より高次モードの $m/n = 2/5$ モードが励起される。この時、周辺部の電子温度分布の、各モードが励起している位置に対応した所が局所的に平坦化することが明らかとなっている。この平坦化がMHDモードの安定化に寄与していると考えられ、不安定性の自発的な安定化、有限ベータ効果による磁気面の構造変化等の観点から研究を進めている。従来の線形MHD理論では説明できない現象が鍵となっており、非線形効果、自由境界や磁力線の乱れ、圧縮性などを考慮した高度化したMHD理論による取り組みがなされている。ここに来て、I D Bプラズマを含めて高ベータプラズマの理論解析の基盤となる平衡について、核融合科学研究所において開発された磁気面の存在を仮定しないH I N Tコードが本質的な役割を果たしていることは特筆されるべきであろう。

現在使用している磁場配位は、上述のようにシャフラノフシフトを小さく抑えられることが特長であるが、既に5%の体積平均ベータ値を達成していることから、シャフラノフシフトは実際にはかなり大きな値となっている。このため、次の手法として、ポロイダル磁場を時間的に掃引し、シャフラノフシフトを打ち消してプラズマの位置を一定に保つことを計画している。これにより、高い加熱効率を常に保つことが可能

となり、5%を大きく超えるベータ値を実現できるものと期待されている。現在、ポロイダル磁場を時間的に掃引するための電源を整備しており、第1期中期目標・計画期間中に、このポロイダル磁場を時間的に掃引する実験を予定している。閉構造フルヘリカルダイバータを設置した場合、使用可能な磁場配位はバッフル板の構造でほぼユニークに決定され、しかもダイバータレッグがバッフル板に当たらないようにシャフラノフシフトを抑えて実験を進めなければならない。このため、ポロイダル磁場を時間的に掃引する手法は、第2期中期目標・計画では必要不可欠なものであり、第1期中期目標・計画期間中にその手法の完成が待たれている。

定常加熱実験も、第1期中期目標・計画期間中に大きな成果を挙げることができた。プラズマを高周波で生成・加熱するイオンサイクロトロン加熱法を主に用いて、大電力による定常加熱実験を重点的に行った。その結果、約500kWの加熱入力パワーで、プラズマの温度が1,200万度、密度が4兆個/ccの高温プラズマを54分28秒に亘り連続して保持することに成功した。また、プラズマに入力したエネルギー値としては核融合研究にとって新しい領域となる1.6ギガジュールを達成した。長時間運転するためにはプラズマからの熱を最終的に受け止めるダイバータ板の温度上昇を抑えることが不可欠であるが、この放電では、ヘリオトロン磁場配位の特長を利用して、即ち、プラズマ生成中に閉じ込め磁場を僅かに変化させて効率よく熱負荷を分散させる手法が用いられた。このように、この長時間運転には、プラズマと壁との相互作用の研究や固体表面に関わる物理研究から加熱や除熱に関わる工学研究に至る学術研究の積み重ねが活かされている。さらに、ECHの単独加熱による定常加熱実験では、約110kWで1時間5秒の放電に成功した。今後はさらに大きな加熱パワーで1時間程度の定常加熱実験を行い、プラズマ制御、プラズマ壁相互作用、高熱負荷材料などの研究を進めて行く予定である。

LHDにおけるプラズマのさらなる閉じ込め改善は、前節で述べたように、重水素実験、閉構造フルヘリカルダイバータ、プラズマ加熱パワーの大幅な増強等により、第2期中期目標・計画期間中に実現させる予定となっている。プラズマ加熱パワーの大幅な増強は、電場で閉じ込めの改善を行う方法と密接に関係している。LHDでは、電子ルートによる正の径電場が、比較的密度の高い場合には周辺部に、密度の低い場合には小半径方向の全域で形成されることが確かめられている。また、ECHのパワーがプラズマの中心に集中している状態では、NBIと組み合わせることにより、中心部に形成される。この場合、周辺部との間で、形成された電界の値に大きな差が見られ、電子系の輸送障壁として研究が進められている。これらの研究で、大きな正電場が形成されると輸送係数が大幅に減少することが明らかになっている。このことから、今後、加熱パワーを増強して、通常密度でも小半径方向の全域で正の径電場を自在に形成できるようになれば、確実に大幅な閉じ込めの改善が実現されるものと思われる。即ち、加熱パワーを増強することにより、単純な加熱パワーの増強に比べ、効率

的なプラズマ閉じ込め改善のシナリオを描いている。また、最近可能となったイオンを直接加熱する方法をさらに推進することにより、イオン系の伝導損失などの閉じ込めに関する理解が進むとともに、電場による閉じ込め改善（イオン系により有効）の効果が明確に観測されることが期待される。電場を鍵とした閉じ込め改善および異常輸送の解明への取り組みはヘリカル系から始まり、トロイダルプラズマを理解する上で欠くことのできないパラダイムとなった。電場、乱流と流れはこれらのトロイダルプラズマの総合的理解およびLHDプラズマの高性能化につながる物理課題として実験、理論、シミュレーションの強く、包括的な連携によって解明に当たるものである。

以上のように、LHD は、第1期中期目標・計画を予定通り終了できる見通しが立っており、第2期中期目標・計画に向けて、種々の準備を開始し、学術研究をさらに進められる段階にあると言える。

付 録

外部評価委員会 LHD 専門部会からの質問に対する回答

外部評価委員会 LHD 専門部会 委員 各位

12月1日の外部評価委員会では丁寧なご審議をいただきありがとうございました。当日専門部会からいただきました以下のご質問につきまして、回答をご用意いたしましたのでご査収ください。

なお、評価の観点に基づくまとめが当日配付資料5にありますのでこちらも併せてご参考にしていただければ幸いです。

1. 他分野への発信の具体例を示すこと。
新聞雑誌記事は年度ごとにまとめること。
2. 大学院教育について
大学院生をどのようにして集めているか。
大学院生はどのようなところに就職しているか。
3. 若手研究者育成について
国際会議等への派遣実績を示すこと。
4. 理論データ解析について
シミュレーション、トカマクとの連携の具体例を示すこと。
「総合力のアップ」とはどのようなことを指すのか説明すること。
5. ITERに向けた計測器開発はどうなっているか説明すること。
6. Klinger 委員のご意見
要素研究の成果としての成果はすばらしい。一方、これらの成果をこれからどう統合していくか？例えば、定常について。ECHは定常に向いているが、高密度へのOXBなど含めて増強すべきである。またLIDも閉じ込め改善の実証など大いに成果があったが、高熱負荷の問題があるからヘリカルダイバータにする必要がある。
7. Lee 委員のご意見
ヘリカル炉を指向した研究は焦点を絞っていく必要がある。一方、ミラー、レーザーとの双方向型研究は拡大していく視点が必要。方向性が異なる2つの研究をどのように進めていくのか。
また、重水素実験には時間がかかり、それを待ちすぎることはよくない。有効な予算の範囲で、垂直NBI、閉ダイバータを先行させるべきである。
8. 法人化前と現在とを比較し進展がわかる表が欲しい。

核融合科学研究所
大型ヘリカル研究部
研究総主幹 小森彰夫

1. 他分野への発信の具体例を示すこと。新聞雑誌記事は年度ごとにまとめること。

平成16年度以降の核融合研の活動に関する新聞報道の内、LHDに関するものは以下の通りである。

年度	日付	掲載紙名	内容
平成16	H16. 7. 2	日本経済新聞	冷却システムの模擬実験装置
	H16. 7. 2	岐阜新聞	核融合の冷凍模擬装置開発
	H16. 7. 2	日刊工業新聞	国内最大のヘリウム冷凍機模擬装置
	H16. 12. 18	朝日新聞	エネルギー値 世界記録更新
	H16. 12. 18	読売新聞	高温プラズマ持続 核融合研が世界新
	H16. 12. 18	中日新聞	プラズマ保持で世界記録
	H16. 12. 18	岐阜新聞	高温プラズマの持続時間 核融合研が世界記録
	H16. 12. 20	日刊工業新聞	プラズマ入力エネで1.3ギガジュールを達成
	H16. 12. 31	週刊エネルギー通信	LHDの成果を幅広く紹介
平成18	H18. 4. 12	毎日新聞	文科省表彰へ
	H18. 4. 12	朝日新聞	核融合科学研究所世界記録を更新
	H18. 4. 12	読売新聞	高温プラズマ維持時間世界記録更新
	H18. 4. 12	中日新聞	加熱エネルギー世界記録を更新
	H18. 4. 12	岐阜新聞	高温プラズマ生成で世界記録
	H18. 7. 20	日刊工業新聞	(特集記事) テクノ学び隊でLHDを紹介
	H19. 1. 23	読売新聞	(特集記事) 核融合科学研究所を訪ねる

2. 大学院教育について

2.1 大学院生をどのようにして集めているか。

以下に示す活動の他、北海道大学大学院工学研究科、富山大学大学院理工学教育部との大学院連携による集中講義を行い紹介をしている。また留学生については教員の国際的な研究活動に付随して大学院生の受け入れが可能なことを広報している。

○大学院説明会

総合研究大学院大学の紹介と核融合科学専攻における教育・研究活動の説明。基盤研究機関である核融合科学研究所の研究活動紹介。名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科に於いても同時期に説明会を開催している。

○総研大・夏の体験入学

大学院修士学生、大学生、高専生を対象に、1週間の合宿形式で大学院における研究活動を体験する総研大としての企画を平成16年から実施している。参加者に対して、核融合科学専攻における研究内容を直接に体験してもらうと共に、核融合科学専攻への志望を促している。

過去4回の実施により、参加者のうち、6名が受験し、4名が入学（予定を含む）している。

○総研大・アジア冬の学校

国内を含むアジア諸国の大学生、大学院生を対象に、プラズマ物理の基礎、核融合プラズマ実験、シミュレーション科学等の研究について、講義形式で行う。国際的な交流と総研大・核融合科学専攻の広報も合わせて行っている。

○一般公開

核融合科学研究所の一般公開において、総研大・核融合科学専攻のブースを設け、大学院教育についての広報を行っている。

○HPによる専攻紹介

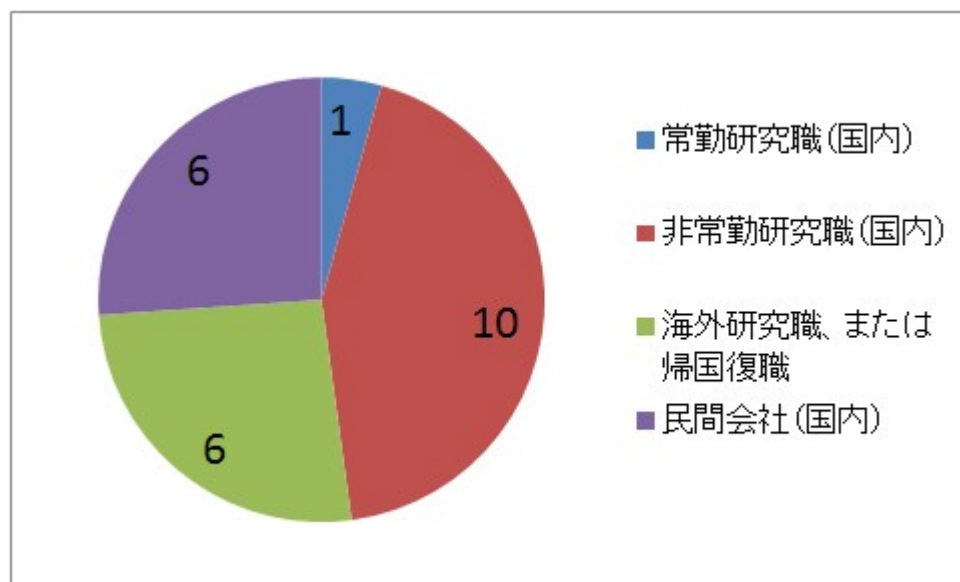
ホームページにより、核融合科学専攻の紹介、入学案内、各種行事の案内、と共に、学生生活の紹介も行って、関心を持ってもらう。

	平成16年度		平成17年度		平成18年度		平成19年度	
入学者獲得活動	開催期間	参加学生数	開催期間	参加学生数	開催期間	参加学生数	開催期間	参加学生数
大学院説明会	6/5	9	5/20	14	4/28	10	5/18	9
夏の体験入学	8/2～6	17	8/18～24	13	8/7～11	27	8/6～10	40
アジア冬の学校	12/9～11	21(6)	12/13～16	38(17)	2/27～3/2	29(18)	2/26～29	未定
一般公開	10/30	—	8/20	—	10/28	—	11/10	—
H P		—	—	—	—	—	大学院ナビに掲載	

*()は外国人内数—

2.1 大学院生はどのようなところに就職しているか。

核融合研は総合研究大学院大学の物理科学研究科の1専攻を構成し学年定員は6名である。平成16年度から19年度にかけての総研大卒業生は23名（内、留学生は7名）である。その就職先の分布を下図に示す。



3. 若手研究者の海外派遣実績

3.1 若手教員

准教授（助教授）、助教（助手）、博士研究員について年度ごとの派遣実績を以下に示す。

平成 16 年度

職名	氏名	出国日	帰国日	行き先	用務
助手	後藤 晋	2003/6/1	2004/5/31	イギリス	ロンドン大学インペリアルカレッジ
助手	横山雅之	2004/3/23	2005/1/23	オーストラリア	改善閉じ込めと磁場構造の理論研究
助手	前川龍司	2004/3/28	2004/4/3	アメリカ	International Cryocooler Conference に出席
助手	鈴木千尋	2004/4/18	2004/4/24	アメリカ	第 15 回高温プラズマ計測会議に出席
助手	西浦正樹	2004/4/18	2004/4/24	アメリカ	第 15 回高温プラズマ計測会議に出席
助手	吉沼幹朗	2004/4/18	2004/4/24	アメリカ	第 15 回高温プラズマ計測会議に出席
助手	坂本隆一	2004/5/10	2004/5/15	中国	拠点大学交流事業
助手	田中謙治	2004/5/10	2004/5/15	中国	拠点大学交流事業
助手	増崎 貴	2004/5/23	2004/5/30	アメリカ	第 16 回 PSI
助手	芦川直子	2004/5/23	2004/6/3	アメリカ	第 16 回 PSI
助手	庄司 主	2004/5/23	2004/5/30	アメリカ	第 16 回 PSI
助手	斎藤健二	2004/5/23	2004/5/30	アメリカ	PSI
助手	中西秀哉	2004/6/8	2004/7/7	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	後藤基志	2004/6/20	2004/6/30	フランス	International Conference on Spectral Line Shapes に出席，研究打ち合わせ
助手	大舘 暁	2004/6/23	2004/7/3	ドイツ	研究打ち合わせ，第 31 回プラズマ物理学に関する欧州国際会議に出席
助手	徳澤季彦	2004/6/27	2004/7/7	イギリス	第 31 回プラズマ物理学に関する欧州国際会議に出席
助手	成嶋吉朗	2004/6/27	2004/7/4	イギリス	第 31 回プラズマ物理学に関する欧州国際会議に出席
助手	永岡賢一	2004/6/27	2004/7/7	イギリス	第 31 回ヨーロッパ物理会議に出席，研究打ち合わせ
助手	三浦英昭	2004/6/28	2004/7/4	ノルウェー	10th European Turbulence Conference に出席
助手	田中照也	2004/7/12	2004/7/16	アメリカ	日米 WS
助手	横山雅之	2004/8/23	2004/9/2	ドイツ	研究打ち合わせ
助手	秋山毅志	2004/8/25	2004/8/28	韓国	日韓セミナーに出席
助手	田村直樹	2004/8/25	2004/8/28	韓国	日韓セミナーに出席
助手	中村浩章	2004/8/30	2004/9/6	イタリア	Conference on Computational Physics 2004 に出席
助手	田村祐一	2004/8/30	2004/9/6	イタリア	Conference on Computational Physics 2004 に出席
助手	西澤章光	2004/9/10	2004/9/20	ウクライナ	第 10 回負イオンの生成と中性化に関する国際会議出席
助手	杉山貴彦	2004/9/12	2004/9/19	ドイツ	第 7 回トリチウム科学技術国際会議出席、発表
助手	田中照也	2004/9/13	2004/9/17	アメリカ	第 16 回核融合エネルギー技術に関する国際会議に参加
助手	妹尾和威	2004/10/2	2004/10/10	アメリカ	応用超伝導会議（ASC2004）に出席

助手	菱沼良光	2004/10/2	2004/10/10	アメリカ	2004 年応用超伝導会議 (ASC2004) に出席
助手	吉村信次	2004/10/20	2004/10/29	フランス	研究打合せ, 第 12 回プラズマ物理国際会議に出席
助手	登田慎一郎	2004/10/24	2004/10/31	フランス	第 12 回プラズマ物理国際会議に出席
助手	稲垣 滋	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	田中謙治	2004/10/31	2004/11/13	ポルトガル	IAEA, ITPA
助手	佐竹真介	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	長壁正樹	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	津守克嘉	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	井戸 毅	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	三浦英昭	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助手	大館 暁	2004/11/7	2004/11/12	ポルトガル	ITPA
助手	石崎龍一	2004/11/13	2004/11/21	アメリカ	APS
助手	大谷寛明	2004/11/13	2004/12/12	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	磯部光孝	2004/11/14	2004/11/26	アメリカ	APS, 研究打ち合わせ
助手	田村直樹	2004/11/14	2004/11/28	アメリカ	APS, 研究打合せ
助手	南 貴司	2004/11/14	2004/11/21	アメリカ	APS
助手	後藤基志	2004/12/12	2005/9/28	ドイツ	TEXTOR トカマク実験参加
助手	加藤太治	2005/2/16	2005/2/24	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	山岸 統	2005/2/20	2005/2/27	アメリカ	ワークショップに出席
助手	中西秀哉	2005/3/10	2005/3/26	アメリカ	「大量計測データから有意波形を採掘するデータベース検索法の研究」に関する打合せ
助手	大館 暁	2005/3/13	2005/3/19	ドイツ	高速度接線 X 線カメラに関する研究打合せ
助手	西浦正樹	2005/3/13	2005/3/19	イギリス	第 8 回 ITPA 計測トピカルグループ会合に出席
助手	関 哲夫	2005/3/14	2005/3/19	中国	拠点大学交流
助手	江本雅彦	2005/3/15	2005/3/21	ドイツ	Wenderstein のデータ収集システム調査
助手	伊神弘恵	2005/3/17	2005/3/26	ドイツ	ECH システムの開発と実験研究に関する情報収集
助手	徳澤季彦	2005/3/19	2005/3/25	アメリカ	日米 WS
助手	秋山毅志	2005/3/19	2005/3/25	アメリカ	日米ワークショップ, 研究打ち合わせ
助手	加藤太治	2005/3/21	2005/3/23	韓国	共同研究
助手	芦川直子	2005/11/7	2005/11/13	ポルトガル	ITPA 会合に出席
助教授	尾崎 哲	2004/4/15	2004/4/24	アメリカ	研究打ち合わせ, 第 15 回高温プラズマ計測会議に出席
助教授	Peterson Byron Jay	2004/4/20	2004/4/22	韓国	日韓核融合研究協力に関する専門家会合出席
助教授	久保 伸	2004/5/16	2004/5/22	ロシア	第 13 回 ECE と ECH に関する国際会議に出席
助教授	廣岡慶彦	2004/5/22	2004/5/31	アメリカ	日米 研究者派遣
助教授	森崎友宏	2004/5/23	2004/5/30	アメリカ	第 16 回 PSI
助教授	佐久間良一	2004/5/24	2004/5/28	スペイン	国際放射線防護学会
助教授	藤澤彰英	2004/6/26	2004/7/4	イギリス	第 31 回ヨーロッパ物理会議に出席
助教授	榊原 悟	2004/6/27	2004/7/4	イギリス	第 31 回プラズマ物理学に関する欧州国際会議に出席
助教授	市口勝治	2004/6/27	2004/7/3	イギリス	第 31 回ヨーロッパ物理会議に出席
助教授	富田幸博	2004/7/2	2004/7/10	ロシア	第 5 回プラズマ閉じ込めのための開放端系磁場システム国際会議に出席

助教授	長坂琢也	2004/7/25	2004/8/22	アメリカ	日米 研究者派遣
助教授	Peterson Byron Jay	2004/8/25	2004/8/28	韓国	日韓セミナーに出席
助教授	河野孝央	2004/9/10	2004/9/19	ドイツ	第7回トリチウム科学技術国際会議 出席、発表
助教授	廣岡慶彦	2004/9/13	2004/9/18	アメリカ	核融合エネルギー工学に関するトピ カルミーティングに出席
助教授	榊原 悟	2004/9/14	2004/9/19	フランス	第3回データ妥当性に関するワーク ショップに出席
助教授	山田修一	2004/9/18	2004/9/26	イタリア	第23回核融合技術に関する国際シン ポジウムに出席
助教授	田中基彦	2004/9/21	2004/10/1	アメリカ	分子物質における静電効果の研究
助教授	柳 長門	2004/10/3	2004/10/15	アメリカ	応用超伝導会議 (ASC2004) , 日米 WS に出席
助教授	田中雅慶	2004/10/22	2004/10/29	フランス	第12回プラズマ物理国際会議に出席
助教授	久保 伸	2004/10/24	2004/10/31	フランス	第12回プラズマ物理国際会議に出席
助教授	藤澤彰英	2004/10/30	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	Peterson Byron Jay	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	渡邊清政	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	下妻 隆	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	渡邊智彦	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	藤堂 泰	2004/10/31	2004/11/8	ポルトガル	IAEA
助教授	廣岡慶彦	2004/10/31	2004/11/6	ポルトガル	IAEA
助教授	長坂琢也	2004/10/31	2004/11/9	ポルトガル	IAEA
助教授	田島輝彦	2004/12/1	2004/12/5	中国	拠点大学交流事業
助教授	森崎友宏	2004/12/9	2004/12/16	中国	拠点大学交流事業
助教授	藤澤彰英	2004/12/15	2004/12/22	中国	拠点大学交流事業
助教授	廣岡慶彦	2005/1/30	2005/2/7	インド	IAEA-TCM 情報収集
助教授	山田修一	2005/2/20	2005/2/27	中国	拠点大学交流事業
助教授	力石浩孝	2005/3/5	2005/3/10	中国	拠点大学交流事業
助教授	Peterson Byron Jay	2005/3/12	2005/3/20	イギリス	第8回 ITPA 計測グループ 会合に出席
助教授	下妻 隆	2005/3/21	2005/3/26	中国	拠点大学交流事業
助教授	藤堂 泰	2005/3/22	2005/4/11	アメリカ	日米 研究者派遣・WS
助教授	尾崎 哲	2005/3/28	2005/4/4	アメリカ	日米 研究者派遣
研究員	松原章浩	2004/5/23	2004/5/30	アメリカ	PSI
研究員	小渕 隆	2004/6/27	2004/7/3	イギリス	第31回プラズマ物理学に関する欧州 国際会議に出席
研究員	小渕 隆	2004/8/25	2004/8/28	韓国	日韓セミナーに出席
研究員	PAVLICHENKO, R. O.	2004/10/24	2004/11/9	フランス	ICPP 国際会議に出席, 共同研究
研究員	糟谷直宏	2004/11/11	2004/11/20	アメリカ	APS
研究員	糟谷直宏	2005/2/28	2005/3/11	イタリア	IAEA テクニカルミーティング, 研究 打ち合わせ
研究員	宋美英	2005/3/9	2005/3/14	中国	拠点大学交流事業
研究員	数納広哉	2005/3/9	2005/3/14	中国	拠点大学交流事業

平成 17 年度

職名	氏名	出国日	帰国日	行き先	用務
助手	後藤基志	2004/12/12	2005/9/28	ドイツ	在外研究員
助手	横山雅之	2005/3/23	2006/1/23	オーストラリア	在外研究員
助手	芦川直子	2005/4/4	2005/4/8	アメリカ	日米 WS
助手	長壁正樹	2005/4/5	2005/4/11	アメリカ	日米 WS
助手	伊藤 淳	2005/4/5	2005/4/11	アメリカ	日米 WS
助手	吉村泰夫	2005/4/30	2005/5/9	イタリア	I T E R I T P A T G, EP meeting 出席
助手	徳澤季彦	2005/5/7	2005/5/14	ドイツ	第 7 回国際反射計 WS, ITPA SWG
助手	加藤太治	2005/5/22	2005/5/27	オーストラリア	IAEA TM
助手	宮沢順一	2005/6/26	2005/7/3	スペイン	EPS
助手	秋山毅志	2005/6/26	2005/7/3	スペイン	EPS
助手	成嶋吉朗	2005/6/26	2005/7/3	スペイン	EPS
助手	斉藤健二	2005/6/26	2005/7/3	スペイン	EPS
助手	芦川直子	2005/7/3	2005/7/9	スペイン	ITPA
助手	舟場久芳	2005/7/9	2005/7/18	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	江本雅彦	2005/7/10	2005/7/17	ハンガリー	IAEA TCM 出席
助手	田村直樹	2005/7/10	2005/7/17	アメリカ	研究打ち合わせ
助手	中西秀哉	2005/7/10	2005/8/1	ハンガリー	特定国派遣研究者による共同研究実施
助手	伊神弘恵	2005/7/23	2005/8/2	ロシア	第 6 回プラズマ中の高周波マイクロ波に関する国際ワークショップ 参加
助手	大舘 暁	2005/7/26	2005/7/30	中国	拠点大学交流事業
助手	津守克嘉	2005/7/26	2005/7/30	中国	拠点大学交流事業
助手	徳澤季彦	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	斉藤健二	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	吉村泰夫	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	濱口真司	2005/8/28	2005/9/4	アメリカ	低温工学学会出席
助手	池田勝則	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	永岡賢一	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	妹尾和威	2005/8/28	2005/9/1	韓国	APFA 出席
助手	渡邊智彦	2005/8/29	2005/9/4	中国	第 4 回非線形プラズマ科学 WS と国際学校 参加
助手	庄司 主	2005/8/30	2005/9/1	韓国	日韓原子分子データ共同セミナー
助手	岩本晃史	2005/9/4	2005/9/11	フランス	2005 年慣性核融合科学とその応用に関する国際会議に出席
助手	田村 仁	2005/9/10	2005/9/17	オーストラリア	第 7 回欧州応用超伝導会議に出席
助手	津守克嘉	2005/9/11	2005/9/18	フランス	第 11 回国際中性源会議への出席と招待講演発表
助手	西浦正樹	2005/9/12	2005/9/17	フランス	第 11 回中性源国際会議に出席
助手	妹尾和威	2005/9/17	2005/9/26	イタリア	第 19 回磁石技術国際会議
助手	小林政弘	2005/9/25	2006/3/25	ドイツ	大学教育の国際化推進プログラム
助手	秋山毅志	2005/9/25	2005/10/1	アメリカ	第 12 回プラズマ物理国際会議に出席
助手	稲垣 滋	2005/9/26	2005/10/8	ロシア	第 10 回 H モードワークショップ、ITPA 会議
助手	南 貴司	2005/9/26	2005/10/8	ロシア	H モード WS, ITPA TM
助手	濱口真司	2005/9/26	2006/3/26	フランス	大学教育の国際化推進プログラム
助手	吉沼幹朗	2005/9/26	2005/10/2	ロシア	会議 H-mode Workshop への参加

助手	鈴木康浩	2005/9/30	2006/3/31	ドイツ	大学教育の国際化推進プログラム
助手	磯部光孝	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第15回国際ステラレータWS
助手	宮沢順一	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第15回国際ステラレータWS
助手	三浦英昭	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第15回国際ステラレータWS
助手	加藤太治	2005/10/9	2005/10/13	オーストリア	IAEA TM
助手	石崎龍一	2005/10/21	2005/10/30	アメリカ	APS
助手	登田慎一郎	2005/10/22	2005/10/30	アメリカ	APS
助手	吉村信次	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	APS
助手	大舘 暁	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	APS
助手	西浦正樹	2005/10/23	2005/10/29	アメリカ	APS
助手	永岡賢一	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	APS
助手	田中照也	2005/11/6	2005/12/5	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	南 貴司	2005/12/20	2005/12/23	韓国	日韓 WS
助手	芦川直子	2006/1/8	2006/1/14	中国	拠点大学交流事業
助手	三浦英昭	2006/1/25	2006/3/10	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	渡邊智彦	2006/1/29	2006/2/4	アメリカ	研究打ち合わせ
助手	吉村信次	2006/2/19	2006/3/2	アメリカ	大学教育の国際化推進プログラム
助手	田中照也	2006/2/22	2006/3/5	アメリカ	研究打ち合わせ
助手	斉藤健二	2006/2/27	2006/3/4	中国	拠点大学交流事業
助手	田村 仁	2006/3/7	2006/3/16	ドイツ	国際的研究拠点形成事業
助手	田村直樹	2006/3/12	2006/3/26	アメリカ	研究打ち合わせ
助手	大舘 暁	2006/3/13	2006/3/18	アメリカ	日米 研究者派遣
助手	山岸 統	2006/3/13	2006/3/18	アメリカ	日米 WS
助手	石崎龍一	2006/3/13	2006/3/18	アメリカ	日米 WS
助手	石澤明宏	2006/3/13	2006/3/18	アメリカ	日米 WS
助手	斉藤健二	2006/3/14	2006/3/17	韓国	日韓 共同研究
助手	長壁正樹	2006/3/15	2006/3/23	スペイン	国際的研究拠点形成事業
助手	菱沼良光	2005/9/16	2005/9/24	イタリア	第19回磁石技術国際会議
助教授	藤堂 泰	2005/3/22	2005/4/11	アメリカ	日米 研究者派遣
助教授	富田幸博	2005/4/4	2005/4/8	アメリカ	日米 WS
助教授	久保 伸	2005/4/10	2005/4/15	アメリカ	日米 WS
助教授	関 哲夫	2005/4/10	2005/4/15	アメリカ	16th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas に出席
助教授	富田幸博	2005/5/18	2005/5/22	アメリカ	日米 WS
助教授	Peterson Byron Jay	2005/6/6	2005/6/7	韓国	日韓核融合協力打合せ
助教授	市口勝治	2005/6/8	2005/6/29	アメリカ	日米 研究者派遣
助教授	下妻 隆	2005/6/14	2005/6/20	アメリカ	日米 WS
助教授	柳 長門	2005/6/17	2005/6/25	オーストリア	IAEA Topical Meeting
助教授	藤堂 泰	2005/7/2	2005/7/8	スペイン	第6回国トカマク物理活動MHDトピカルグループ 会合
助教授	田中雅慶	2005/7/16	2005/7/22	オランダ	第27回電離気体国際会議出席
助教授	森崎友宏	2005/7/26	2005/7/30	中国	拠点大学交流事業
助教授	田中謙治	2005/7/26	2005/7/30	中国	拠点大学交流事業
助教授	富田幸博	2005/7/26	2005/7/30	中国	拠点大学交流事業
助教授	関 哲夫	2005/8/8	2005/8/13	韓国	日韓 研究者派遣
助教授	前川龍司	2005/8/28	2005/9/4	アメリカ	低温工学学会出席
助教授	田中基彦	2005/8/28	2005/8/31	韓国	APFA

助教授	尾崎 哲	2005/8/30	2005/9/1	韓国	日韓セミナーに出席
助教授	尾崎 哲	2005/9/3	2005/9/11	ポーランド	研究打ち合わせ, プラズマ 2005 国際会議
助教授	山田修一	2005/9/9	2005/9/17	オーストリア	第 7 回欧州応用超伝導会議に出席
助教授	力石浩孝	2005/9/11	2005/9/16	ドイツ	第 1 1 回欧州パワエレ応用会議に出席
助教授	藤澤彰英	2005/9/26	2005/10/2	ロシア	第 1 0 回Hモード物理と輸送障壁に関する国際原子力機関専門会議に出席
助教授	森崎友宏	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	増崎 貴	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	榊原 悟	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	田中謙治	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	下妻 隆	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	関 哲夫	2005/10/2	2005/10/9	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
助教授	Peterson Byron Jay	2005/10/9	2005/10/14	韓国	ITPA
助教授	富田幸博	2005/10/16	2005/10/21	ドイツ	第 10 回核融合装置における周辺プラズマ理論に関する国際会議に出席
助教授	関 哲夫	2005/10/20	2005/10/25	韓国	日韓 WS
助教授	Peterson Byron Jay	2005/10/22	2005/11/2	アメリカ	APS, 研究打ち合わせ
助教授	坂本隆一	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	APS
助教授	田島輝彦	2005/10/28	2005/11/5	南アフリカ	物理と持続的発展に関する世界会議
助教授	田中基彦	2005/11/27	2005/12/9	アメリカ	日米 研究者派遣
助教授	長坂琢也	2005/12/4	2005/12/11	アメリカ	核融合炉材料国際会議
助教授	富田幸博	2005/12/11	2005/12/18	アメリカ	日米 WS
助教授	田中基彦	2005/12/17	2005/12/22	アメリカ (ハワイ)	ハワイ観測所視察, 2005 環太平洋科学会議に出席
助教授	下妻 隆	2006/2/25	2006/3/5	ドイツ	国際的研究拠点形成事業
研究員	宋美英	2005/8/28	2005/9/2	韓国	APFA 出席, 日韓セミナー
研究員	松本新功	2005/9/10	2005/9/18	フランス	第 11 回イオン源国際会議
研究員	松原章浩	2005/9/11	2005/9/16	イタリア	第 10 回マイクロ波および高周波による加熱に関する国際会議
研究員	ゴンチャロフ パベル	2005/10/1	2005/10/10	スペイン	第 15 回国際ステラレータ WS
研究員	野竹孝志	2005/10/20	2005/10/25	韓国	日韓 WS
研究員	山口聡一郎	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	APS
研究員	姚振宇	2006/2/15	2006/2/25	ドイツ	国際的研究拠点形成事業

平成 18 年度

職名	氏名	出国日	帰国日	行先	用務
助手	井戸 毅	2006/4/23	2006/4/29	アメリカ	ITPA 輸送トピカルグループ会合出席
助手	徳澤季彦	2006/5/6	2006/5/13	アメリカ	第 1 6 回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
助手	秋山毅志	2006/5/7	2006/5/13	アメリカ	第 1 6 回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
助手	吉村泰夫	2006/5/7	2006/5/15	ギリシャ	第 1 4 回電子サイクロトロン放射と電子サイクロトロン共鳴加熱における合同ワークショップ出席

助手	西浦正樹	2006/5/7	2006/5/12	アメリカ	第16回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
助手	小林政弘	2006/5/21	2006/5/27	中国	第17回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助手	庄司 主	2006/5/21	2006/5/27	中国	第17回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助手	芦川直子	2006/5/21	2006/5/27	中国	第17回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席，研究打合せ
助手	齋藤健二	2006/5/21	2006/5/27	中国	第17回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助手	後藤基志	2006/5/28	2006/6/4	ドイツ	第4回データ評価ワークショップ
助手	鈴木千尋	2006/6/18	2006/6/25	イタリア	第33回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助手	稲垣 滋	2006/6/18	2006/6/25	イタリア	第33回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助手	磯部光孝	2006/6/18	2006/6/25	ドイツ	損失 α 粒子計測システムに関する検討
助手	西浦正樹	2006/6/18	2006/6/25	ドイツ	損失 α 粒子計測システムに関する検討
助手	井戸 毅	2006/6/18	2006/6/25	イタリア	第33回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助手	伊神弘恵	2006/7/5	2006/7/8	韓国	プラズマ加熱・電流駆動物理に関するワークショップ出席
助手	笠原寛史	2006/7/5	2006/7/8	韓国	プラズマ加熱・電流駆動物理に関するワークショップ出席
助手	濱口真司	2006/7/16	2006/7/23	チェコ	第21回国際低温工学会議出席
助手	石澤明宏	2006/8/15	2006/8/17	韓国	磁気核融合プラズマの理論とシミュレーションに関するワークショップ出席
助手	妹尾和威	2006/8/27	2006/9/3	アメリカ	国際応用超伝導会議(ASC2006)出席
助手	菱沼良光	2006/8/27	2006/9/3	アメリカ	国際応用超伝導会議(ASC2006)出席
助手	長壁正樹	2006/9/3	2006/9/8	アメリカ	PPPL との国際研究拠点形成事業打合せ
助手	中西秀哉	2006/9/10	2006/9/17	ポーランド	第24回核融合技術に関するシンポジウム (SOFT) 出席
助手	田中将裕	2006/9/24	2006/10/1	ドイツ	CECE 法による水素同位体分離に関する実験
助手	高山有道	2006/9/26	2006/10/1	中国	拠点大学交流事業による研究
助手	宮澤順一	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議出席
助手	後藤基志	2006/10/15	2006/10/22	フランス	原子・分子データとその応用に関する国際会議出席
助手	磯部光孝	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議出席
助手	田村直樹	2006/10/15	2006/10/27	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議，第11回 ITPA 会合出席
助手	大舘 暁	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議出席
助手	齋藤健二	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議出席
助手	登田慎一郎	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回 IAEA 核融合エネルギー会議

					出席
助手	岩本晃史	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議 出席
助手	吉沼幹朗	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議 出席
助手	石澤明宏	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議 出席
助手	石崎龍一	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議 出席
助手	田中照也	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー 会議出席
助手	坂上裕之	2006/10/16	2006/10/21	フランス	LHD と Solar-B 衛星による非平衡プラズマの研究
助手	加藤大治	2006/10/16	2006/10/21	フランス	第5回原子分子データとその応用に関する国際会議 (ICAMDATA) 出席
助手	吉村信次	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席
助手	永岡賢一	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席
助手	伊藤 淳	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席
助手	大谷寛明	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席
助手	芦川直子	2006/11/5	2007/11/11	カナダ	ITPA 会合 (SOL, ダイバータ) 出席,
助手	小林政弘	2006/11/12	2006/11/17	アメリカ	第17回
助手	南 貴司	2006/11/12	2006/11/17	アメリカ	日米ワークショップ「先進ヘリカル閉じ込め研究の新しいアプローチ」出席
助手	田中将裕	2006/11/19	2006/11/26	ドイツ	CECE 法による水素同位体分離に関する実験
助手	登田慎一郎	2006/12/14	2006/12/20	中国	拠点大学交流事業による共同研究
助手	伊藤 淳	2007/1/21	2007/1/28	アメリカ	共同研究
助手	加藤大治	2007/1/28	2007/2/4	中国	拠点大学交流事業
助手	大谷寛明	2007/1/31	2007/3/31	アメリカ	日米JIFITによる共同研究
助手	池田勝則	2007/2/1	2007/5/2	ドイツ	長寿命RFイオン源の開発とイオン源プラズマの分光的手法の確立
助手	永岡賢一	2007/2/19	2007/3/9	ドイツ	NBI イオン源分光計測に関する共同研究
助手	南 貴司	2007/2/25	2007/2/28	韓国	日韓核融合協力に基づくワークショップ出席
助手	西浦正樹	2007/2/25	2007/2/28	韓国	日韓核融合協力事業
助手	石澤明宏	2007/3/1	2007/5/29	アメリカ	総研大海外先進教育研究実践支援制度に基づく共同研究
助手	西村 伸	2007/3/3	2007/6/1	アメリカ	総研大海外先進教育研究実践支援制度に基づく研究
助手	岩本晃史	2007/3/4	2007/3/10	アメリカ	IFE ターゲットの製造, 射出, トラッキングに関する第4回日米ワークショップ
助手	加藤大治	2007/3/7	2007/3/10	韓国	高密度プラズマでの輻射過程に関する共同研究
助手	南 貴司	2007/3/11	2007/3/16	ドイツ	VUV 望遠鏡についての共同研究打合せ
助手	宮澤順一	2007/3/12	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業による共同研究
助手	庄司 主	2007/3/13	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業に基づくワークショップ出席

助手	徳澤季彦	2007/3/13	2007/3/16	中国	
助手	山田一博	2007/3/13	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業に基づくワークショップ出席
助手	津守克嘉	2007/3/13	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業による共同研究
助手	清水昭博	2007/3/13	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業による共同研究及び研究会出席
助手	田村直樹	2007/3/17	2007/3/31	アメリカ	N S T X 実験研究
助手	宇佐見俊介	2007/3/25	2007/3/31	アメリカ	磁気リコネクションワークショップ出席
助教授	藤堂 泰	2006/1/28	2006/2/15	アメリカ	研究打合せ
助教授	森崎友宏	2006/4/8	2006/4/14	アメリカ	第 10 回 ITPA 周辺・ペDESTal 物理グループ会議出席
助教授	高山定次	2006/5/14	2006/5/22	ドイツ	マイクロ波焼成炉のアンテナ設計
助教授	河野孝央	2006/5/14	2006/5/21	フランス	第 2 回欧州 I R P A 放射線防護に関する国際会議
助教授	森崎友宏	2006/5/20	2006/5/29	ウクライナ	第 13 回プラズマ物理国際会議 (ICPP) 出席
助教授	田中謙治	2006/5/20	2006/5/29	ウクライナ	第 13 回プラズマ物理国際会議 (ICPP) 出席
助教授	渡邊清政	2006/5/20	2006/5/29	ウクライナ	第 13 回プラズマ物理国際会議 (ICPP) 出席
助教授	藤澤彰英	2006/5/20	2006/5/29	ウクライナ	第 13 回プラズマ物理国際会議 (ICPP) 出席
助教授	Peterson	2006/5/21	2006/5/27	中国	第 17 回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助教授	増崎 貴	2006/5/21	2006/5/27	中国	第 17 回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助教授	富田幸博	2006/5/21	2006/5/31	中国	第 17 回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議, ダイバータに関連した国際会議 出席
助教授	廣岡慶彦	2006/5/21	2006/5/26	中国	第 17 回制御熱核融合装置におけるプラズマ・表面相互作用に関する国際会議出席
助教授	山西弘城	2006/6/10	2006/6/18	スウェーデン	中性子線量測定第 10 回シンポジウム (NEUDOS10) 出席
助教授	久保 伸	2006/6/17	2006/6/25	イタリア	第 33 回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助教授	榊原 悟	2006/6/18	2006/6/25	イタリア	第 33 回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助教授	坂本隆一	2006/6/18	2006/6/25	イタリア	第 33 回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
助教授	山田修一	2006/6/19	2006/6/22	中国	日中拠点大学交流事業コーディネーター会議出席
助教授	Peterson	2006/6/22	2006/6/24	韓国	日韓核融合協力事業に基づく研究打合せ
助教授	前川龍司	2006/7/16	2006/7/23	チェコ	第 21 回国際低温工学会議出席
助教授	廣岡慶彦	2006/7/16	2006/7/22	アメリカ	共同研究打合せ
助教授	増崎 貴	2006/8/26	2006/9/3	セルビア	第 23 回電離気体物理に関する夏の学校及びシンポジウム (SPIG) 出席
助教授	渡邊智彦	2006/8/26	2006/9/2	イタリア	核融合プラズマ理論ワークショップ出席
助教授	三浦英昭	2006/8/26	2006/9/2	イタリア	核融合プラズマ理論ワークショップ

					出席
助教授	柳 長門	2006/8/27	2006/9/3	アメリカ	2006年超伝導応用会議(ASC2006)出席
助教授	田中謙治	2006/9/5	2006/9/10	ロシア	国際拠点ネットワーク形成共同研究に関する議論
助教授	山田修一	2006/9/9	2006/9/17	ポーランド	第24回核融合技術に関するシンポジウム(SOFT)出席
助教授	高畑一也	2006/9/9	2006/9/17	ポーランド	第24回核融合技術に関するシンポジウム出席
助教授	尾崎 哲	2006/9/9	2006/9/15	ポーランド	第24回核融合技術に関するシンポジウム(SOFT)出席
助教授	廣岡慶彦	2006/9/10	2006/9/13	韓国	新規共同研究打合せ
助教授	下妻 隆	2006/9/17	2006/9/23	中国	第31回赤外とミリ波, 及び第14回テラヘルツエレクトロニクスに関する合同国際会議出席
助教授	榊原 悟	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEAIAEA核融合エネルギー会議出席
助教授	増崎 貴	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議出席
助教授	藤澤彰英	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議出席
助教授	渡邊智彦	2006/10/15	2006/10/22	中国	第21回IAEA核融合エネルギー会議出席
助教授	森崎友宏	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席
助教授	渡邊清政	2006/11/6	2006/11/10	アメリカ	Active control of MHD Stability:Active MHD Control in ITER 研究会出席
助教授	廣岡慶彦	2006/11/12	2006/11/19	アメリカ	第17回ANS-TOFE会議(核融合工學トピカルミーティング)
助教授	長坂琢也	2006/11/12	2006/11/18	アメリカ	第17回ANS-TOFE会議(核融合工學トピカルミーティング)
助教授	高山定次	2006/11/15	2006/11/25	ドイツ	研究打合せ, 国際シンポジウム, 見本市参加
助教授	関 哲夫	2007/1/2	2007/1/8	中国	拠点大学交流事業による共同研究
助教授	渡邊智彦	2007/1/9	2007/1/14	アメリカ	日米JIF Tワークショップ出席
助教授	山田修一	2007/1/28	2007/2/4	中国	拠点大学交流事業
助教授	坂本隆一	2007/2/27	2007/3/14	フランス	固体水素ペレットの定常粒子供給法に関する比較調査
助教授	下妻 隆	2007/3/5	2007/3/11	スイス, ドイツ	国際共同研究ネットワーク形成による派遣
助教授	榊原 悟	2007/3/25	2007/3/30	アメリカ	国際共同研究拠点ネットワークの打合せ
研究員	H. Parchamy	2006/5/6	2006/5/13	アメリカ	第16回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
研究員	山口総一郎	2006/5/7	2006/5/13	アメリカ	第16回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
研究員	ゴンチャロフ・パベル	2006/5/7	2006/5/13	アメリカ	第16回高温プラズマ計測に関するトピカルコンファレンス
研究員	クライブ・マイケル	2006/6/16	2006/6/30	イタリア	第33回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会出席
研究員	辺見 努	2006/8/27	2006/9/3	アメリカ	国際応用超伝導会議(ASC2006)出席
研究員	中野治久	2006/10/29	2006/11/5	アメリカ	第48回米国物理学会・プラズマ物理分科会年会出席

研究員	大石鉄太郎	2006/11/12	2006/11/17	アメリカ	第2回日米・京都大学21COE 合同シンポジウム出席
研究員	山本 聡	2007/3/3	2007/3/11	スペイン	TJ-II (CIEMAT)におけるアルフベン固有モードに関する研究打合せ
研究員	クライブ・マイケル	2007/3/13	2007/3/16	中国	拠点大学交流事業による研究

平成 19 年度

職名	氏名	出国日	帰国日	行先	用務
助教	芦川直子	2007/5/6	2007/5/13	ドイツ	ITPA 会合への出席, 及び発表
助教	鈴木千尋	2007/7/2	2007/7/8	ポーランド	欧州物理学会出席
助教	小林政弘	2007/8/25	2007/9/9	ドイツ	マックスプランク研究所研究所との周辺輸送に関する共同研究の打合せ
助教	芦川直子	2007/9/9	2007/9/16	アメリカ	日米協力によるG A訪問
助教	芦川直子	2007/10/22	2007/10/27	中国	9th China-Japan Symposium への参加及び日中協力に関する打合せ
助教	吉村信次	2007/11/10	2007/11/18	アメリカ	第49回米国物理学会 (APS DPP) 参加・ポスター発表
助教	時谷政行	2007/12/9	2007/12/16	フランス	第13回核融合材料国際会議への参加・発表
助教	西浦正樹	2007/4/3	2007/4/27	フランス	損失高エネルギーイオン計測データ解析と分光データ解析
助教	田村直樹	2007/4/16	2007/4/22	アメリカ	第12回 US-EU 輸送タスクフォース研究会出席
助教	徳澤季彦	2007/4/30	2007/5/7	ロシア	第8回国際反射計ワークショップ
助教	南 貴司	2007/5/6	2007/5/12	ドイツ	ITPA ドイツ会議出席
助教	伊神弘恵	2007/5/6	2007/5/11	アメリカ	第17回プラズマ中の高周波電力に関するトピカル会議出席
助教	齋藤健二	2007/5/6	2007/5/11	アメリカ	第17回プラズマ中の高周波電力に関するトピカル会議出席
助教	舟場久芳	2007/6/2	2007/6/9	ドイツ	第2回CWGMへの参加
助教	鈴木康浩	2007/6/2	2007/6/10	ドイツ	第2回国際ステラレータワークショップ
助教	永岡賢一	2007/6/10	2007/8/8	ドイツ	高性能NBI 開発に関する共同研究
助教	笠原寛史	2007/6/30	2007/7/8	ポーランド	第34回 ヨーロッパ物理学会出席
助教	濱口真司	2007/7/15	2007/7/22	アメリカ	CEC 2007 出席・口頭発表
助教	清水昭博	2007/7/15	2007/7/22	フランス	ITER Summer School に出席
助教	佐藤雅彦	2007/7/15	2007/7/22	フランス	第1回 ITER Summer School
助教	岩本晃史	2007/7/28	2007/8/3	中国	2007年度 ターゲット材料に関する日中セミナー
助教	大舘 暁	2007/8/6	2007/8/16	タイ	タイ科学技術週間における展示会の出展及び準備
助教	永岡賢一	2007/8/12	2007/8/18	韓国	高性能NBI 開発に関する共同研究
助教	吉村泰夫	2007/8/15	2007/8/18	韓国	プラズマ加熱・電流駆動装置に関するワークショップ出席
助教	笠原寛史	2007/8/15	2007/8/18	韓国	プラズマ加熱・電流駆動装置に関するワークショップ出席
助教	尾花哲浩	2007/8/26	2007/9/1	アメリカ	MT20 (第20回磁石技術国際会議)

					への出席・発表
助教	津守克嘉	2007/8/26	2007/9/1	韓国	第12回国際イオン源会議出席及び 同会議役員業務執行
助教	池田勝則	2007/8/26	2007/9/1	韓国	第12回国際イオン源会議出席及び 研究発表
助教	妹尾和威	2007/8/26	2007/9/2	アメリカ	国際マグネット技術会議 (MT-20) 出席
助教	西浦正樹	2007/8/27	2007/8/31	韓国	HIBP 高時間空間分解密度分布計測に 関する成果発表
助教	菱沼良光	2007/9/14	2007/9/22	ベルギー	第8回欧州応用超伝導会議にて研究 成果発表
助教	田村 仁	2007/9/15	2007/9/22	ベルギー	第8回欧州応用超伝導会議へ出席及 び研究発表
助教	近藤正聡	2007/9/30	2007/10/6	ドイツ	2007 年核融合炉工学技術シンポジウ ム (ISFNT-8) 出席
助教	田中照也	2007/9/30	2007/10/7	ドイツ	国際会議・第8回 ISFNTへの参 加
助教	田中将裕	2007/9/30	2007/10/15	ドイツ	第8回 ISFNTへの参加とポス ター発表
助教	加藤大治	2007/10/2	2007/10/7	オーストリア	19回 Meeting of the Atomic and Molecular Data and ALADDIN Network に出席
助教	磯部光孝	2007/10/6	2007/10/14	ドイツ	高速粒子に関する IAEA 専門家会 議及び ITPA 会議出席
助教	永岡賢一	2007/10/6	2007/10/12	ドイツ	IAEA-TM on Energetic Partially Confinement Systems へ の参加
助教	長壁正樹	2007/10/7	2007/10/13	ドイツ	IAEA TM on Energetic Particles in Magnetically Confinement Systems への参加
助教	大谷寛明	2007/10/7	2007/10/18	アメリカ	シミュレーション科学に関する日米 ワークショップとプラズマ数値シミ ュレーション国際会議 (ICNSP 200 7) に出席及び共同研究の実施
助教	宇佐見俊介	2007/10/7	2007/10/14	アメリカ	国際会議 US-Japan Simulation Science Workshop 及び ICNSP に 出席する
助教	坂上裕之	2007/10/8	2007/10/13	中国	日中セミナー (AMP 2007)
助教	加藤大治	2007/10/16	2007/10/21	オーストリア	The first research coordination meeting on "Data for surface composition dynamics relevant to erosion processes" に出席
助教	田中将裕	2007/10/21	2007/11/4	ドイツ	CCE法による水素同位体分離に 関する実験
助教	山岸 統	2007/11/11	2007/11/17	アメリカ	APS 会議出席
助教	大舘 暁	2007/11/14	2007/11/24	中国	西南物理研究所での共同研究
助教	田村祐一	2007/11/27	2007/12/2	デンマーク	ICAT 2007 出席及び発表
助教	鈴木康浩	2007/12/1	2007/12/8	インド	第6回 APFA 国際会議に出席, 理 事会に参加
助教	登田慎一郎	2008/1/16	2008/2/8	アメリカ	研究打合せ
准教授	三浦英昭	2007/3/5	2007/3/21	アメリカ	分野間連携プロジェクト共同研究
准教授	田中謙治	2007/5/6	2007/5/12	スイス	ITPA 会議出席
准教授	井口春和	2007/5/9	2007/5/14	ドイツ	第12回日独国際シンポジウム
准教授	森崎友宏	2007/5/13	2007/5/18	韓国	第5回 磁場核融合装置の IAEA 技術

					会議出席
准教授	Peterson	2007/5/13	2007/5/17	韓国	第5回 IAEA テクニカルミーティングに出席
准教授	久保 伸	2007/5/13	2007/5/17	韓国	第5回「磁気核融合装置の定常運転」に関する会議出席
准教授	関 哲夫	2007/5/13	2007/5/17	韓国	The 5th IAEA Technical Meeting on Steady State Operations of Magnetic Fusion devices 出席
准教授	柳 長門	2007/5/13	2007/5/18	韓国	第5回 IAEA 技術会議出席
准教授	横山雅之	2007/5/23	2007/6/9	ドイツ	ヘリカル系輸送障壁物理に関する共同解析及び作業会
准教授	榊原 悟	2007/6/2	2007/6/10	ドイツ	ステラレーターファイルデータベースに関する第2回打合せに出席
准教授	Peterson	2007/6/13	2007/6/15	韓国	日韓 KSTER 協力事業の打合せ
准教授	榊原 悟	2007/6/14	2007/6/16	韓国	日韓 KSTER 協力事業の打合せ
准教授	田中謙治	2007/6/14	2007/7/9	ドイツ	テキサトル協定派遣プログラム
准教授	Peterson	2007/6/17	2007/6/23	アメリカ	SOFEO7に参加
准教授	市口勝治	2007/6/24	2007/7/1	アメリカ	ヘリオトロンプラズマにおける圧力駆動型モードの非線型MHD解析に関する研究打合せ
准教授	下妻 隆	2007/7/1	2007/7/8	ポーランド	科研費基盤研究遂行のための情報収集と技術交流
准教授	富田幸博	2007/7/7	2007/7/12	ポーランド	第1回「核融合プラズマにおける微粒子に関するワークショップ」に出席
准教授	坂本隆一	2007/7/15	2007/7/19	フランス	ITER ペレットワークショップ
准教授	前川龍司	2007/7/15	2007/7/22	アメリカ	低温工学学会出席・発表及び調査研究
准教授	河野孝央	2007/7/17	2007/7/21	韓国	I S O R D - 4 国際会議出席
准教授	横山雅之	2007/8/13	2007/8/21	タイ	タイ科学技術週間における展示会の出展及び準備
准教授	岡 良秀	2007/8/26	2007/9/1	韓国	第12回国際イオン源会議で発表のため
准教授	力石浩孝	2007/9/2	2007/9/7	デンマーク	欧州パワエレ会議に出席
准教授	中村浩章	2007/9/4	2007/9/10	ベルギー	計算物理国際会議 (CCP2007) に出席・発表
准教授	久保 伸	2007/9/8	2007/9/16	ドイツ	TEXTOR等のECRHに関する議論と日米欧ワークショップ出席
准教授	山田修一	2007/9/14	2007/9/22	ベルギー	第8回欧州応用超伝導会議に出席のため
准教授	佐久間洋一	2007/9/17	2007/9/21	アメリカ	第8回トリチウム理工学国際会議に出席
准教授	尾崎 哲	2007/9/23	2007/9/30	イタリア	燃焼プラズマ計測国際会議
准教授	河野孝央	2007/9/28	2007/10/8	ドイツ	I S F N T - 8 に出席
准教授	藤堂 泰	2007/10/6	2007/10/14	ドイツ	高エネルギー粒子に関する第10回 IAEA 専門家会議
准教授	市口勝治	2007/10/21	2007/10/27	中国	プラズマのMHD及び微視的不安定性解析理論の研究に関する研究
准教授	山田修一	2007/10/22	2007/10/27	中国	日中拠点大学によるセミナー (CJS-9) 参加・発表
准教授	田中基彦	2007/11/3	2007/11/9	アメリカ	核融合炉材料のマイクロ波粉末冶金プロセスの研究
准教授	藤澤彰英	2007/11/10	2007/11/17	アメリカ	APS 会議出席と発表

准教授	横山雅之	2007/11/11	2007/11/18	アメリカ	第49回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会での招待講演ならびに議論
准教授	榊原 悟	2007/12/1	2007/12/8	インド	第6回アジアプラズマ核融合学会出席
准教授	森崎友宏	2007/12/1	2007/12/8	インド	第6回アジアプラズマ核融合学会
准教授	関 哲夫	2007/12/1	2007/12/8	インド	間接経費：第6回APFA国際会議に出席，招待講演発表及び講演の聴講を行う 寄付金：インドにおける高周波加熱に関する打合せ
准教授	高山定次	2007/12/4	2007/12/17	スイス ドイツ	若手研究者育成事業によるEMPAとFZK訪問
准教授	長坂琢也	2007/12/9	2007/12/17	フランス	低放射化材料異種溶接・接合及び腐食研究の世界動向調査及び意見交換
准教授	廣岡慶彦	2008/1/27	2008/2/4	アメリカ	日米協力事業
研究員	PAVLICHENKO Rostyslav	2007/7/1	2007/7/15	ポーランド ウクライナ	EPS会議出席
研究員	山口聡一郎	2007/11/11	2007/11/18	アメリカ	米国プラズマ物理学会
研究員	ベシェフ エフゲニ	2007/11/11	2007/11/18	アメリカ	米国プラズマ物理学会

3.2 学生の海外派遣

ここでは総研大学生についてまとめる。核融合研では総研大学生の国際会議派遣に対する支援も行っている。

平成 16 年度

氏名	出国日	帰国日	出張先	用務内容
金場貴宏	2004/4/18	2004/4/24	アメリカ	第 15 回核融合技術に関するトピカル会議
中野治久	2004/4/18	2004/4/24	アメリカ	第 15 回核融合技術に関するトピカル会議
松下啓行	2004/4/18	2004/4/25	アメリカ	第 15 回核融合技術に関するトピカル会議
山口太樹	2004/6/27	2004/7/4	イギリス	European Physical Conference on Plasma Physics
姚 振宇	2004/9/15	2004/9/26	イタリア	23rd Symposium on Fusion Technology
辺見 努	2004/10/3	2004/10/15	アメリカ	日米ワークショップ
山口太樹	2004/11/15	2004/11/19	アメリカ	第 46 回アメリカ物理学会

平成 17 年度

氏名	出国日	帰国日	出張先	用務内容
古賀達也	2005/8/28	2005/8/31	大韓民国	第 5 回アジアプラズマ核融合物理学会
若林英紀	2005/10/23	2005/10/30	アメリカ	アメリカ物理学会プラズマ分科会

平成 18 年度

氏名	出国日	帰国日	出張先	用務内容
片井隆志	2006/5/6	2006/5/13	アメリカ	HTPD2006
土屋隼人	2006/5/6	2006/5/13	アメリカ	HTPD2006
リ ハイリン	2006/9/10	2006/9/17	ポーランド	24th Symposium on Fusion Technology
栗 再新	2006/11/12	2006/11/17	アメリカ	第 17 回核融合技術に関するトピカル会議

平成 19 年度

氏名	出国日	帰国日	出張先	用務内容
仲田資季	2007/7/15	2007/7/22	フランス	1st ITER Summer School
土屋隼人	2007/7/15	2007/7/22	フランス	1st ITER Summer School
バンサル ゴーラブ	2007/8/26	2007/9/1	アメリカ	第 20 回マグネット技術会議出席
Xu Qi	2007/9/28	2007/10/7	ドイツ	8th International Symposium on Fusion Nuclear Technology Conference
石 中兵	2007/11/11	2007/11/17	アメリカ	アメリカ物理学会
チョードーリー マレイ	2007/12/1	2007/12/13	インド	第 6 回アジアプラズマ核融合物理学会

4. 理論データ解析について

シミュレーション、トカマクとの連携の具体例を挙げてほしい。

また「総合力のアップ」とはどのようなことを指すのか。

大型ヘリカル研究部・理論データ解析研究系では「大型ヘリカル装置（LHD）研究」成果報告書 p.176-203 にある通り、LHD実験に密接した研究課題に取り組んでおり、特に高ベータのミッション達成やコア輸送物理テーマの研究の進展に本質的な貢献をしている。実験体制の観点からは、ミッションテーマ「高イオン温度領域の拡大」に理論家である横山准教授がテーマリーダーとして当該研究テーマを牽引していることが象徴的である。シミュレーションが目指しているLHD数値試験炉に代表されるバーチャルではあるが予測性能に優れたパラダイムの確立とLHDというリアリティとの間をつなぐ役割を理論データ解析が果たしていると言える。

いくつか、以下に具体的な事例を挙げる。

新古典拡散理論は3次元系においても完成された理論であり、その実験への適用性がLHDにおいて調べられている。そこでは実際の磁場配位に基づいた理論解析が必要であるが、LHDの多様な実験に逐一对応できる理論データ解析の手法が確立された。これまでに研究によると、熱・粒子輸送については新古典拡散理論よりも優位に大きな輸送があり、異常輸送が認められること、対照的に径電場の形成については、新古典拡散による非両極性拡散条件が実験を良く説明できることが無衝突プラズマにおいて検証されたことはLHD実験と理論の大きな成果である。これによって、シミュレーションがLHD実験および理論グループと協力して進めている統合コードへの組み込みが開始されている。熱・粒子輸送に加えて、同じく新古典拡散によるブートストラップ電流とその抵抗拡散についてLHDにおけるMSE計測による回転変換分布の変化の同定により理論検証が進み、こちらも統合コードへの組み込みが進んでいる。

異常輸送については、実験で明らかにされた異常輸送と実効ヘリカルリップルとの相関をもたらす物理機構の解明と電子ルートによる径電場形成がもたらす内部輸送障壁についての研究が大きく進んでいる。前者ではイオン温度勾配モードの理論解析と大規模なジャイロ運動論シミュレーションを組み合わせる実験観測の説明を試みており、実効ヘリカルリップルの小さな磁場配位では帯状流が効率的に維持されることを示した。このことはLHDに見られる磁気軸内寄せによる閉じ込め改善を理解することに迫っており、今後のヘリカル系プラズマの最適化の大きな指針を示すものと期待される。また、後者においては、新古典拡散により発生した径電場が異常輸送を抑制できることを示した。これらの研究を通してヘリカル系磁場配位によって帯状流の減衰率が変化し、その結果として異常輸送の抑制、閉じ込め改善モードが発現する過程が明らかとなりつつある。この成果はまさに実験、理論、シミュレーションの総合力によるものである。

MHDについても3次元のみならず、磁気面の存在を仮定しない平衡配位の同定が核融合科学研究所で開発されたHINTコードを元に、世界的な標準化が進んでいる。これにもLHDにおける検証が欠かすことのできない動機であり、上記の輸送解析の精密度を保証する確固たる基盤となっている。MHD不安定性、特に圧力駆動型不安定性についてはLHDの実験結果が簡略化したMHDモデルの限界を示し、新しいアプローチの必要性を喚起した。その結果、線形理論においてもプラズマ境界や非圧縮性に関する厳密な議論が進められ、また非線形効果による不安定性の発展についても熱伝導を取り込むなど新たな研究取り組みが開始されている。これらの研

究は球形トラスやトカマクの逆転磁場配位での高ベータプラズマの振る舞いと関連し、基礎的な理解に大きな進展をもたらすであろう。

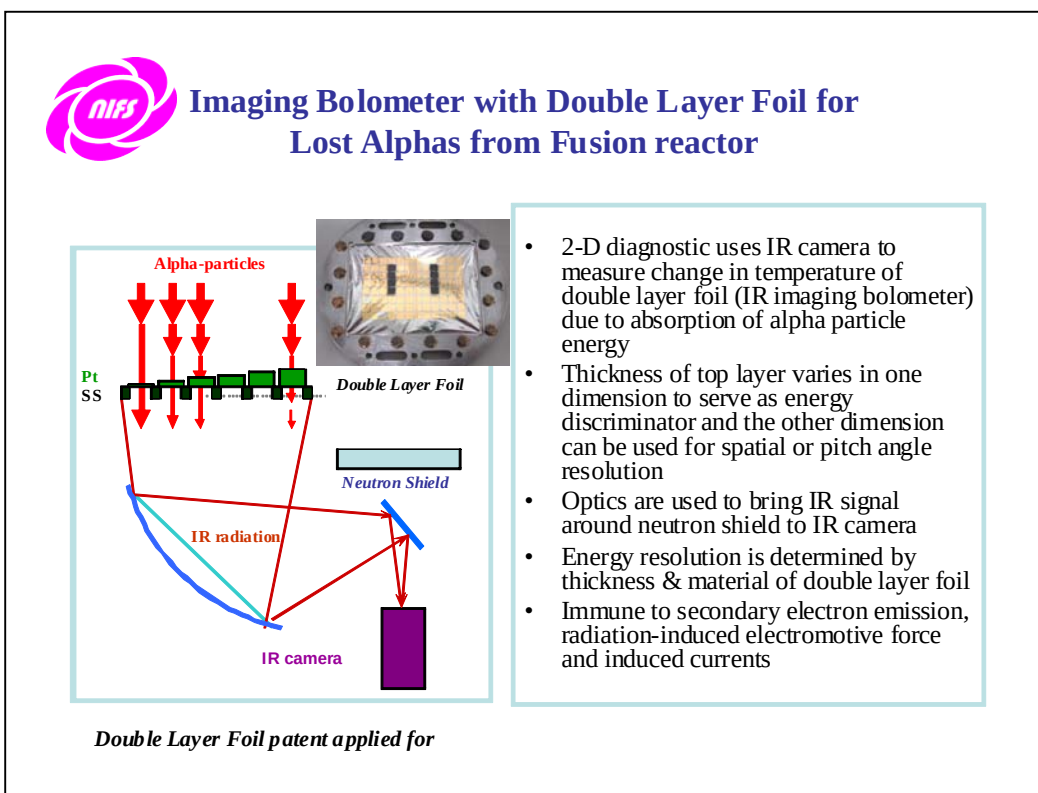
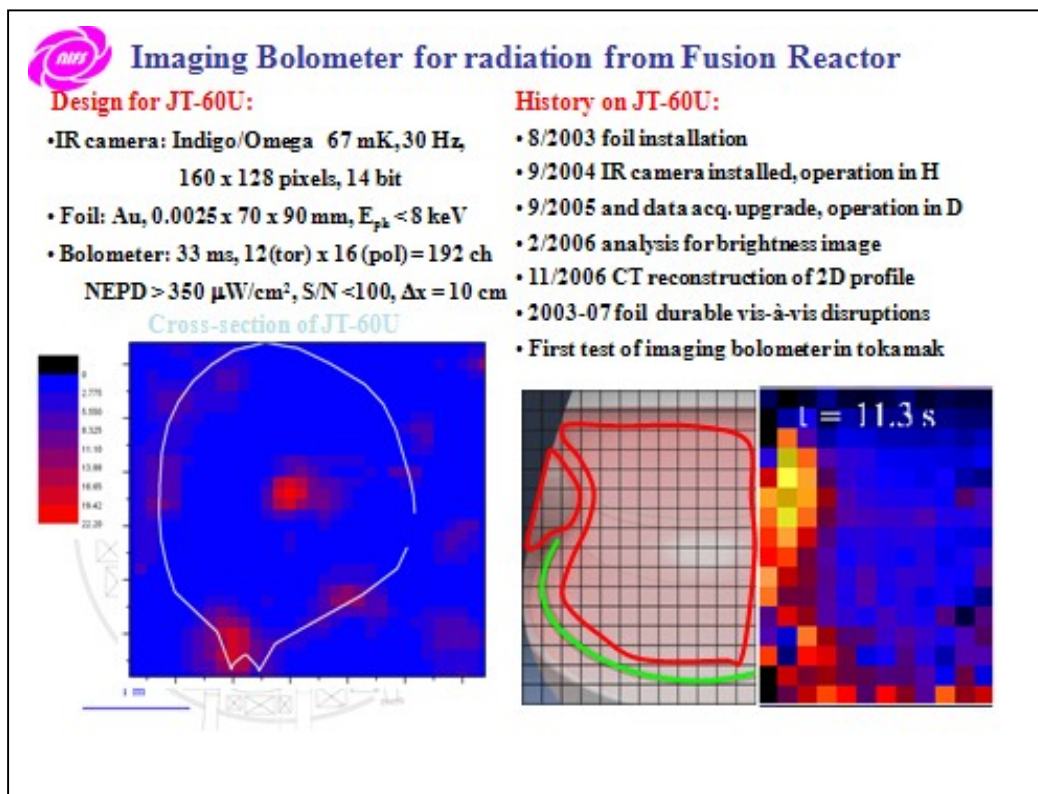
さらに周辺プラズマについても、中性粒子をモンテカルロでプラズマを流体で近似する3次元シミュレーション法がトカマク用のコードから高度化され、LHDでの検証を経て、ITERでのプラズマ立ち上げ時のリミター負荷（トロイダル方向に2箇所なので、3次元の扱いが必須）評価に用いられている。

以上に述べた具体的成果はLHDを中心とした3次元ヘリカル系に関するものであるが、その成果は2次元トカマクを包摂する普遍的な理解をもたらしている。径電場の閉じ込めの影響がヘリカル系から論じられ、トカマクでの輸送現象の説明に応用されたことは記憶に新しい。トカマクにおいても有限個のトロイダルコイルによるリップルの3次元効果がトロイダル回転を通した異常輸送の抑制と抵抗性壁モードの安定化という決定的な課題となっており、その解決に我々の学術基盤に基づいた総合力が貢献するところが大きいと考えられる。

5. ITERに向けた計測器開発

成果報告書 3. 3. 3 8) [165-176 ページ] に記載してある。

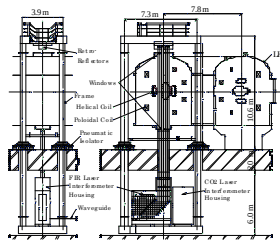
パワーポイントでは省略した内容を以下に示す。



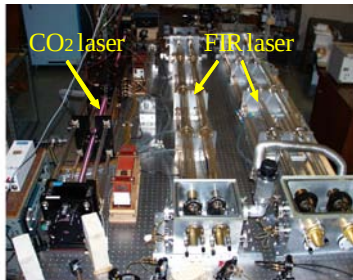


Development of short wavelength laser diagnostics for ITER

FIR Laser Interferometer installed on the LHD



High density plasma $\sim 10^{21} \text{m}^{-3}$



Need of a short wavelength laser
: $\sim 50 \text{ m}$

A new two color interferometer using a short wavelength far infrared laser has been developed for high performance plasmas on LHD and for future fusion devices such as ITER. High power laser lines simultaneously oscillating at 57.2 μm and 47.6 μm were achieved in an CO₂-laser-pumped CH₃OD laser.

cw optically pumped laser

Proposed Polarimeter system for ITER



Large sized plasma

Highest output power in the FIR regime



57-, 48- μm CH₃OD laser



Development of Cotton-Mouton polarimeter for reliable electron density measurement

Interferometer

- High time and density resolutions
- Affected by mechanical vibrations
- Risk of fringe count misses in high density plasma

Cotton-Mouton (CM) Polarimeter

CM effect: change of ellipticity of light due to birefringence in a plasma.

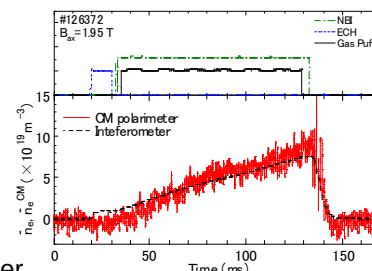
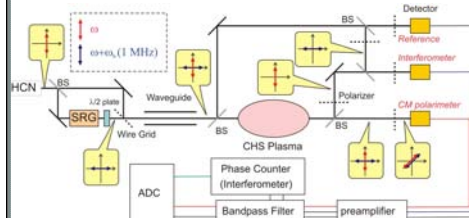
Phase difference between O-/X-mode ϕ_{CM}

$$\phi_{\text{CM}} \propto \lambda^3 \int n_e B_{\perp}^2 dl$$

- Immune to vibrations
- No fringe count miss in principle
- Few application so far

➡ R&D in NIFS

CM heterodyne polarimeter with HCN laser



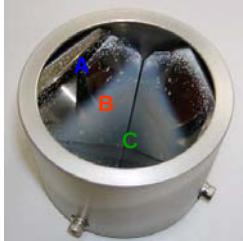
- Successful measurement of the CM effect and agreement with results of the usual interferometer
- Density resolution of $2.1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ with a time constant of 3.2 ms.
- Density resolution is determined by the frequency noises in a beat signal. It will be improved by changing the way to shift the frequency for heterodyne detection.



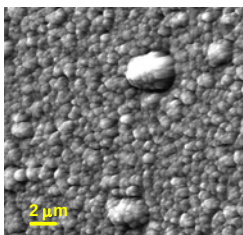
Changes of optical properties of retroreflector and its degradation mechanism

Degradation of the retroreflector (RR) is a critical issue for polari-interferometer in ITER.

After exposure of RR to LHD plasma



SEM photo @ C



Surface condition

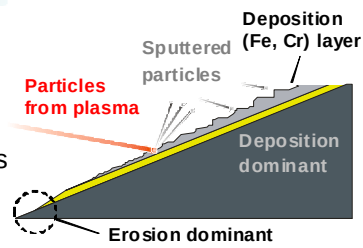
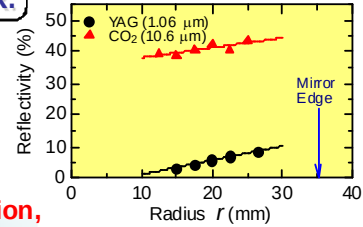
- A: edge: keeps specularity
- B: middle: clouded
- C: center : gray (almost no reflection for visible light)

Approaching the central region, the reflectivity decreases.

Reason of radial distribution

- **Roughened deposition layer** (Fe, Cr, O) on the surface.
- The thickness and the roughness of the layer **increase** from the edge to the central region (thickness: 2 nm, roughness: 0.1-0.5 nm @ central region). Particles tend to be sputtered to the central region and accumulate because of the hollow structure of a retroreflector. → **Small reflectivity at center**

Radial distribution of reflectivity



6. Klinger 委員からのご意見

要素研究の成果としての成果はすばらしい。一方、これらの成果をこれからどう統合していくか？例えば、定常について。ECHは定常に向いているが、高密度へのOXBなど含めて増強すべきである。またLIDも閉じ込め改善の実証など大いに成果があったが、高熱負荷の問題があるからヘリカルダイバータにする必要がある。

例えば、発表に使用したパワーポイントの70ページにあるように、今後、重水素実験を含め、個々の機器の成果、物理を組み合わせ、総合的にintegrationされた成果となるよう計画を立てている。特に、パワーポイントの73ページにあるように、9年間の重水素実験期間の内、最後の3年間は総合的な成果が得られるよう計画を立てている。

ECRH加熱の定常化に関しては、すでに、2003年に導入した200kW 定常出力の性能をもつジャイロトロンを用いて、LHDに100 kW以上の電力を入射し、一時間以上(3,900秒)のプラズマを安定に維持できることを実証した。(この100kWは、ジャイロトロンの発振電力の制限により、プラズマパラメータは平均電子密度 $1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、中心電子温度1.5 keVにとどまっていた。)

2007年には新たに 77 GHz, 1 MW 5秒 出力のジャイロトロンを導入したが、このジャイロトロンは300kW 定常運転も可能である。2007年のLHD実験サイクルから入射を開始し、これに合わせて伝送系も定常用に対策を施しており、定常実験に供することが可能になりつつある。

また、高密度プラズマのECRHに関しても、すでに84 GHzのカットオフ密度($0.88 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)を超えるターゲットプラズマに対してO-X-Bの加熱シナリオによる予想される領域で加熱効果を見いだしており、高密度プラズマのより高効率の(EBWによる)加熱を目指した研究をすすめている。

これらの成果を踏まえて、今後も既設のジャイロトロンをより高電力、長パルス(CW)運転可能なジャイロトロンに置き換え、伝送系をそれに対応できるよう改造を加えることで、ECRHのシステムの増力をはかり、より高いプラズマパラメータでの定常プラズマの実現、さらに高密度プラズマの高効率電子加熱の研究を進めてゆく予定である。

フルヘリカルダイバータは、重水素実験と並んで、第2中期計画における主計画の1つであり、第2中期計画の開始直後から実験できるようなスケジュールを考えている。このことは、パワーポイントの70～73ページに示されている。またヘリカルダイバータの詳しい検討については成果報告書3.6 2) [242ページ]に記載してある。この内容についてパワーポイントの図で以下に示す。

The integration of achieved results towards the final goal is considered in the scenario of our next deuterium experiment. Please look at the 70th figure of power point presentation.

We are starting our efforts toward CW operation of ECRH system. Introducing CW gyrotron in 2003 and demonstrated plasma sustainment of more than 1 hour at the injection power of 110 kW. This power level was limited from the available power source at that time. We have introduced a 77 GHz 1MW/5 s gyrotron in 2007, which can be operated at 300 kW CW. We have just started to inject the power from this tube as well as upgrading the transmission line for CW operation.

We also put our efforts on the investigation of the electron Bernstein mode heating for the strong electron heating of high density plasma. We have demonstrated that heating effect can

be observed near the expected mode conversion window at the target plasma density of $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$. Optimization of EBW heating is underway. Upon these experimental results, we are planning to upgrade our ECRH system step by step, replacing old gyrotrons to higher and longer pulse gyrotrons and upgrading transmission lines.

Due to the limited time, we skipped the detail explanation on the design study of helical closed diverter which is one of the important subjects in our next mid-term plan. Although this subject is described in the report but it is written in Japanese, so that, the results are summarized in the figures below;

Closed helical diverter

1. Divertor plasma properties

Divertor plasma properties have been investigated under 'Open' helical divertor configuration.

2. Optimization of components arrangement

Neutral transport simulation code, EIRENE, is applied to the study for optimization of components (baffle, divertor plate, dome) arrangement.

3. Development of plasma facing components

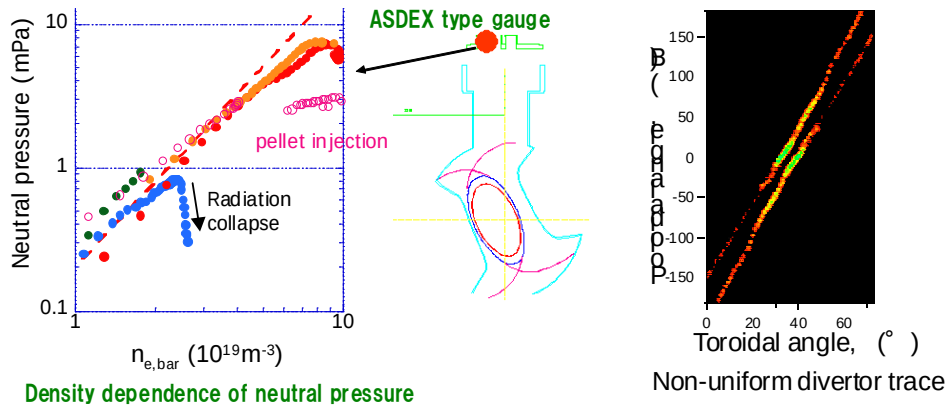
High performance mechanical joint divertor plate were developed.

4. Pump

Requirement

What kind of pump is suitable for LHD closed divertor?

Neutral pressure in 'open' helical divertor

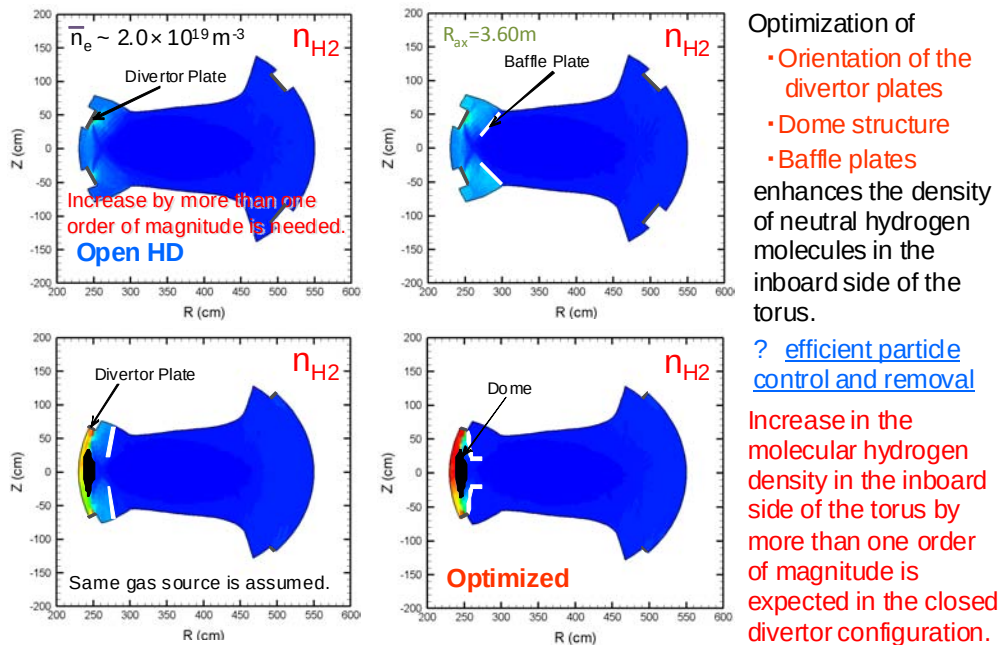


Neutral pressure in divertor region is up to 1×10^{-2} Pa.

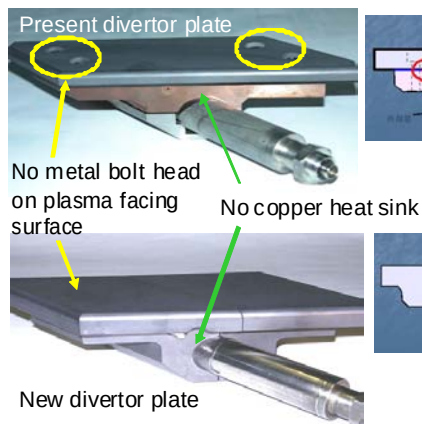
Non-uniform divertor plasma allow neutral particles to escape from divertor region.

Large vacuum vessel volume ($210 m^3$) comparing with plasma volume ($\sim 30 m^3$) is also a cause the low pressure.

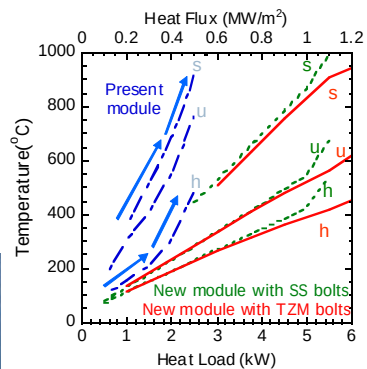
Optimization of components arrangement



Development of plasma facing components



No metallic bolt head is exposed to plasma.
Much higher thermal performance



Divertor plate temperature under steady state heat load test. s: surface, u: bulk, h: heat sink

Pump

Pumped particle flux:

Steady state operation with repetitive pellet injection is considered.

particle number for a pellet $\rightarrow \sim 5 \times 10^{21}$ atoms $\sim 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$

injection frequency $\rightarrow 10 \text{ Hz}$

required pumped particle flux $\rightarrow 100 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

What kind of pump is suitable for LHD closed divertor?

Cryogenic pump is desirable from the point of view of pump speed.

BUT $\rightarrow$ Equipments such as helium liquefier are necessary.

$\rightarrow$ In-vessel ancillary equipments such as 80K shield are necessary.

Membrane pump or non-sublimation getter pump should be considered to be candidate.

7. Lee 委員からのご意見

ヘリカル炉を指向した研究は焦点を絞っていく必要がある。一方、ミラー、レーザーとの双方向型研究は拡大していく視点が必要。方向性が異なる2つの研究をどのように進めていくのか。

また、重水素実験には時間がかかり、それを待ちすぎることはよくない。有効な予算の範囲で、垂直 NBI、閉ダイバータを先行させるべきである。

ミラー、レーザー、ST 等との双方向型共同研究では、各センターが分担する共同研究の主テーマとして、例えば、ミラーの場合、「電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」のように、ヘリカル炉を指向した場合にも重要となるものを選択している。即ち、双方向型共同研究の推進は、将来、核融合炉を実現する上で必須と考えられる学術的課題の解明に大きく寄与している。

双方向型共同研究では主テーマ以外にも、核融合研の研究者は参加しており、その部分は defocus とも考えられるが、同一装置で実験していることから、主テーマと関連した学術研究を行っており、主テーマを深く解明する上で必要な研究と捉えている。

以上のことから、ヘリカル炉を指向した直接的研究も双方向型共同研究も、ともに核融合炉実現に必要な研究と考えている。

安全に関する地元との協定書の締結が、第2中期計画の時期との関係で遅くなると予想される場合には、ご指摘のように、垂直入射 NBI、閉ダイバータを先行させるつもりである。重水素実験は、協定書の締結後、P これら垂直入射 NBI、閉ダイバータを追ってなるべく早く実現させたいと考えている。

The Bilateral collaboration with four research centers proceed the collaborating research subjects that are most important for nuclear fusion, which are; (1) Study of electric potential in plasma (2) Optimization of confined magnetic configuration (3) Production and diagnosing of inertia fusion plasma (4) Physics of steady state plasma. They are also important subjects for developing helical reactor, and in this sense promoting bilateral collaboration does focus our effort to develop helical reactor.

As for the strategy of next-stage experiment, we are planning to proceed the study using closed diverter as well as perpendicular NBI before deuterium experiment when the agreement with local governments would be delayed.

8. 法人化前と現在とを比較し進展がわかる表が欲しい。

以下の表に法人化前（2003）と現在の達成値の比較を示した。

	Achieved		Goal
	2003	2007	
Fusion triple product	$2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$	$4.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$	$5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$
Electron Density n_e Central electron density	$2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	$1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	$1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Electron Temperature T_e Central temperature at Density	10 keV $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	10 keV $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	10 keV $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Ion temperature T_i Central temperature at Density (species)	10 keV $0.35 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ (Ar)}$	5.2 keV $1.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ (H)}$	10 keV $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Plasma Stored Energy	1.36 MJ	1.44 MJ	
Beta β Volume averaged beta at magnetic field strength	4.1 % 0.45 T	5.0 % 0.425 T	> 5 % 1-2 T
Steady state operation Pulse length	756 sec	31min.45sec. (680 kW) 54min.28sec. (490 kW)	1 hr. (3 MW)

また、この4年間に得られた大きな発見としては以下のものが挙げられる。

1. 粒子拡散障壁の発見と中心超高密度プラズマの実現
2. 高イオン温度に伴う不純物ホール発見
3. 非局所輸送現象の発見（TESPELによる温度揺動の結果）
4. 電子熱拡散障壁の形成と電場の関係

技術的な成果としては以下のものがある。

1. 超伝導コイルのサブクール化
2. 負イオン方式NB I 技術の確立（定格値の達成）
3. 定常加熱技術の進展（ICRF, ECH）
4. トムソン散乱計測の高精度化
5. 密度揺動計測の進展
6. イオン温度・速度空間分布計測の高精度化

「シミュレーション研究」
成果報告書
(平成 16～19 年度)

核融合科学研究所
シミュレーション科学研究部

目次

1. 始めに	1
1.1. シミュレーション科学研究部創設までの経緯	1
1.2. 研究部の研究方針	5
1.3. 研究部の構成	6
2. 各プロジェクトの研究活動報告	11
2.1. LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト	11
2.1.1. 概略	11
2.1.2. 階層拡張シミュレーション	16
2.1.2.1. コア運動論モデル コアプラズマの運動論的乱流輸送シミュレーション (渡邊)	17
2.1.2.2. コア流体モデル	31
2.1.2.2.1. アルヴェン固有モードと高速粒子の相互作用 (藤堂)	31
2.1.2.2.2. 二流体モデルに基づく多階層シミュレーション (石澤)	41
2.1.2.2.3. ペレット (石崎)	45
2.1.2.2.4. 流れをもつ MHD・Hall-MHD・二流体平衡 (伊藤)	49
2.1.2.2.5. 高精度 MHD コード、共通 MHD コードの開発 (三浦)	53
2.1.2.3. 周辺モデル プラズマの接する壁近傍での電位構造と微粒子の振る舞い (富田)	61
2.1.3 階層統合シミュレーション	71
2.1.3.1 3次元環状磁場配位における拡散輸送方程式の定式化 (中島)	71
2.1.3.2 TASK3D の開発状況 (佐藤)	75
2.1.4 ロードマップ	83
2.2. レーザー核融合シミュレーションプロジェクト	89
2.2.1. 概略	89
2.2.2 FI^3 の推進	90
2.2.3 ロードマップ	100
2.3. 複雑性プラズマシミュレーションプロジェクト	104
2.3.1. 概略	104
2.3.2. 磁気リコネクションの物理	107
2.3.2.1. 磁気流体シミュレーションによるマクロ階層の物理 (田)	107
2.3.2.2. 粒子シミュレーションによるミクロ階層の物理	109
2.3.2.3. 階層繰り込みシミュレーションモデル	117
2.3.3. プラズマ物質相互作用	120
2.3.3.1. 炭素材と水素の化学反応の分子動力学 (中村)	121
2.3.3.2. ブロブ輸送の3次元粒子シミュレーション (石黒)	126
2.3.4. ロードマップ	127

2.4. 仮想現実関連研究及びプロジェクト関連研究	132
2.4.1. 仮想現実関連研究	132
2.4.1.1. 没入型ディスプレイの高度化に関する研究（田村）	132
2.4.1.1.1. ネットワーク利用のバーチャルリアリティ装置同士の接続	132
2.4.1.1.2. VR と数値シミュレーションの統合環境の構築	134
2.4.1.1.3. VR を使った設計支援環境の構築	136
2.4.1.1.4. 核融合シミュレーション結果の可視化例	138
2.4.1.2. 裸眼立体視による 3 次元シミュレーションの可視化ライブラリ（田）	139
2.4.1.3. 没入型 VR 装置におけるよりリアリティのある LHD モデルの作成（田村）	141
2.4.1.4. 他研究機関・大学との共同研究（田村）	141
2.4.1.5. 今後の課題および計画	142
2.4.2. プロジェクト関連研究	144
2.4.2.1. アルゴン換気シミュレーション（三浦）	144
2.4.2.2. 乱流研究（三浦）	146
2.4.2.3. 多階層シミュレーションのための粗視化投影法-MAPIN (Skoric, 石黒)	148
3. 共同研究及び連携研究における活動報告	150
3.1. シミュレーション科学の共同研究	150
3.2. 共同研究支援体制	151
3.2.1. 作業班活動	151
3.2.1.1. 計算機作業班	151
3.2.1.2. ベンチマーク活動	153
3.2.1.3. ネットワーク作業班	156
3.2.2. 研究会、シンポジウム	157
3.2.3. シミュレーション科学研究部設置記念シンポジウム・式典	159
3.3. 学際的共同研究	161
3.3.1. 自然科学研究機構連携研究	161
3.3.1.1. 自然界における階層と全体	161
3.3.1.2. 自然界と実験室のプラズマ研究の交流研究拠点形成	163
3.3.1.3. 「非平衡量子物理学の開拓」プロジェクト	165
3.3.1.4. 人間における顔認知のメカニズム：特に機能発達と学習効果の解明	167
3.3.2. 民間との共同研究（石黒）	168
3.4. 国際共同研究	170
3.4.1. ITER 連携、ITER-BA 連携と六ヶ所研究センター	170
3.4.1.1. 六ヶ所研究センターにおける ITER 連携活動等	170
3.4.1.2. ITER 連携と長距離広帯域ネットワーク	171
3.4.1.3. ITER 連携活動（ITER 協力専門委員会および ITPA 活動など）	172
3.4.1.4. ITER 連携研究	173
3.4.1.4.1. ITER におけるアルヴェン固有モード	174

3.4.1.4.2. 乱流輸送研究と ITER・ITER-BA との関わり	175
3.4.1.4.3. ITER における新古典テアリングモード	177
3.4.1.4.4. ITER における RWM.....	178
3.4.1.4.5. 階層統合シミュレーションと ITER との関わり	179
3.4.2. プラズマ数値シミュレーション国際会議およびアジア太平洋プラズマ理論会議.....	179
3.4.3. JIFT による研究連携.....	181
3.4.4. 国際共同研究拠点ネットワークの形成	186
3.4.4.1. 課題「核融合と宇宙プラズマの実験およびシミュレーションにおける乱流領域の 先進的な評価」	187
3.4.4.2. 課題「核融合理論の宇宙プラズマへの応用」	188
4. 若手人材育成	191
4.1. 大学院教育	191
4.2. 卒業生の活躍.....	192
4.3. 若手研究者の育成	194
4.3.1. OD(ポスドク)研究者の活用	194
4.3.2. 若手研究者の研究活動促進.....	194
4.4. アジア冬の学校.....	195
4.5. シミュレーション科学公開講座.....	197
5. まとめと展望	198
5.1. LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト	198
5.2. レーザー核融合シミュレーションプロジェクト	200
5.3. 複雑性プラズマシミュレーションプロジェクト	201
5.4. 共同研究、研究連携、若手人材育成.....	202
5.5. 次期中期計画に向けたシミュレーション研究の発展の方向性.....	202

本報告書に記載された研究報告は、基本的には全て核融合科学研究所の共同研究に基づく研究成果であるが、特に所外の共同研究者の貢献度の大きな成果については、**青字**を用いて記載してある。

1. 始めに

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置（LHD）を用いた実験研究とスーパーコンピュータを用いたシミュレーション研究を基軸として、核融合プラズマ閉じ込め物理機構の解明とその体系化を目指してきた。特に、シミュレーション研究では、多岐にわたる物理系に内在する物理機構を解明するため、スーパーコンピュータの能力を最大限に活用して、多重時空間スケールの混在する自然現象から、ある特徴的な時空間スケールで成立する要素還元された物理モデルを抽出し、これに基づく単一階層シミュレーションを主体として研究を進めてきた。しかし、核融合プラズマに代表される、複合物理過程の多重時空間スケール間の自己無撞着相互作用の結果として系全体の長時間特性が決定される非線形・非平衡・開放系においては、要素還元された単一階層シミュレーションでは物理系の長時間全体像を記述・予測できないため、新しく複合物理過程の微視から巨視に及ぶ多重時空間スケール相互作用を自己無撞着に繰り込む「階層繰り込みシミュレーション」モデルを、革新的数値手法や多次元可視化手法を開発しつつ構築する必要性が生じている。このため、「階層繰り込みシミュレーション」モデルを全国の大学との共同研究及び国際共同研究を推進することにより開発し、核融合プラズマに代表される「多重時空間スケール相互作用系」としての自然体系をコンピュータ上において再現・予測し、核融合プラズマ閉じ込め物理の解明と体系化を実現することを目指している。ここにおいて、従来の要素還元的単一階層シミュレーションから、自然体系の全体的な発展を予測可能とするシミュレーション科学という新たな学術分野への新展開を図るため、次節に述べるシミュレーション科学研究部を創設してシミュレーション研究を推進することとした。

1.1. シミュレーション科学研究部創設までの経緯

大学共同利用機関法人として平成16年4月から平成22年3月までの6年間に達成すべき目標が「中期目標」として設定され、この中期目標を達成するための計画として「中期計画」を自然科学研究機構として提出し、文部科学大臣により承認されている。その「中期計画」の内、核融合科学研究所のシミュレーション研究に直接かかわる部分としては、

- 核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化を進めるとともに、それを支える基礎研究としての複雑性の科学を探究するため、理論・シミュレーション研究を推進する。このため大型シミュレーション研究用解析装置を積極的に活用する。
- 大型シミュレーション研究を一つの学問・学際分野として確立することを目指し、大型計算機システムを活用した共同利用・共同研究を推進する。

の2つが上げられる。この中期計画に基づき毎年具体的に実施する活動として「年度計画」を立て、これに基づき研究活動を進めている。これら「中期目標」、「中期計画」、「年度計画」、そして年度計画に対応して活動した実績を毎年報告する「実績報告書」を自然科学研究機構のホームページ等に掲載している。

シミュレーション研究については核融合科学研究所運営会議のもとにおかれた外部評価委員会

による評価が行われ、その結果が平成16年度外部評価報告書（2005年5月）としてまとめられている。その報告書の「3. 1 総評」の中の「シミュレーション研究の位置づけ」において「核融合科学研究所は、その創設時からプラズマ研究における数値シミュレーションの重要性を認め、世界的にもトップレベルの研究者集団と研究設備を有してきた。その活動は国際的に高く評価されている。このたびの外部評価においても、今後一層の発展に強い期待が表明された。とくに核融合研究への直接的な貢献と基礎学術としての息の長い研究を両輪とする運営は高い評価を得た。実験グループとの連携が密接であることもこの研究所の特徴であり、LHD 研究グループに属する理論解析グループと協力した研究成果が目をつけた。」（抜粋）と評価されている。同じく、「3. 1 総評」の中の「理論・シミュレーション研究センターの役割」において「核融合科学研究所理論・シミュレーション研究センターは、日本におけるシミュレーション研究の拠点として重要な役割を果たしている。所内においては、理論・データ解析研究系、計算機情報ネットワークセンターの研究者と密接に連携して研究をおこなっている。また、国内はもとより海外の研究者と活発な共同研究がおこなわれている。 中枢となる研究所に全国の研究者が共同利用できる最新鋭の計算機が設置されることが必要であり、核融合科学研究所はその役割を十分果たしてきた。計算機の性能向上は著しく、今後世界のプラズマシミュレーション研究をリードし続ける上でスーパーコンピュータなど研究施設を継続的に更新してゆく必要がある。」（抜粋）、「また、複雑現象を可視化するヴァーチャルリアリティーも核融合科学研究所がいち早く着目して開発してきたものであり、この方面をリードする成果が広く波及することが待たれる。」（抜粋）、「自然科学研究機構の中での連携や、レーザー研究との連携などが発展しようとしており、今後具体的な成果が得られることが期待される。また、大学で行われている様々な基礎研究との連携が一層活発化することが望まれる。」（抜粋）と述べられている。

さらに、「3. 1 総評」の「平成16年度の研究成果」では「本研究グループは（1）核融合プラズマおよび複雑性に関するシミュレーション研究、（2）大規模シミュレーションの推進を二つの柱として研究を行っており、平成16年度の研究目標として（i）LHD を始めとする核融合プラズマ非線形現象の磁気流体的・運動論的シミュレーション研究、（ii）炉心プラズマにおける高エネルギー粒子の物理に関する理論・シミュレーション研究、（iii）開放系における無衝突磁気リコネクションの粒子シミュレーション研究を挙げている。これらの目標に沿った十分な研究成果をあげている。 以下に、その主要なものについて述べる。LHD の実験で観測された高 β プラズマの MHD 平衡・安定性の解明は、実験と理論の連携によって得られた顕著な成果である。このような研究成果は、今後シミュレーション・数値解析によってプラズマ理論が高い予測性を持ちえることを示唆するものであり、ITER プロジェクトなどの国際的なステージで貢献が行われることに強い期待が表明された。プラズマの基礎的分野のシミュレーション研究においては、磁気再結合プロセスに関するシミュレーションに力をいれている。これは、当該研究グループが長年にわたって取り組んできた分野であり、プラズマにおける〈連結階層〉の代表的な例である。大規模シミュレーションの推進としては、コーディングの技術のみならず、理論的な基礎を固めつつ計算手法を開発しており、研究所の高い学術的ポテンシャルを証明するものといえる。具体的な例として、高精度ジャイロキネティックヴラゾフコードの開発の緻密さは高く評価される。今後、このような堅牢な基礎をもつ日本発の計算コードが世界のスタンダードになることが期待され

る。」(抜粋) との評価と期待が述べられている。

さらに「3. 3 まとめ [その他]」では、「大型ヘリカル研究部の理論・データ解析グループとの連携に基づく研究テーマのグループ化は、シミュレーション研究の新たな展開を図る観点からも有効な戦略と考えられる。大型装置実験での物理の新発見を加速することのできるシミュレーション手法の開発は、内外の核融合研究（とくに ITER プロジェクト）にとって大きなインパクトをもつであろう。開発されたモデルやスキームの共同利用が促進されることに期待が寄せられている。現在は、核融合科学研究所は、世界トップクラスの計算機資源を有しているが、計算機の性能向上は急速であり、不断的努力によってスーパーコンピュータの整備、研究施設の充実を図る必要がある。」(抜粋) と、研究テーマのグループ化や計算機の性能向上について言及されている。

これを受け平成17年度において、核融合科学研究所におけるシミュレーション研究を新分野として確立するための新組織創設に関して所長から核融合科学研究所運営会議に対して諮問が行われ、運営会議のもとに組織検討委員会（委員長：三間罔興大阪大学レーザーエネルギー学研究中心長、委員数：20 名）が設置された。検討結果が「組織検討委員会報告書」（2006年3月10日）としてまとめられ、運営会議において承認され、所長に提出された。その報告書では、「審議の結果、当委員会は、核融合科学研究所におけるシミュレーション研究は、長年培われてきた研究の結果、核融合プラズマを『多階層・複合物理過程が複雑に相互作用する非線形・非平衡・開放系』として捉え、この自然体系を大規模シミュレーションで解明する『シミュレーション科学』を構想するまで進んできたことを認識し、この構想を独立した新しい科学の分野として強力に推進するため核融合科学研究所に新組織『シミュレーション科学センター』を創設するべきであると結論した。また、当委員会は、この新センターを効率的に運用するため、理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターを一体化し、シミュレーション環境（ソフト）と計算機環境（スーパーコンピュータ、ネットワーク）を融合させることが適切であると判断した。」と述べられ、

「検討結果：シミュレーション研究を強力に推進するため新しい研究体制を築くべきであるとの提言

○ 核融合研究に新機軸をもたらす大規模『連結階層シミュレーション』を手法として完成し、強力に遂行することができ、また、各種実験装置におけるプラズマの振る舞いに対して観測可能で予測性のある大規模シミュレーションを遂行し、核融合プラズマ閉じ込め物理の解明とその体系化に資することができる体制が求められる。

○ 具体化のためには研究プロジェクト、共同研究、機構連携、教育及び人材育成、組織体制について新しい方策を講じることが求められている。

○ 研究プロジェクトについては (a) LHD・磁場閉じ込めプロジェクト、(b) レーザー核融合プロジェクト、(c) 複雑性プラズマプロジェクトの3つのプロジェクトをおきシミュレーション科学を推進することが望まれる。」が述べられている。

これら「平成16年度外部評価報告書」及び平成17年度の「組織検討委員会報告書」を受け、平成18年度に所内において

○ 理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターの統合による

新しい研究体制を構築。

- 研究プロジェクト：(a) LHD・磁場閉じ込めプロジェクト、(b) レーザー核融合プロジェクト、(c) 複雑性プラズマプロジェクト
- スーパーコンピュータの高性能化
- ITER 及び ITER-BA との連携

を推進する具体方策を検討した。

平成18年4月24日には理論・シミュレーション研究センター、計算機・情報ネットワークセンター、理論・データ解析研究系の合同会議を核融合科学研究所管理棟4階第一会議室（大会議室）において開催し、上記観点について意見交換を行った。

その後の議論の結果、シミュレーション科学研究部設立構想案を立ち上げ、組織の改編の準備段階として平成18年12月19日に「計算機実験棟」を「シミュレーション科学研究棟」と名称を改めるとともに、シミュレーション研究関係者は研究2期棟から全員、「シミュレーション科学研究棟」及び一部「研究1期棟」にオフィスを移し、主装置であるスーパーコンピュータの近くで尚かつシミュレーション研究者が相互に議論しやすい環境を整えた。また、全国の共同研究者が使いやすい計算機システムとなるよう、シミュレーション手法の検討のみならず、共同研究者と協力して組織だった計算機のベンチマークを進め、適切な計算機システムの導入を目指すこととした。

平成19年1月23－24日に「プラズマ・核融合研究における High Performance Computing ワークショップ」及び「大型シミュレーション研究会」合同研究会を核融合科学研究所管理棟4階第1および第2会議室において開催し、新しい研究体制の構想や次期スーパーコンピュータの構想について所外研究者を交えて意見交換を行った。

それらの検討を経て、次のような案を策定した。即ち、主として物理モデルやアルゴリズムを担当してきた「理論・シミュレーション研究センター」と計算機やネットワーク技術を担当してきた「計算機・情報ネットワークセンター」の2センターを統合し、新たに「シミュレーション科学研究部」を設置することとした。そのもとにLHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系と新領域シミュレーション研究系の2研究系、及び六ヶ所研究センターをおくこととした。さらに、2研究系を基盤として、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション、レーザー核融合シミュレーション、複雑性プラズマシミュレーションの3つのプロジェクトを立ち上げ、階層間の相互作用を自己無撞着に繰り込んだ「階層繰り込みシミュレーション」モデルを大学等との共同研究により段階的に開発し、これらシミュレーション研究開発の知見を基に、LHD Numerical Test Reactor（LHD 数値試験炉）へと繋がる大規模シミュレーション研究を展開して行くこととした。また、六ヶ所研究センターの当面の役割は、大学共同利用機関としての広報活動、関連情報の大学等への迅速な提供、大学等からの意見の伝達、学術の立場からの ITER 及び ITER-BA との連携等である。

これら構想案は平成18年度核融合科学研究所運営会議および自然科学研究機構教育研究評議会等による承認を受けた後、平成19年4月1日に「シミュレーション科学研究部」として具体化された。その研究部門を含む組織等については1.3節にて示す。

1.2. 研究部の研究方針

「階層繰り込みシミュレーション」による、LHD-DD 実験の先行シミュレーション、ITER 等の燃焼プラズマに対する予測シミュレーション、およびレーザー核融合研究における高速点火方式を先導するシミュレーションは、有効な実験シナリオの策定、実験機器の設定等において必要不可欠なものである。更には、「階層繰り込みシミュレーション」の実現により、シミュレーション科学という新しい学術分野への新展開を促すものである。

当研究所で既に世界の最高水準にある単一階層シミュレーションにおける研究成果を生み出している研究者集団と、世界有数の環状系磁場閉じ込め実験装置 LHD を有する研究環境を最大限に活用し、さらには全国の叡智を結集すべく共同研究を展開することにより、世界でも類を見ない高度の研究環境及び体制のもとで、LHD 実験、自然現象の観測結果との直接的比較に基づく予測性能の検証を通して「階層繰り込みシミュレーション」モデルを構築することが可能となり、シミュレーション科学の有効性を効果的且つ明確に実証できると考えられる。プラズマを対象としたシミュレーション科学の進展により、普遍的で新しい考え方のパラダイムとしてのシミュレーション科学が確立でき、実験や理論とも異なる新しい知をもたらすものと期待される。このため、i) LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、新領域シミュレーション研究系、及び、六ヶ所研究センターからなるシミュレーション科学研究部を創設し、この研究体制を基に、ii) スーパーコンピュータ、仮想現実解析システム等の計算資源の充実、及び iii) 共同研究推進のためのネットワーク及び研究環境の整備を進めている。

LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系の研究方針は、環状系磁場閉じ込めプラズマを主たる研究対象として、核融合プラズマの閉じ込め物理の解明とその体系化を通して、シミュレーション科学の確立を目指すことである。これを具体化するために、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系を中心として国内外の大学等との共同研究に基づき LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトを推進している。なお、現時点では、シミュレーション結果の可視化等に関連して仮想現実関連研究も本研究系を中心に共同研究を中心に推進されている。新領域シミュレーション研究系の研究方針は、レーザー核融合プラズマおよびプラズマの複雑性に関するシミュレーション研究により、核融合プラズマの物理機構の解明とその体系化に寄与し、更に、それを支える基礎過程としての複雑性プラズマの解明を通して、シミュレーション科学の確立を目指すことである。これを具体化するためにレーザー核融合及び複雑性プラズマに関する二つのシミュレーションプロジェクトを推進している。六ヶ所研究センターの役割は、大学共同利用機関としての広報展開及び情報収集、遠隔同時運用効果の実証、大学サイドとして、学術的立場からの ITER 及び ITER-BA との連携を推進することである。

研究部で進められているプロジェクトは、何れも大きな飛躍を必要とする構想に基づいており、国内外の大学及び研究所との共同研究が、その推進に必要不可欠である。又、このような共同研究を更に積極的に推進するため、大学共同利用機関法人として「プラズマシミュレータ」や「LHD 数値解析システム」の利用環境を向上させる体制を、計算機作業班及びネットワーク作業班として構築している。

ITER 及び ITER-BA との連携を推進することは、日本の核融合研究を継続的に推進し、実証炉

を展望するうえで極めて重要な事柄であると考えられる。シミュレーション科学研究部では、六ヶ所研究センター、及びLHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系を中心として、ITER 及びITER-BA への連携を推進してゆく。特に、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系を中心とするLHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトは、プロジェクトの構造そのものが、ITER 及びITER-BA 活動へ直接的、及び間接的に貢献できる体制となっている。

シミュレーション科学研究部は、「核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその理論体系化を進めるとともに、それを支える基盤研究としての複雑性の科学を探究するため、理論・シミュレーション研究を推進する」という中期計画の内容に沿って具体的目標を定めており、大型シミュレーション研究を1つの学問・学際分野として確立することを目指し、以下の項目を推進する。

- 1) 環状系磁場閉じ込め研究、レーザー核融合研究、基礎プラズマ研究を中心として、階層間の相互作用を自己無撞着に繰り込んだ「階層繰り込みシミュレーション」モデルを大学及び研究機関との共同研究により段階的に開発する。
- 2) 次の三つのシミュレーションプロジェクトを立ち上げ、重点研究課題とする。
 - i) 磁場閉じ込めでは、国内外の大学等との共同研究を基本として、複合物理過程の階層間相互作用を緻密に解析する階層拡張シミュレーションの知見を実験結果の全時間変化の解析に適した階層統合シミュレーションへと繰り込む階層繰り込みシミュレーションを段階的に開発することにより、LHD-DD 実験、ITER 等に代表される燃焼プラズマに対する予測可能な先行シミュレーションを目指すとともに、ヘリカル数値試験炉 (Numerical Helical Test Reactor) へと発展させる。
 - ii) レーザー核融合では、高速点火実験に対応して放射・流体コード、2次元相対論的粒子コード、フォッカープランクコードを統合したシミュレーションを行い、高速点火における複雑物理を解明し、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターで計画されている高速点火プロジェクトの点火実証実験 FIREX-II のターゲット評価を行う。
 - iii) 複雑性プラズマでは、開放系微視・巨視階層モデル、およびそれらを繋ぐ階層繰り込みモデルを構築することにより、磁気リコネクション現象に代表される自然界プラズマにおける爆発的エネルギー解放現象や複合物理系としてのプラズマ物質相互作用の解明を目指す。

また、「階層繰り込みシミュレーション」モデルの共同研究開発を目指して、核融合プラズマ、その他の研究分野のシミュレーション研究者を交えたシンポジウムを開催し、現状の情報交換を行うとともに、他分野との更なる連携の可能性等を探る。仮想現実解析システム・高速ネットワーク環境の整備を進め、平成20年度末には、スーパーコンピュータの性能を大幅に更新する予定である。

1.3. 研究部の構成

平成18年度までは、理論・シミュレーション研究センターと計算機・情報ネットワークセンターの構成であったが、1.1節で述べたように平成19年4月1日に「シミュレーション科学研究

部」が発足した。図 1.3-1 にシミュレーション科学研究部組織の全体図を示す。

シミュレーション科学研究部組織全体図

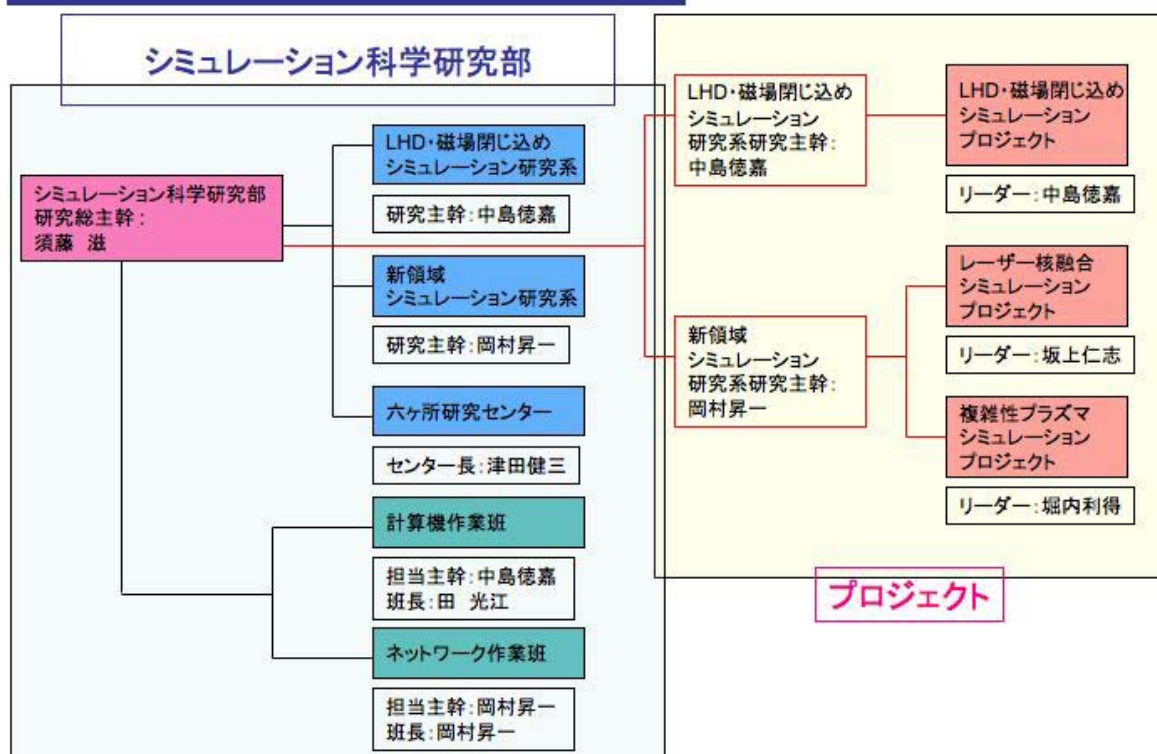


図 1.3-1 シミュレーション科学研究部組織全体図

シミュレーション科学研究部は、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系、及び新領域シミュレーション研究系からなる2研究系と、六ヶ所研究センターから構成されている。これらの研究系及びセンターの部門構成は、図 1.3-2 に示す通りで、LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系は、固定四部門と、併任、国内客員、及び外国人客員、各一部門から構成されており、新領域シミュレーション研究系は、固定三部門と、各々一部門からなる併任、国内客員、及び外国人客員部門から構成されている。又、六ヶ所研究センターは、併任及び客員、それぞれ一部門から構成されている。

シミュレーション科学研究部組織図

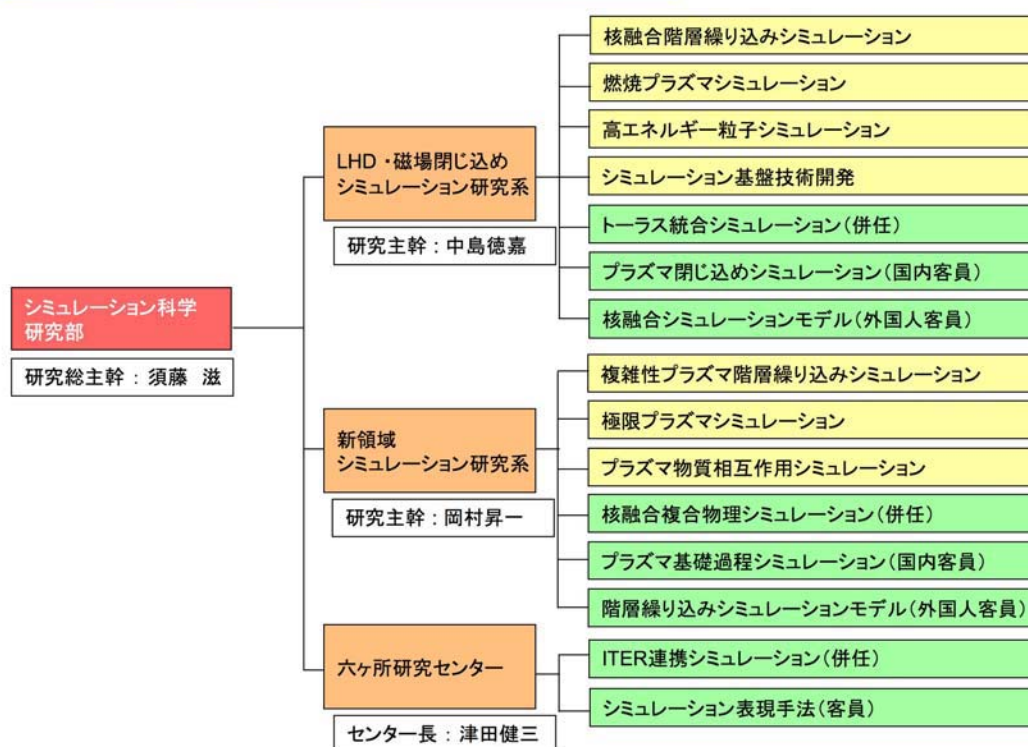


図 1.3-2 シミュレーション研究組織

以上の研究組織と共同研究を基盤として、LHD・磁場閉じ込め、レーザー核融合、複雑性プラズマからなる3シミュレーションプロジェクトが進められている。図 1.3-3 にその構成図を示す。図中において、薄い青色で示されている構成員は所内の共同研究者を、濃い青色で示されている研究者は所外の共同研究者を示す。LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト組織は、第 2.1 章で示される階層統合シミュレーション開発グループと階層拡張シミュレーション開発グループ、及び第 2.4 章で示される仮想現実関連研究等から構成されている。階層統合シミュレーションは、LHD 研究部と京都大学を中心とする共同研究を母体として推進され、階層拡張シミュレーションは、研究対象に応じて各々サブリーダーを有するコア流体モデル、コア運動論モデル、周辺モデルグループ単位で研究が推進されている。特に周辺モデルグループは、LHD 研究部、大学、及び JAEA と、幅広い国内共同研究を基盤としている。階層拡張シミュレーションの知見を階層統合シミュレーションへと段階的に繰り込む手法で、磁場閉じ込めプラズマに対する予測性を持つシミュレーションコードの開発を進めている。又、仮想現実関連研究は、広範囲な国内共同研究を通して、シミュレーション結果の解析への応用も含め様々な方向へと研究の幅を広げている。レーザー核融合シミュレーションプロジェクトは、大阪大学及び摂南大学との強力な共同研究、また連携研究推進センター・レーザー連携研究部門による協力関係も活用しながら、高速点火の先導シミュレーション研究を推進している。複雑性シミュレーションプロジェクトは、磁気再結合を中心とするグループとプラズマ物質相互作用を中心とするグループから構成され、基

礎的物理過程を研究対象として複雑性の科学を探索している。

プロジェクト組織図

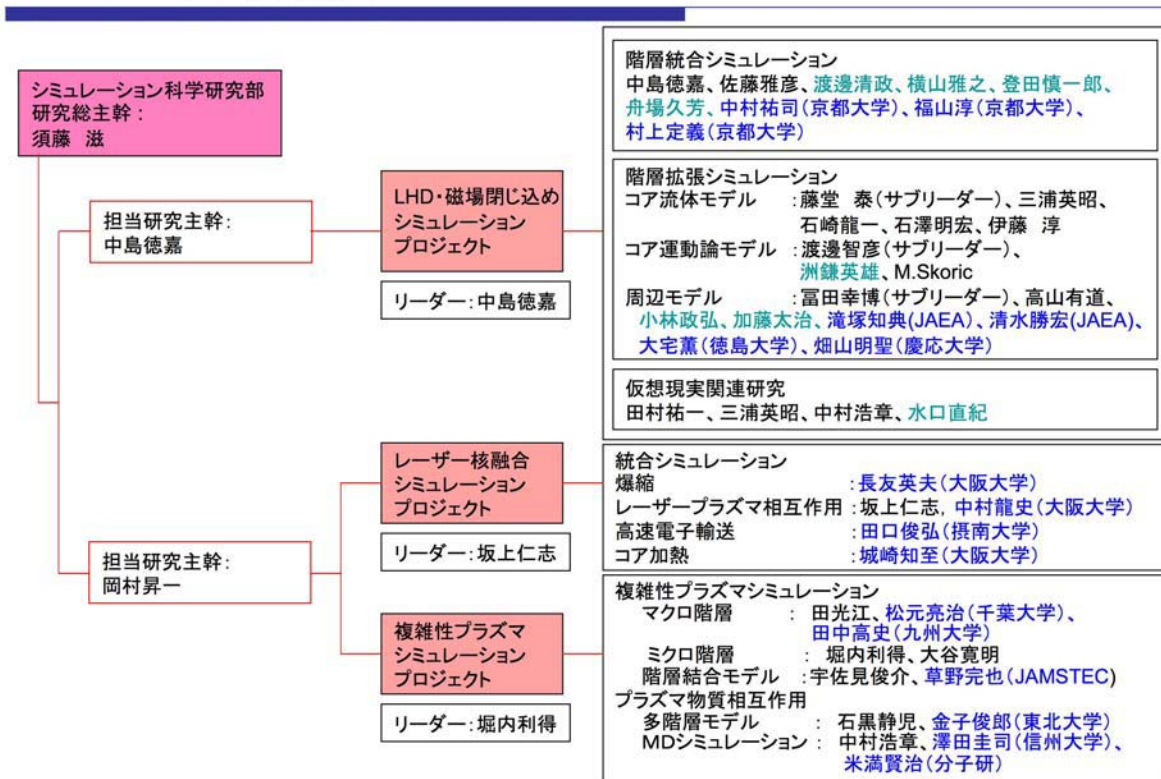


図 1.3-3 プロジェクト組織図

更に、シミュレーション科学研究部は、共同研究の推進を支援する体制として、図 1.3-4 に示される作業班体制を有している。薄い青色は技術部の職員を示す。作業班は、シミュレーション関連の共同研究を推進するための支援活動を行うための計算機作業班、及びネットワーク作業班から構成されており、技術部の協力の元で活動を進めている。特に計算機作業班の中の大型計算機作業グループは、共同研究委員会の承認及び要請に基づき、シミュレーション関連の共同研究を推進するための支援活動としてプラズマシミュレータの運用、LHD 数値解析システムの運用を技術部との協力の元で行っている。更に、大型シミュレーション結果の数値解析や可視化解析、又仮想現実による可視化等を支援するために、計算機作業班の中に支援計算機作業グループが設置されている。また、ネットワーク作業班は、所内のパソコン類やワークステーション類のネットワークの管理運営、研究所の代表メールサーバーの管理運営、所外インターネットとの接続及びセキュリティの管理、国立情報学研究所が提供する超高速学術情報ネットワーク（SNET 3）との接続の管理運営を行っている。SNET 3は核融合研究の国内共同研究のために、超高速のネットワークサービスを提供している。またプラズマシミュレータやLHD 数値解析システム周りのネットワークの管理運営も、ネットワーク作業班が責任を担っている。

作業班図

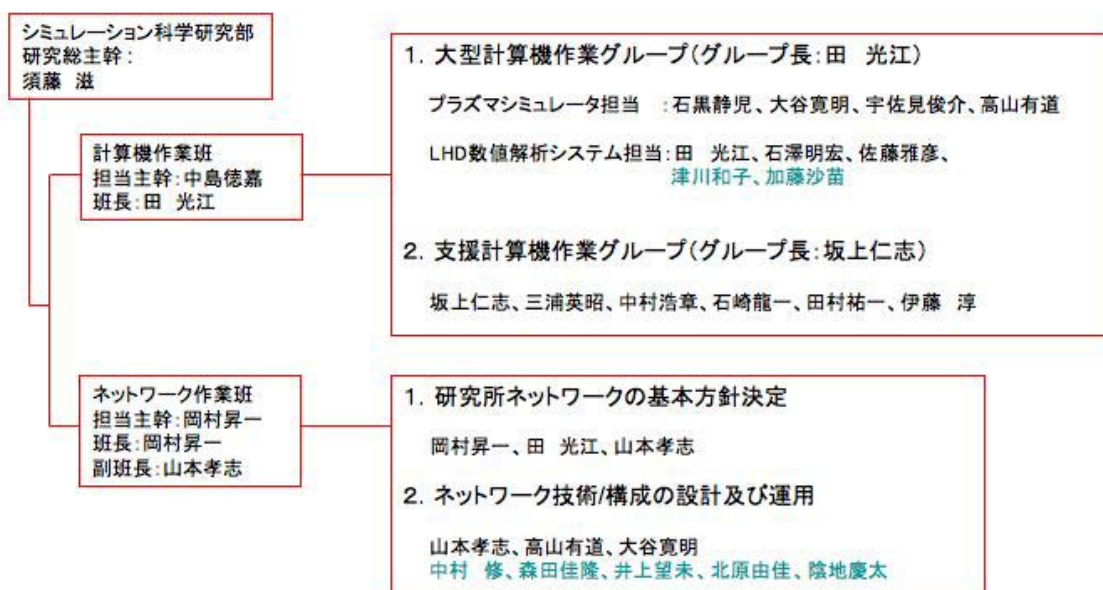


図 1.3.4 作業班体制

2. 各プロジェクトの研究活動報告

2.1. LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト

環状系磁場閉じ込めプラズマを主たる研究対象として、核融合プラズマの閉じ込め物理の解明とその体系化を通して、シミュレーション科学の確立を目指すという LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系の研究方針を具体化するために LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトは立案・推進されている。本プロジェクトは、国内外の大学等との共同研究を基本として、複合物理過程の階層間相互作用を緻密に解析する階層拡張シミュレーションの知見を実験結果の全時間変化の解析に適した階層統合シミュレーションへと繰り込む階層繰り込みシミュレーションを段階的に開発することにより、LHD-DD 実験、ITER 等に代表される燃焼プラズマに対する予測可能な先行シミュレーションを目指すとともに、ヘリカル数値試験炉 (Numerical Helical Test Reactor) へと発展させる方向性で進められている。本節では、2.1.1 において LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトの概略を述べ、2.1.2 において、コア運動論モデル (2.1.2.1)、コア流体モデル (2.1.2.2)、及び周辺モデル (2.1.2.3) から構成される階層拡張シミュレーションの主たる研究活動及び成果、2.1.3 において、階層統合シミュレーションに関して、その方向性と最近の成果を述べ、2.1.4 において LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトのロードマップに関して述べる。なお、本研究結果の解析等で重要となる仮想現実関連研究は、他のプロジェクト関連研究とともに、2.4 節で述べられる。

2.1.1. 概略

核融合プラズマは「複合物理過程における様々な時空間スケールで特徴付けられる階層間の相互作用の結果としてその時空間的全体像が決定される開放系」として特徴付けられる。シミュレーション研究の目的は、中期計画にも設定されているように、実験及び理論との連携の元に、このような核融合プラズマの閉じ込め物理機構の解明、及びその体系化を目指すと共に、新しい研究分野としてシミュレーション科学の新展開を図ることである。このための具体的手法として、環状系磁場閉じ込め核融合プラズマ実験に対して予測性を持つ先進的なシミュレーションコードを開発し、磁場閉じ込め核融合研究におけるシミュレーション研究の学術的価値を明確化するために、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトが設定された。

核融合科学研究所においては DD 実験が LHD において予定されており、又、平成 19 年 10 月 24 日には、ITER も正式調印された。効率的・効果的な実験を行うためには、実験に先行して磁場配位、及び外部加熱入力や外部粒子供給等の最適化を評価でき、実験シナリオが策定できる水準の予測性を持つシミュレーションコードの開発が急務である。このようなシミュレーションにおいては、様々な外的要因の元での巨視的実験観測量の全時間的振る舞いを迅速に予測することに重点が置かれるため、外的要因に対する様々な階層でのプラズマ応答が比較的単純な理論モデルで統合された拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションコードが適している。

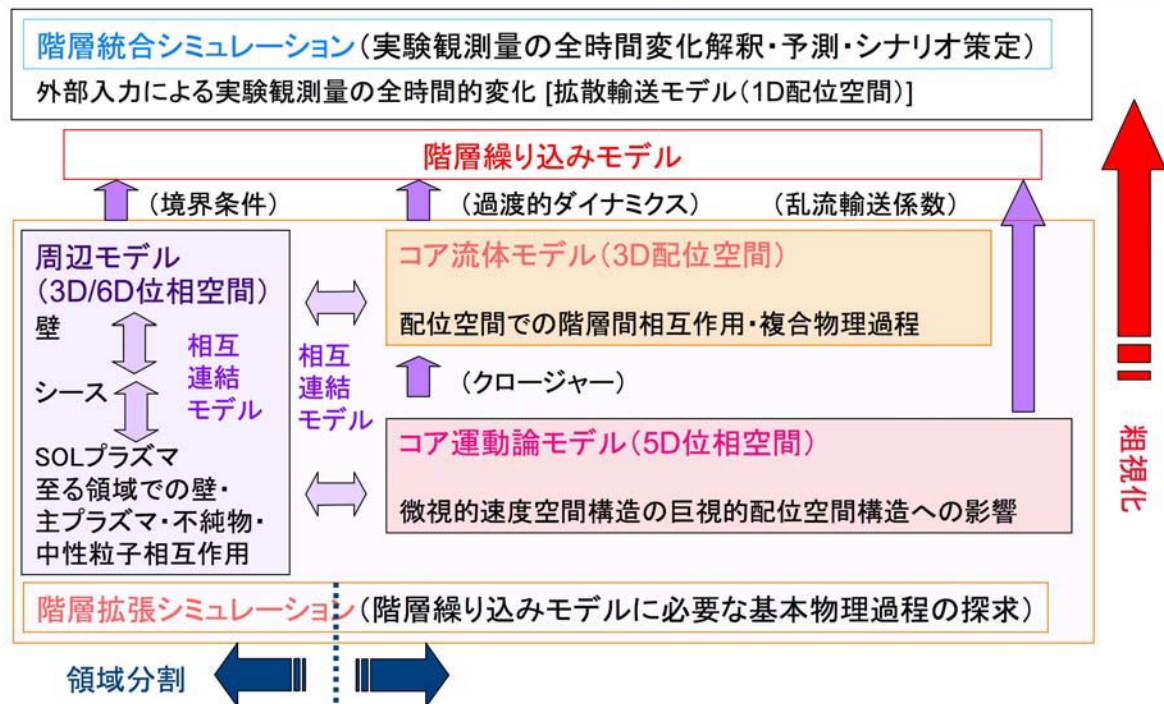
他方、「複合物理過程における様々な時空間スケールで特徴付けられる階層間の相互作用の結果としてその時空間的全体像が決定される開放系」として特徴付けられる核融合プラズマの性質故

に、単一階層から多階層へと物理モデルを拡張し、複合物理過程間の階層間相互作用を矛盾なく取り入れた緻密で先進的な階層拡張シミュレーションコードの開発とそれに基づく緻密な物理的考察が、核融合科学研究に必要な基本的物理過程の理解を確立するためにも、また、その知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等で階層統合シミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを構築し、階層統合シミュレーションの予測精度を向上させるためにも必須である。

更に、ITER、及び ITER-BA においては、国際協調を取りつつも、適切な国際競争の中で、世界的に通用し、世界標準となり得る水準を有する様々なシミュレーションコード群の開発が、1) 個別物理過程を解釈・予測できる階層拡張シミュレーション、及び2) 実験シナリオを策定できる予測性を持つ階層統合シミュレーションの両者において求められているといえる。

上記のような背景の元で予測性を持つシミュレーションコードを開発するために、国内外の大学等との共同研究を基本として、実験及び理論との連携の元に、巨視的な実験観測量の全時間変化の解析を基本とし実験シナリオ策定に適した拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションを用いたアプローチと、階層間及び複合物理間の相互作用の解析を基本とし基本物理過程の探求に適した階層拡張シミュレーションを用いたアプローチの両者を段階的に推進する。更にこれと平行して、階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等として階層統合シミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションの予測精度の向上を図り、最終的には、磁場閉じ込め核融合炉システムにおける核融合プラズマの外部要因に対する応答を予測できる階層統合シミュレーションコードとして「LHD 数値試験炉」を目指す。以上の階層繰り込みシミュレーションの全体像を図 2.1.1-1 に示す。

階層繰り込みシミュレーションの全体構造



物理課題の解明(階層拡張)と実験全体像の予測精度の向上(階層統合)は表裏一体

図 2.1.1-1 階層繰り込みシミュレーションの全体構造

上記の目的を達成するための具体的研究計画は、以下の通りである (図 2.1.1-1 参照)。

階層統合シミュレーション

巨視的な実験観測量の全時間変化の解析を基本とする実験シナリオ策定に適した拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションにおいては、京都大学で開発された統合輸送コード (TASK) を 3 次元磁場配位に拡張した 3 次元環状磁場閉じ込め階層統合シミュレーションコード ; TASK3D を国内外の大学との共同研究を基本として段階的に開発する。外部制御可能な外部入力、及び実験観測に基づく外部損失を導入できるため、実験の状況に合わせた解析及び予測シミュレーションが可能となる。階層拡張シミュレーションで得られた複合物理過程間の階層間相互作用の知見を、理論モデル、数値データ、モジュールとして取り込む繰り込みモデルを段階的に開発し、予測精度の向上を図る。

階層拡張シミュレーション

複合物理過程の階層間相互作用の解析を基本とし基礎物理過程の探求に適した階層拡張シミュレーションコード群を段階的に開発する。階層拡張シミュレーションは、主要階層を隣接階層へと拡張し、複合物理過程における階層間相互作用を緻密に研究するとともに、階層拡張モデル間及び階層統合モデルへの階層繰り込み手法 (乱流輸送係数等の時空間のスケール分離に着目した粗視化モデル、主要物理過程の時間依存性に着目した時間分割法に基づく時間的相互連結モデル、主要物理過程の空間依存性に着目した領域分割法に基づく空間的相互連結モデル

ル)を探索する。階層拡張シミュレーションは、配位空間内の巨視から微視に至る時空間スケールの様々な複合物理過程間相互作用を研究対象とするコア流体モデル、ジャイロ運動論モデルに基づき微視的速度空間構造(揺動)の巨視的配位空間構造への影響を乱流輸送・構造形成等の観点から研究するコア運動論モデル、及び SOL から壁に至る周辺部領域での微視から巨視に至るスケールを有する複合物理過程間の相互作用を研究する周辺モデルに大別される。

階層繰り込みモデル

階層統合シミュレーションの予測精度を向上させるためには、階層拡張シミュレーションで得られた新しい知見を導入することが必要である。階層拡張シミュレーションで得られた知見は、

- 主要物理過程の時間依存性に着目した時間分割法に基づく時間的相互連結モデル
- 乱流輸送係数等の時空間のスケール分離に着目した粗視化モデル
- 主要物理過程の空間依存性に着目した領域分割法に基づく空間的相互連結モデル

等の数値的繰り込み手法を用いて、階層統合シミュレーションへと導入される。開発の段階に応じて比較的単純化された繰り込み手法から高度な繰り込み手法へと発展させる必要がある。現状における比較的単純化された繰り込み手法としては、コア流体プラズマモデルの知見を過渡期的ダイナミクス(主要物理過程の時間依存性に着目した時間分割法に基づく時間的相互連結モデル)として、コア運動論プラズマモデルの知見を乱流輸送係数(時空間のスケール分離に着目した粗視化モデル)として、周辺プラズマモデルの知見を境界条件(主要物理過程の空間依存性に着目した領域分割法に基づく空間的相互連結モデル)として、それぞれ階層統合シミュレーションへ数値的に繰り込むことが考えられる。

時空間のスケール分離に着目した粗視化に基づき、理論的考察、又は比較的単純化された階層拡張シミュレーションの結果から得られた乱流輸送係数を拡散型輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションへ導入するというレベルでは、階層繰り込みモデル開発の歴史は極めて古いものであるが、乱流輸送が拡散過程と解釈できるかどうか(局所的な Fick の法則が成立するかどうか)という視点も考慮すると、明確な答えが得られている訳ではなく(微視的乱流状態が過渡応答を示す例は存在する)、コア運動論プラズマモデルやコア流体プラズマモデルの進展に伴う新しい知見を見据えながら段階的な階層繰り込みモデルの発展を目指している。

上記の研究計画を円滑に推進するため、全国規模での共同研究体制を基本として、プロジェクトを進める。図 2.1.1-2 に、全体像を示す。氏名(敬称略)の色は、黒字はシミュレーション科学研究部所属、薄い紫色はシミュレーション科学研究部以外の核融合科学研究所所属、青色は所外共同研究者であることを示す。階層統合シミュレーションは、京都大学で開発された 2 次元環状磁場配位用の統合シミュレーションコード TASK を 3 次元環状磁場配位へ拡張した TASK3D をコアコードとするため、京都大学との共同研究が主体となると共に、LHD 等の実験への適用による、コードに使用されるシミュレーションモデルの物理的妥当性(validity)及び数値解法の正当性(verification)の確認、及び実験データ及びデータベースの適用の観点から LHD 研究部との連携が極めて重要となる。又、階層拡張シミュレーションにおいても、特に周辺モデルに関しては、壁材料及び表面の解析から、壁と SOL・ダイバータ間のプラズマを対象とする境界層領域、更

に、SOL・ダイバータプラズマ領域と、対象となる物理過程やスケールが極めて広範囲に及び、周辺プラズマそれ自身が多重時空間スケールを持つ多階層領域であるため、LHD 研究部のみならず、徳島大学、慶応大学等の多くの大学や JAEA 等の研究所との共同研究が必須となっている。

プロジェクト体制(国内外の大学等との共同研究を基本)

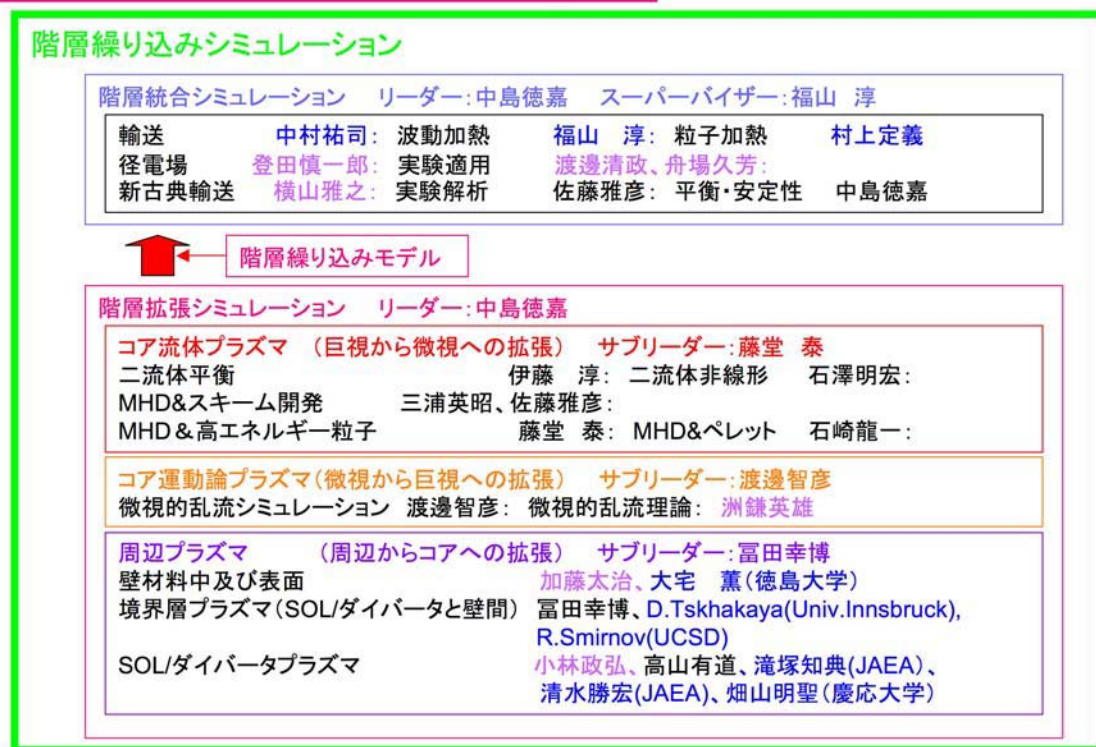


図 2.1.1-2 共同研究を基本としたプロジェクト研究体制

次節以降の具体的な研究報告及びロードマップで示されているように、国内外の大学等との共同研究を基本とした実験及び理論との連携の元に、平成 19 年度シミュレーション外部評価の観点に対して、以下の点から着実な前進があったと考えられる。

1. 評価の観点[2]に対して

中期計画に設定されている環状系磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め物理機構の解明及びその体系化を目指し、「複合物理過程における様々な時空間スケールで特徴付けられる階層間の相互作用の結果としてその時空間的全体像が決定される開放系」として特徴付けられる核融合プラズマの本質を考慮した国内外の大学等との共同研究に基づくプロジェクト研究体制を整備した。

2. 評価の観点[8]-(1)及び[8]-(2)に対して

プロジェクト研究体制の元で、核融合プラズマの本質を考慮した複合物理過程の階層間相互作用を中心として研究課題設定を行っている。更に、3.3.1 節で述べられているように、ITER、及び ITER-BA への適用が明確なテーマ設定、研究体制となっている。

3. 評価の観点[1]に対して

核融合プラズマの本質を考慮した複合物理過程の階層間相互作用を中心として研究課題設定を行い、中期計画に設定されている環状系磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め物理機構の解明及びその体系化に関連して、

- I. 高精度ジャイロ運動論的ブラソフコードを開発することにより、速度空間の微視的揺動レベルが帯状流を介して配位空間内の乱流輸送レベルを規定することを示すとともに、イオン温度勾配に由来する乱流輸送と帯状流の生成について 3 次元磁場配位での乱流熱輸送レベルとプラズマパラメータの関連を議論できるレベルに世界に先駆けて到達した。
- II. 高エネルギー粒子の運動論効果と背景流体プラズマとの波 - 粒子（巨視 - 微視）相互作用による MHD モード励起シミュレーションにおいて、世界に先駆けた進展があった。
- III. 一流体 MHD モデルから微視的效果を含む二流体モデルへ拡張を行う少数多階層シミュレーションコードを開発し、微視的乱流と帯状流の競合状態が作り出す準平衡飽和状態から巨視的 MHD 不安定性が発現しうることを示し、微視的乱流と巨視的不安定構造の共存状態の存在をシミュレーションで世界に先駆けて示した。

4. 評価の観点[7]に対して

国内外の大学等との共同研究を基本とした実験及び理論との連携の元に、巨視的な実験観測の全時間変化の解析を基本とする実験シナリオ策定に適した拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションを用いたアプローチと、複合物理間の階層間相互作用の解析を基本とする基本物理過程の探求に適した階層拡張シミュレーションを用いたアプローチの両者を段階的に推進し、基本物理過程に関する後者の知見を前者へと取り込む階層繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションの予測精度の向上を図り、最終的には、磁場閉じ込め核融合炉システムにおける核融合プラズマの外部要因に対する応答を予測できる階層統合シミュレーションコードとして「LHD 数値試験炉」を目指すという中長期的な展望を見据えた研究計画を立案していると考ええる。

2.1.2. 階層拡張シミュレーション

「複合物理過程における様々な時空間スケールで特徴付けられる階層間の相互作用の結果としてその時空間的全体像が決定される開放系」としての特徴を持つ核融合プラズマの性質故に、単一階層から多階層へと物理モデルを拡張し、複合物理過程間の階層間相互作用を矛盾なく取り入れた緻密で先進的な階層拡張シミュレーションコードの開発とそれに基づく緻密な物理的考察が、核融合科学研究に必要な基本的物理過程の理解を確立するためにも、また、その知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等で階層統合シミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを構築し、巨視的な実験観測の全時間変化を予測する階層統合シミュレーションの予測精度を向上させるためにも必須である。つまり、重要な物理課題の解明（階層拡張）と実験全体像の予測精度の向上（階層統合）は表裏一体の関係にあると考えられる。核融合プラズマにおける重要な物理課題の解明（階層拡張）を進める場合、核融合プラズマの性質を特徴付ける物理過程の分類から、環状系磁場閉じ込め核融合プラズマを、一旦、空間的にセパトリックス内部のコアプラ

ズマと外部の周辺プラズマに分離して取り扱い、後にこれらの相互作用を空間的に連結するという手法が理に適っていると考えられる。更に、コアプラズマの取り扱いは、MHD 不安定性等の比較的巨視的でコヒーレントな構造を持つ現象を中心として、これに対して微視的効果を導入することにより階層間相互作用を考察する流体的取り扱い（コア流体モデル）と、それとは逆に、速度空間の微視的揺動レベルから配位空間の巨視的構造形成を考察する運動論的取り扱い（コア運動論モデル）とに大別されると考えられる。前者は、3 次元配位空間での解析であり、その方程式の構造から物理過程を理解しやすく計算コストも後者と比較して少なく済むが、流体モデルのクロージャーの問題を有する。これに対して、後者は、クロージャーの問題はないが、物理過程の理解は前者と比較して難しく、又、計算コストも大きい。従って、両者の長短を補完する意味合いから、コアプラズマを、巨視スケールから微視スケールへと迫るコア流体モデルと微視スケールから巨視スケールへと迫るコア運動論モデルの両方で考察することが理に適っていると考えられる。以上の考えに基づき、階層拡張シミュレーションは、コア流体モデル、コア運動論モデル、及び周辺モデルとグループ化されている。各グループに関する研究活動及び研究成果を、2.1.2.1 コア運動論モデル、2.1.2.2 コア流体モデル、2.1.2.3 周辺モデルの順に述べる。

2.1.2.1. コア運動論モデル コアプラズマの運動論的乱流輸送シミュレーション（渡邊）

コアプラズマの運動論的モデルの位置づけ

周知のように、核融合の自己点火条件を達成するためには、高温・高密度のプラズマを一定時間以上有限領域に閉じ込めておく必要があるが、プラズマ乱流による粒子や熱の異常輸送がその妨げとなっている。異常輸送は、長らく磁場核融合研究における中心的課題として位置付けられ、数多の研究が積み重ねられているが、核融合の実現に不可欠な高温プラズマ状態が、逆に異常輸送現象の理論研究を非常に困難なものにしている。これは、核融合のような極限状態下では超高温状態のため粒子の平均自由行程が装置サイズの千倍以上に及ぶため通常の流体モデルは成立せず、プラズマの振る舞いを記述するには熱平衡状態からかけ離れた速度分布関数が支配する運動論的性質の解明が必要となるためである。このため問題は本来的に異なるスケール間・階層間に渡る。多次元位相空間における分布関数の与える解は、3 次元流体モデルを包含しつつ、さらに多様な分布・大きな自由度・多くの階層性を持つ。本研究の第一の目的は、ジャイロ運動論的方程式に代表される基礎方程式に立脚したコアプラズマの運動論的モデルを用いて、磁場閉じ込め核融合における高温プラズマ乱流の姿を明らかにし、ひいては異常輸送レベルの予測・輸送低減に寄与することである。加えて、運動論的乱流現象は、通常の流体乱流の枠組みを大幅に拡張するものであり、基礎科学面からも大変意義深く、宇宙プラズマ研究等への応用も期待できる。

ジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーションコード（GKV コード）

多次元位相空間における分布関数の非線形シミュレーションは、核融合プラズマの理論研究において第一原理として位置づけられる解析手法の一つである。この手法により ad hoc なモデルを用いることなく、核融合研究における最大の難問の一つである異常輸送現象に正面から取り組むことが可能となる。分布関数揺動のレベルから装置スケールにまでおよぶ運動論的乱流輸送のシ

シミュレーションを5次元位相空間において精度良く行うためには、大規模シミュレーションを実行する環境が必須である。このために核融合科学研究所のプラズマシミュレータと LHD 数値解析装置、ならびに海洋開発研究機構に設置されている地球シミュレータを利用して研究を進めてきた。

5 次元位相空間における分布関数の時間発展を偏微分方程式として表すジャイロ運動論的方程式は、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける異常輸送を記述するための基本方程式として認められている。米国をはじめとして世界各国で、ジャイロ運動論的シミュレーションにより異常輸送現象を解明しその予測・制御に役立てるための研究が組織的かつ精力的に進められているが、5 次元速度分布関数のゆらぎを十分な精度で再現するシミュレーションはこれまで不可能であった。このため、平成 16 年度より核融合科学研究所の旧・理論・シミュレーション研究センターでは、独自に 5 次元ジャイロ運動論的ヴラソフ・シミュレーション・コード(GKV コード)の開発を進めてきた。[2]

GKV コードは、3 次元実空間で磁力線に沿った方向に座標軸を選ぶフラックスチューブ座標を採用し、ドリフト波がもつバルーニング構造を高分解能で精度良く再現できるように工夫されている。さらに、2 次元速度空間においても分布関数の微細揺動を高分解能で再現し、従来の粒子(マーカー)モデルを用いた $\mathcal{F}$ コードや連続体ジャイロ運動論コードに比べ、数値散逸やノイズの影響を受けない高精度なシミュレーションを可能としている。これにより、物理的な衝突項によりエントロピー釣り合いを保った乱流輸送の統計的な定常状態を再現することに成功し、乱流やゾーナルフローのつくりだす速度分布関数構造を調べるなど、独自性の高い成果を挙げている。[3,5]

その後 GKV コードは、共同利用プロジェクトの一環として地球シミュレータに移植され、トカマクのイオン温度勾配(ITG)乱流輸送の大規模なシミュレーションや、電子温度勾配(ETG)乱流輸送シミュレーション、さらにヘリカル系における ITG 乱流とゾーナルフローのシミュレーションへと順次拡張されてきた。以下に、GKV コードを用いた地球シミュレータ利用プロジェクトの成果の概略を述べる。

- 平成 17 年度に地球シミュレータ利用プロジェクト先進・創出分野の課題として「高温プラズマに於ける多階層複合物理の総合的シミュレーション研究」(プロジェクト責任者：林隆也)が採択され、地球シミュレータを利用する機会を得た。そこで、
 - GKV コードを地球シミュレータ用に移植および最適化し、実効性能約 4.8Tflops (192 ノード利用)、実行効率 40%という高い性能を達成した。これにより、トカマク型装置でのイオン温度勾配(ITG)乱流を分布関数のレベルから正確に取り扱う全トロイダル角シミュレーションがはじめて実行できた。エントロピー釣り合いを高精度に保ち、かつ、従来のシミュレーションに比して揺らぎによる影響が格段に小さく、精度の高い乱流輸送係数の予測が可能となった。
 - トカマク型装置における電子温度勾配(ETG)乱流による電子熱輸送のシミュレーションを実行できるようにコードの拡張を行い、ETG 乱流のシミュレーションを開始した。ここでは、ITG によるイオン熱輸送に比べより大きな無次元化輸送係数を観測し、ETG 乱流の飽和状態を再現することに成功した。

- GKV コードをヘリカル型配位に適用できるようにコードの拡張を行い、ITG 不安定性のシミュレーションを行った。これにより、次年度以降、ヘリカル系における ITG 乱流輸送シミュレーションを進める準備が整った。
- 平成 17 年度の地球シミュレータ共同利用プロジェクトの評価を受けて、平成 18 年度にも継続して上記研究課題が採択され、以下の成果を挙げた。
 - トカマクプラズマのジャイロ運動論的シミュレーションにおける標準的なパラメーター (Cyclone DIII-D base case) について ETG 不安定性の非線形飽和と乱流遷移のシミュレーションに成功した。これにより、同等な条件下で ETG と ITG 乱流輸送の比較研究が可能になり、電子輸送のより強い異常性が示された。
 - GKV コードを、従来のトカマク型配位からヘリカル型へと拡張すると同時に、従来を上回る高い実行性能を達成した(192 ノード使用で実行性能 5Tflops)。
 - 世界にさきがけて、ヘリカル型磁場配位における ITG 乱流輸送のシミュレーションに成功した。大型ヘリカル装置(LHD)を例に、乱流によるゾーナルフロー生成や乱流輸送に対し、ヘリカル磁場が与える影響を調べた。その成果は、第 21 回 IAEA 核融合エネルギー会議で口頭発表された。
- 平成 17 年度、18 年度のプロジェクトの成果により、地球シミュレータ共同利用プロジェクトにおいて「先進・創出分野を代表する」との高い評価を得た。平成 19 年度も上記プロジェクトは継続して採択され (プロジェクト責任者：渡邊智彦)、以下の成果を挙げている。
 - LHD 実験に基づいた標準および内寄せ磁場配位モデルを取り入れられるように、GKV コードの拡張を行った。
 - 新しいコードを用いて、LHD 実験の標準および内寄せ磁場配位を用いた ITG 乱流とゾーナルフローのシミュレーションを行った。標準配位に比べ内寄せ磁場配位においてより強いゾーナルフローが生成・維持され、乱流輸送を抑制することが明らかになった。その結果、より強い ITG 不安定性にもかかわらず、内寄せ配位における局所イオン熱輸送係数が標準配位の場合よりも低下することが示された。これは LHD 実験の閉じ込め特性に対する定性的な理解を与えると同時に、ヘリカル系における閉じ込め最適化へのシナリオに関して一つの理論的な指針を示している。

トカマク型磁場配位におけるイオンおよび電子温度勾配乱流輸送

平成 16 年度にトカマクにおける ITG 乱流輸送シミュレーションのために開発された GKV コードは、まず、プラズマシミュレータを利用してゾーナルフローの線形応答解析や比較的小規模の ITG 乱流シミュレーションに適用された。これによりゾーナルフローと GAM 減衰過程を分布関数構造のレベルから明らかにするとともに、乱流及びゾーナルフロー成分の分布関数揺動生成・伝達そして散逸過程を含んだ ITG 乱流輸送の統計的な定常状態の再現に成功した。[3,5]これらの成果は、ポルトガルで 2004 年に開催された第 20 回 IAEA 核融合エネルギー会議で発表され、また、平成 16 年度外部評価報告書においても高い評価をいただいた。

前小節にあるように、平成 17 年度より採択された地球シミュレータ共同利用プロジェクトの一環として GKV コードによる乱流輸送シミュレーションを実施することが可能となり、コードの

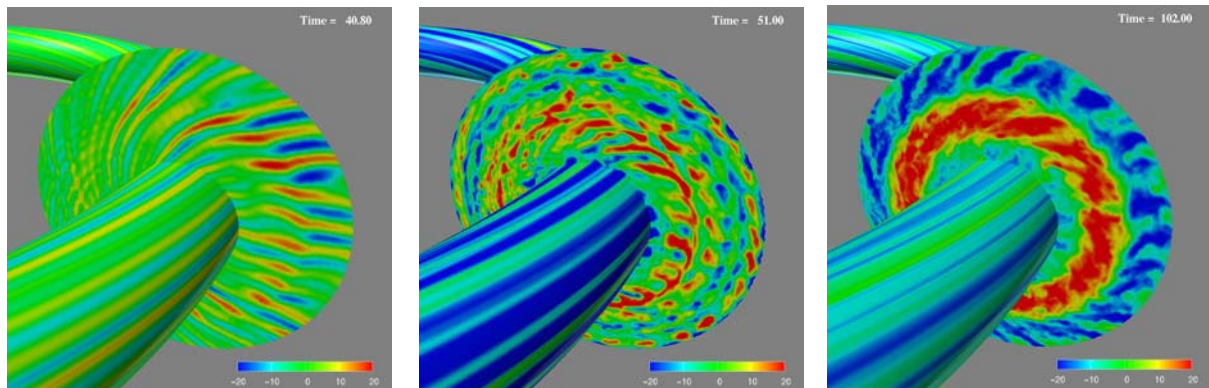


図 2.1.2.1-1 トカマク型磁場閉じ込め配位におけるイオン温度勾配乱流のジャイロ運動論的
ヴラソフ・シミュレーションの結果。不安定性の成長期（左）、飽和途中（中央）、飽和後
の定常状態において見られた静電ポテンシャル分布をカラーで表示している（赤色と青色
でそれぞれ逆回りの渦を表現）。3 次元実空間でのトーラス配位の一部分のみを拡大して表
示している。ゾーナルフローにより小半径方向に伸びた渦構造が破壊される様子やその後
の複雑な渦構造が明瞭に捉えられている。[10]

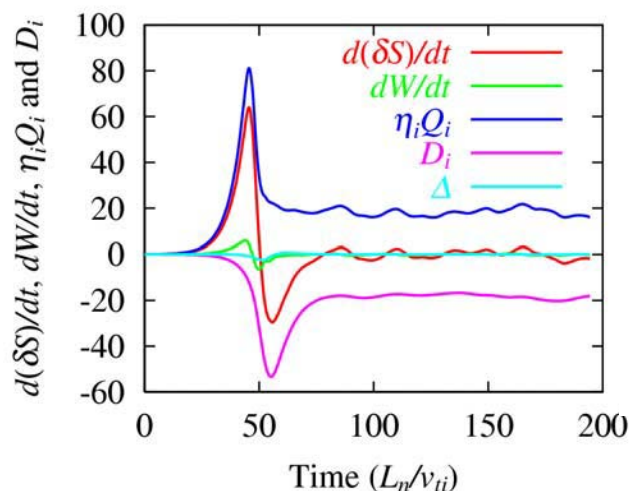


図 2.1.2.1-2 ジャイロ運動論的ヴラソフ・シ
ミュレーションから得られたイオン温度勾
配乱流におけるエントロピー変数 δS の時
間微分、ポテンシャルエネルギー W の時
間微分、イオン熱輸送フラックス Q_i 、衝
突による散逸 D_i の時間発展を示す。分布
関数揺動を含んだプラズマ乱流の統計的
な定常状態が実現されている。[10]

移植および最適化を進めてきた。その結果、プラズマシミュレータを用いた場合に比べ、より大規模なシミュレーションが短時間で実行可能となった。地球シミュレータを用いて行ったトカマク ITG 乱流輸送シミュレーションで得られた結果を以下に示す。[10]

磁気面およびポロイダル面における各時刻での静電ポテンシャル揺動分布を、図 2.1.2.1-1 にカラーで表示している。初期の ITG 不安定性の成長からその飽和にいたる際に、ゾーナルフローが急速に発達し、小半径方向に伸びた渦構造を破壊し、ゾーナルフローと乱流渦が共存した統計的な定常状態へと移行していく様子が鮮明に捉えられている。

このシミュレーションにおける系のエントロピー変数 δS の時間微分、ポテンシャルエネルギー

W の時間微分、イオン熱輸送フラックス Q_i 、衝突による散逸 D_i の時間発展を図 2.1.2.1-2 に示す。ここで δS はイオン速度分布関数揺動 δf の自乗をマックスウェル分布で除した関数の位相空間積分を用いて定義されており、微細スケールを持つ分布関数揺動を反映した量である。これらの変数間のバランスのずれを誤差 Δ としてあわせてプロットしている。図に見られるように、エントロピー変数の成長は飽和し、乱流輸送と衝突による散逸が釣り合った統計的な定常状態 [1] が実現している。この時、輸送フラックスの時間的な揺らぎはこれまでのシミュレーションに比べ非常に小さく、シミュレーション結果から、異常イオン熱輸送係数を高い精度で見積もることができる。

また、このシミュレーションからゾーナルフローの励起過程のより詳しい解析が始められている。図 2.1.2.1-1 に見られるように、不安定性の飽和段階では、小半径方向に短いスケール長、すなわち強いシアを持つゾーナルフローが励起され、これらが不安定性成長の効率的な抑制をもたらしている。一方で、シミュレーションの後半で観測される乱流とゾーナルフローが共存した統計的な定常状態においては、小半径方向に比較的長いスケール長をもつゾーナルフロー成分の振幅が相対的に大きくなっている。

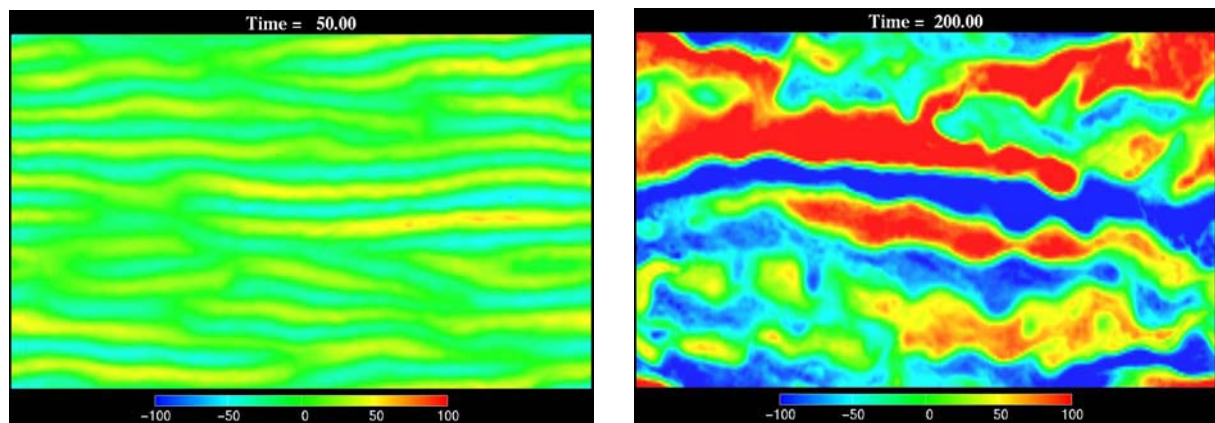


図 2.1.2.1-3 トカマク型磁場閉じ込め配位における電子温度勾配乱流のジャイロ運動論的ヴラソフ・シミュレーションの結果 (DIII-D Cyclone base case)。不安定性の成長期 (左)、および飽和時の静電ポテンシャル分布をカラーで表示している (赤色と青色でそれぞれ逆回りの渦を表現)。3 次元実空間でのトーラス配位の 2 次元断面を表示している。横軸は小半径方向の座標、縦軸は磁力線ラベル方向の座標を表す。径方向に伸びたストリーマ構造が不安定化し、飽和状態にいたる過程のシミュレーションに成功した。[9]

一方、背景成分を断熱応答と仮定すると、ITG モードと電子温度勾配 (ETG) モードはゾーナルフロー成分を除けば、相似関係にある。そのためジャイロ - ボーム則でより大きな電子異常熱輸送を考えるには、ゾーナルフローとの非線形相互作用を介した乱流状態で輸送が飽和する過程をシミュレーションにより検証する必要がある。しかし、従来のジャイロ運動論的シミュレーションでは、ITG 乱流について標準的に用いられてきたパラメータ (DIII-D Cyclone base case) に対して ETG 乱流の飽和レベルを再現することができていなかった。これに対し、平成 18 年度に地球シミュレータを用いて ETG 乱流の大規模な GKV シミュレーションを実行し、標準的パラメータのもとで ETG 乱流の飽和状態をはじめて確認した。[9] 図 2.1.2.1-3 は、ETG モードの線形成長

時、および ETG 乱流の飽和状態における静電ポテンシャルのカラー図を示している。トーラスのポロイダル角 $\theta=0$ での断面を 2 次元空間にプロットしており、横軸は小半径方向の座標、縦軸は磁力線ラベルを表している。線形成長時には径方向に長く伸びたストリーマ状のモード構造が発達するが、非線形段階では、磁力線ラベル方向により波長の長い成分が支配的となり、さらにストリーマ状のモード構造が不安定となって飽和にいたる様子が観察された。この時、ジャイロ - ボーム単位で規格化した値で、ITG に比べ数十倍大きな輸送係数が得られた。

これまでの結果を受けて、ITG および ETG 乱流におけるゾーナルフロー励起と乱流輸送抑制過程のより基本的な理解を進めるために、平成 20 年度から 21 年にかけて、基礎的なプロセスを含めたより詳細な研究を進める予定である。現在、その一環として、プラズマシミュレータおよび LHD 数値解析装置を用いて、スラブ配位における ITG および ETG 乱流の基礎的なシミュレーション研究も並行して行っている。

ゾーナルフローと測地的音響振動のシミュレーション

ポロイダル及びトロイダルモード数(m,n)が 0 で、小半径方向に速度シアを伴う、いわゆるゾーナルフローが、乱流揺動とそれらがもたらす異常輸送の抑制に有効に働くことが、トカマクにおけるイオン温度勾配(ITG)乱流の研究から指摘されてきた。トロイダル配位において、ゾーナルフローは $m=1$ をもつ測地的音響モード(GAM)と結合する。このゾーナルフロー - GAM 振動の基本特性を線形初期値問題によって解析することにより、ゾーナルフローの特徴的な生存時間を見積もることができる。

初期条件として $m=0$ 、 $n=0$ のマックスウェル分布を与えると、トロイダル結合により GAM 振動が発生する。GAM 振動は非捕捉粒子による Landau 減衰をうけて無衝突減衰し、その後、一定振幅のゾーナルフローが維持されることが Rosenbluth-Hinton によってトカマク配位において示されていた。このゾーナルフロー-GAM 振動の理論特性解析のヘリカル系への拡張が、平成 16 から 17 年にかけて洲鎌 - 渡邊により行われた。[4,6] その研究から得られた、単一ヘリカル磁場成分のみの場合のゾーナルフロー-GAM 振動の線形応答理論の解析および GKV コードを用いた数値シミュレーション結果を図 2.1.2.1-4 と図 2.1.2.1-5 に示す。このシミュレーションは、核融合科学研究所のプラズマシミュレータおよび LHD 数値解析システムを用いて行われた。ゾーナルフローの線形応答理論とシミュレーションが良く一致した結果が得られている。

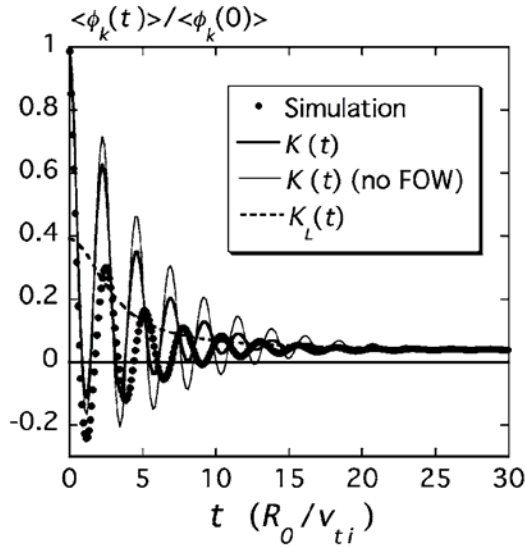


図 2.1.2.1-4 ヘリカル系のゾーナルフロー - GAM 振動の線形応答解析から得られたゾーナルフローポテンシャルの時間発展。実線は、洲鎌 - 渡邊による解析理論の結果、点線は GKV シミュレーションの結果を表す。[6]

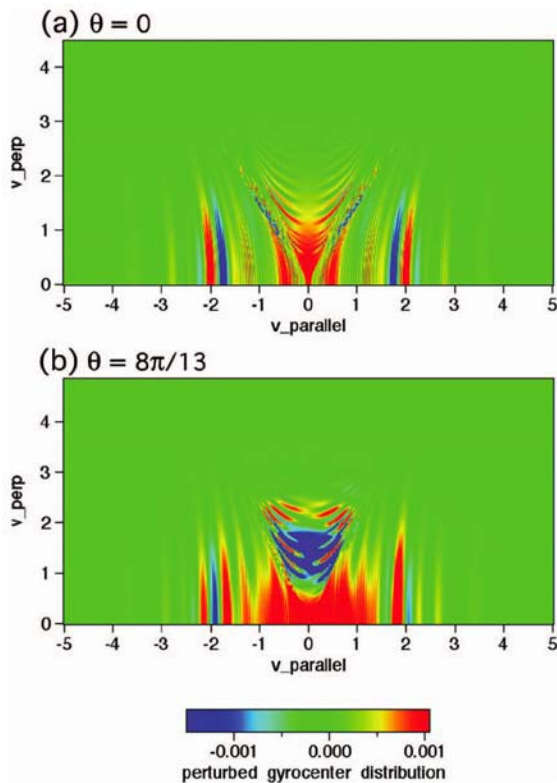


図 2.1.2.2-5 ヘリカル系のゾーナルフロー - GAM 振動の線形応答シミュレーションから得られた、ポテンシャルにより無次元化されたイオン速度分布関数の実数部。上はポロイダル角 $\theta = 0$ 、下は $\theta = 8\pi/13$ における分布をカラーで表現している。下図ではヘリカル捕捉粒子のドリフトにより分布関数が平均的に減少している部分（青色）がはっきりと現れている。[6]

また、図 2.1.2.1-5（下）にある磁場強度の極小点におけるイオン速度分布関数を見ると、ヘリカル捕捉粒子の径方向ドリフトにより分布関数が平均的に減少している部分（青色）が生じることが分かる。これらの結果から、ヘリカル捕捉粒子の径方向ドリフトを遅くするように、すなわち、イオンの新古典拡散を低減するようにヘリカル磁場配位を設定することで、ゾーナルフローがより長時間維持され得ることが示されている。また、ヘリカルリップルを通過する粒子による分布関数構造の変形などトカマクにはない特徴も見取れる。

ヘリカル系のゾーナルフローと GAM 振動を対象として導出されたこの理論およびシミュレーションは、もちろんトカマクにおける解析に対しても有効である。ヘリカル磁場成分をゼロとした解は、非捕捉粒子の有限軌道幅効果を含み、トカマクにおける Rosenbluth-Hinton 理論や GAM 振動理論の一般化としてまとめられる。この理論では、トカマクでの有限軌道幅効果を含んだ GAM 振動数とその減衰率として整理され、GKV シミュレーションによる結果と非常に良い一致を示している（図 2.1.2.1-6 参照）。[7] この結果は、トカマクのジャイロ運動論的シミュレーションの精度を検証するための指標として認められ、国内外の他のシミュレーションコードの検定にも用いられている。

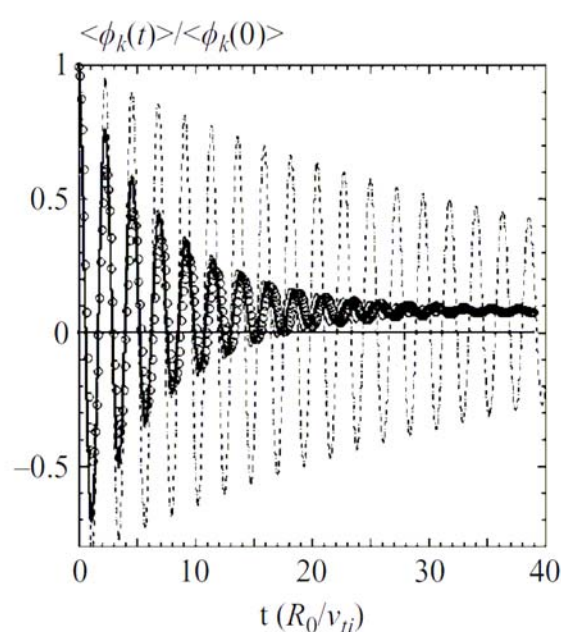


図 2.1.2.1-6 トカマクのゾーナルフロー - GAM 振動の線形応答解析から得られた、ゾーナルフローポテンシャルの時間発展。有限軌道幅効果を含んだ解析（実線）は GKV シミュレーションの結果を良く再現するのに対し、有限軌道幅効果のない従来の解析（破線）では GAM 振動の減衰率に大きな違いが現れることが分かる。
[7]

また、平成 18 年度にこの理論およびシミュレーション解析は、トカマクにおける電子温度勾配 (ETG) 乱流により駆動されるゾーナルフローの解析へと拡張された。ETG 駆動の場合には、ゾーナルフロー電場に対する背景イオンの応答は断熱近似で与えられ、背景電子が応答しない ITG 乱流駆動の場合とは異なった応答関数をもつ。その線形応答についても ETG 版の GKV コードを用いたシミュレーションを行い、理論解析と一致する結果を得た。[13]

さらに、平成 18 年度および 19 年度において、上述のヘリカル系におけるゾーナルフローと GAM 振動の解析を、LHD 平衡に基づいた複数のサイドバンド磁場成分を取り入れた系へと拡張した。複数のヘリカル磁場成分とその径方向微分を含むように拡張された GKV シミュレーションを行った結果、標準磁場配位に比べて内寄せ配位では、磁気丘成分の増加によって ITG モードの成長率は増加するが、GAM 振動減衰率も増加し、残留ゾーナルフローレベルが増大、かつ、より長時間維持され得ることが Ferrando - 洲鎌 - 渡邊により確認された（図 2.1.2.1-7 および図 2.1.2.1-8 参照）。[15,16] 単純な磁場配位モデルを用いた場合には内寄せ配位の成長率は、標準配位での値に比べ約 60% 程度大きかったが、実際の LHD の標準および内寄せ磁場配位をより正確表現するために改良された磁場配位パラメータを用いたモデル（以下、「改良モデル」と呼ぶ）ではその差は小さくなっていることが分かる。この結果は、波数の小さな領域において、山岸による線形固有値解析と矛盾のない結果を与えている。プラズマシミュレータおよび LHD 数値解析装置にお

いて行われたこれらの線形シミュレーション結果は、それ自身の重要性に加え、地球シミュレータを利用したより大規模な ITG 乱流シミュレーションを行うための有用な指針を与えている。

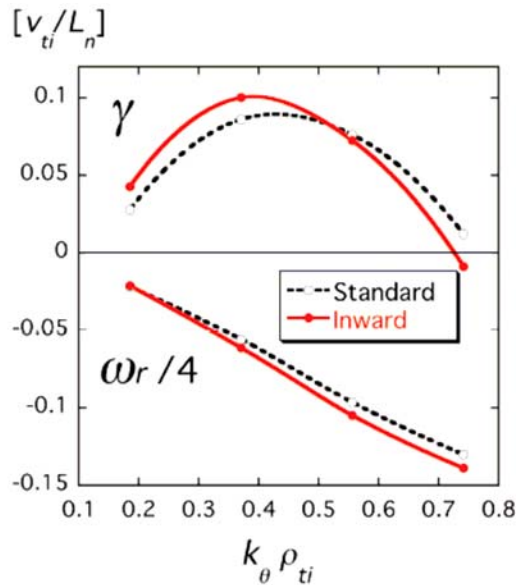


図 2.1.2.1-7 LHD 実験にもとづいた標準・内寄せ磁場配位の改良モデルを用いた線形 GKV コードによって得られたトロイダル ITG 不安定性の成長率と周波数。黒破線は標準配位のモデルを、赤実線は内寄せ磁場配位のモデルに対応。ここでは、 $\eta_i=3$ を用いた。[16]

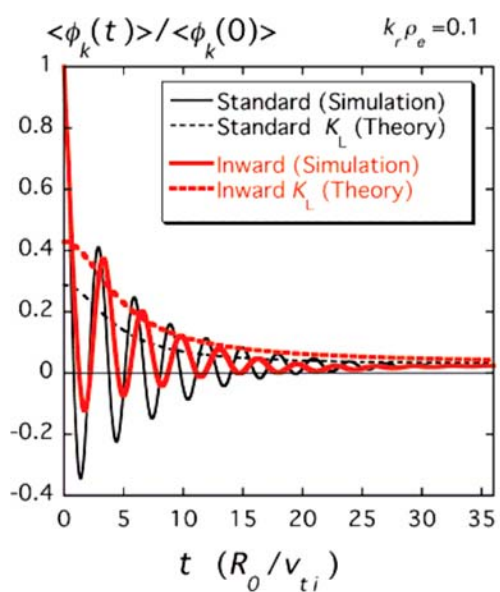


図 2.1.2.1-8 LHD 実験にもとづいた標準・内寄せ磁場配位の改良モデルを用いた線形 GKV コードによって得られたゾーナルフローポテンシャルの時間発展（実線）と、理論解析から得られたゾーナルフローの長時間応答関数 K_L （破線）。黒は標準配位のモデルを、赤は内寄せ磁場配位のモデルに対応。[16]

ヘリカル系におけるイオン温度勾配乱流輸送

トカマク型磁場閉じ込め装置における ITG 乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーションに適用された GKV コードを、平成 17 年度よりヘリカル型装置向けに拡張し、前小節で述べたように ITG 不安定性の線形解析およびゾーナルフロー - GAM 振動の応答解析に適用してきた。その結果から、

- LHD の内寄せ磁場配位では、標準配位に比べ、ITG 不安定性はより強くなる。
- 一方、内寄せ磁場配位においてヘリカル捕捉粒子の径方向ドリフトが遅くなり、あるレイノルズ応力で励起されたゾーナルフローが、標準配位の場合に比べより長時間維持される。
- それにより内寄せ配位において、ITG 乱流輸送がより効果的に抑制される。

という予測が立てられた。[4,6] このシナリオが成立すれば、内寄せ磁場配位でより良好な閉じ込めが観測されている LHD 実験の結果に対して、一つの定性的な理解を与えることができると期待される。

こうして平成 18 年度より、ヘリカル系における ITG 乱流輸送の GKV シミュレーションを開始した。ヘリカル磁場の効果は、磁力線に沿った磁場強度の変化として次のようにモデル化されている。

$$B = B_0 \left[1 - \varepsilon_{00}(r) - \varepsilon_t(r) \cos z - \sum_{l=L-1}^{l=L+1} \varepsilon_l(r) \cos((l - Mq)z - M\alpha_0) \right]$$

$$\mathbf{v}_d \cdot \nabla = -\frac{v_{\parallel}^2 + \Omega_0 \mu}{\Omega_0 R_0} \left[\left\{ R_0 \varepsilon'_{00} + \cos z + \sum_{l=L-1}^{l=L+1} (\varepsilon_l / \varepsilon_t) l \cos((l - Mq)z - M\alpha_0) \right\} \frac{\partial}{\partial y} \right. \\ \left. + \left\{ \sin z + \sum_{l=L-1}^{l=L+1} (\varepsilon_l / \varepsilon_t) l \sin((l - Mq)z - M\alpha_0) \right\} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + \hat{s}z \frac{\partial}{\partial y} \right\} \right]$$

ここで L および M はヘリカル磁場のポロイダルおよびトロイダル周期を、 ε_l はポロイダル数 l のヘリカル磁場成分を表す。 $\mathbf{v}_d$ はトロイダル磁場中でのイオンの曲率および ∇B ドリフト速度を表す。磁場強度の変化は、ミラー力の計算においても同様に考慮されている。

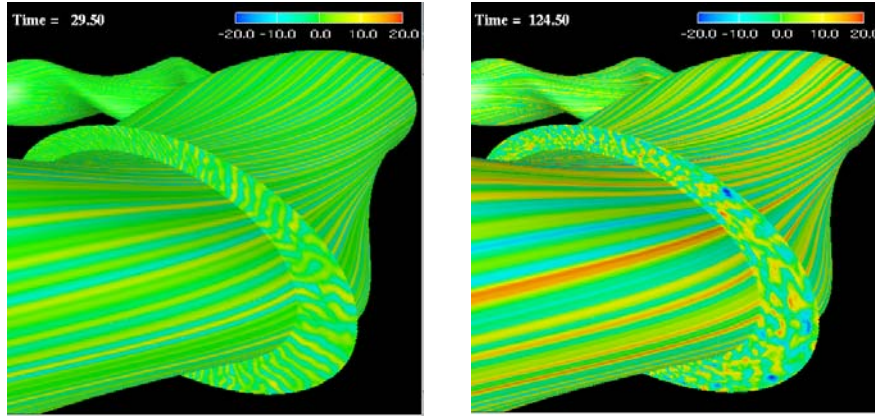


図 2.1.2.1-9 簡単化された LHD の標準磁場配位モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーション結果からポテンシャル揺動をカラー図で表示。左は線形成長時の、右は乱流状態での様子を表している。初期に径方向に長く伸びたバルーニング型のモード構造が成長するが、ゾーナルフローの発生により破壊され、乱流状態に移行する。[8,14]

平成 18 年度には、簡単化された標準および内寄せ磁場配位モデルを用いて、ITG 乱流輸送の GKV シミュレーションがはじめて実行された。[8,10,14] この場合の標準配位モデルから得られたポテンシャル揺動の 3 次元カラー図を図 2.1.2.1-9 に示す。初期に径方向に長く伸びたバルーニング型のモード構造が成長するが、ゾーナルフローの発生により破壊され、乱流状態に移行する

様子が見て取れる。標準 ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.2\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=0$) および内寄せ ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.8\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=-0.2\varepsilon_r$) モデル磁場配位における ITG 乱流によるイオン熱輸送係数 χ_i の時間変化を図 2.1.2.1-10 に表示する。他のパラメータは両者に共通とし、 $r_0/R_0=0.1$, $q_0=1.5$, $s=-1$, $R_0/L_n=3.333$, $\eta_i=4$, $\tau_e=1$, $\nu_{Li}/\nu_i=0.002$ の値を用いた (詳細は参考文献を参照)。ここで用いたパラメータでは、図 2.1.2.1-7 の LHD 実験に即した標準・内寄せ磁場配位の改良モデルの場合と異なり、標準配位に比べて内寄せ配位の場合に ITG 不安定性の成長率は 60%程大きな値をとる。そのため、図 2.1.2.1-10 にあるように内寄せ配位の場合の χ_i はより速く成長し、大きなピーク値をもつ。しかし、その後 χ_i の値は減少し、定常的な乱流状態においては両者の差はおよそ 16%程度に縮小していることが分かる。

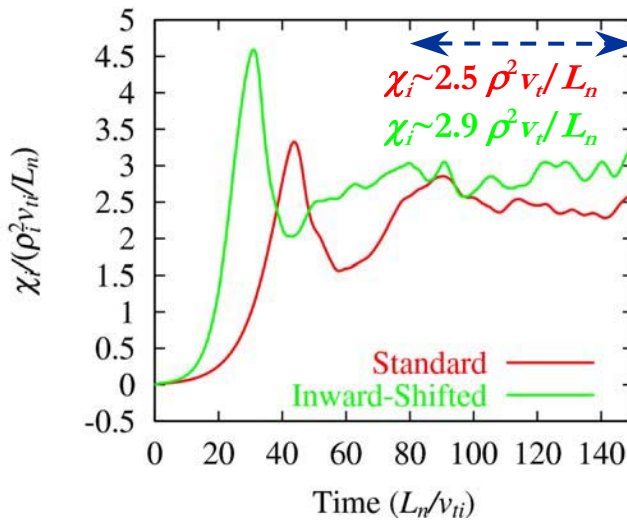


図 2.1.2.1-10 単純化された LHD の磁場配位モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーションから得られたイオン熱輸送係数の時間発展。赤色と緑色はそれぞれ標準 ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.2\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=0$) および内寄せ ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.8\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=-0.2\varepsilon_r$) 磁場配位モデルによる結果。図の中の数値は $t=80-150$ での χ_i の時間平均値を示す。[8,14]

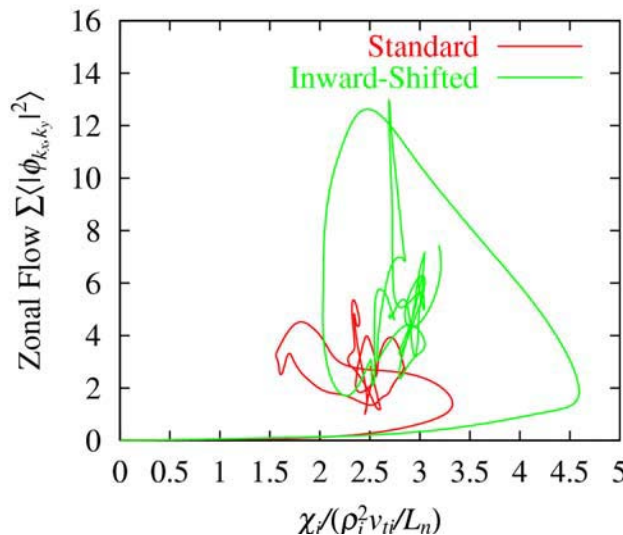


図 2.1.2.1-11 単純化された LHD の磁場配位モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーション結果を、横軸を χ_i 、縦軸をゾーナルフローポテンシャルの自乗振幅で表した空間で表示。赤色と緑色はそれぞれ標準 ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.2\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=0$) および内寄せ ($\varepsilon_r=\varepsilon_L=0.1$, $\varepsilon_{L-I}=-0.8\varepsilon_r$, $\varepsilon_{L+I}=-0.2\varepsilon_r$) 磁場配位モデルによる結果を表す。[8,14]

図 2.1.2.1-10 で見られた内寄せ配位における乱流輸送レベルの改善は、強く励起されたゾーナルフローによる輸送抑制に帰せられる。横軸を χ_i 、縦軸をゾーナルフローポテンシャルの自乗振幅で表した空間に 2 つのシミュレーション結果をプロットしたものが図 2.1.2.1-11 である。不安定性の成長とともに輸送が急激に増大する (データ点が原点から横軸にほぼ沿って移動) が、その後ゾーナルフローが励起され輸送レベルが減少し (データ点が図の左斜め上に向かって移動)、

乱流状態では輸送およびゾーナルフローが定常値の周りで揺らいでいる（ふらつきながらデータ点がある領域内にほぼ収まる）様子が見て取れる。この時、内寄せ配位の場合により強いゾーナル流が励起されていることが分かる。これは、ヘリカル捕捉粒子の径方向ドリフト運動が遅くなり新古典輸送が改善される内寄せ配位において、同時にゾーナルフローがより強く励起されて乱流輸送の効率的な抑制がもたらされる、という理論予測と矛盾しない結果となっている。このことは同時に、この小節の冒頭でまとめた理論モデルが LHD 実験における内寄せ磁場配位での閉じ込め改善に対する理解として有用であることを、肯定的に示唆する結果を与えている。以上の成果は、2006 年 10 月に第 21 回 IAEA 核融合エネルギー会議で口頭発表された。[8]

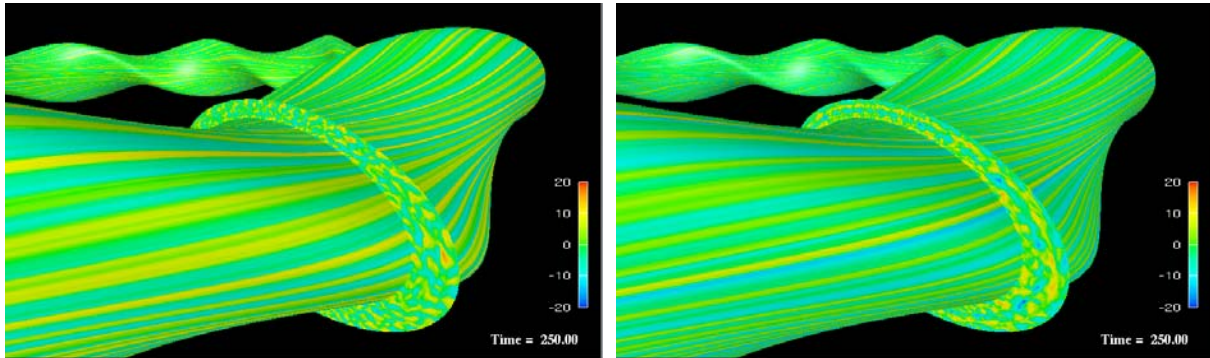


図 2.1.2.1-12 LHD 実験に基づいた標準（左）および内寄せ（右）磁場配位の改良モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーション結果から得られたポテンシャル揺動のカラー図。時刻はいずれも $t=250L_n/v_t$ でのもの。内寄せ配位の場合により強いゾーナルフローが発生している様子が見て取れる。[16,17]

上記の成果を受けて、平成 18 年度後半から平成 19 年度にかけて、LHD 実験の標準・内寄せ磁場配位の改良モデルを用いた ITG 乱流輸送のシミュレーション研究が進められた。より詳細なヘリカル磁場成分とその径方向微分や磁気丘成分が取り入れられるとともに、安全係数（回転変換）と磁気シアなどのパラメータについても、実験結果を再構成した平衡配位に準じた値を用いて新しいモデルが構築された。その結果、単純な磁場配位モデルを用いた場合には内寄せ配位の成長率は標準配位での値に比べ約 60% 程度大きかったが、図 2.1.2.1-7 に示されているように、標準・内寄せ磁場配位を表す改良モデルの下ではその差は小さくなっていることが分かる。同時に、図 2.1.2.1-8 にあるように内寄せ配位において残留ゾーナルフローレベルがより増大することが線形 GKV シミュレーションより明らかとなった。そこで、この改良モデルを用いて ITG 乱流輸送の非線形 GKV シミュレーションを行った。[16,17] 図 2.1.2.1-12 はそのときのポテンシャル揺動分布のスナップショットをカラー図で示したものである。内寄せ配位の場合に、ポテンシャル分布の径方向の縞模様がより明瞭に現れている。以下で見るように、これは、そこでより強いゾーナルフローが発生していることに対応している。

図 2.1.2.1-12 にある 2 つのシミュレーションから得られたイオン熱輸送係数 χ_i の時間発展を図 2.1.2.1-13 に示す。この標準・内寄せ磁場配位の改良モデルの場合にも、内寄せ配位の方が ITG 不安定性の成長率がより大きいため（単純化された磁場モデルを使った図 2.1.2.1-10 の場合よりその差は小さいが）、 χ_i はより大きなピーク値をもつ。しかし、その後急激に減少し、飽和した乱流

状態では、内寄せ配位の場合の χ_i は、標準配位に比べ $t=60-250$ での時間平均で約 20%小さな値となっている。時間平均されたゾーナルフローポテンシャルの径方向分布を図 2.1.2.1-14 に示す。図 2.1.2.1-8 の線形応答解析から期待したように、内寄せ配位において、標準配位の場合の約 3 倍大きな時間平均振幅をもつゾーナルフローが励起された。これが内寄せ配位におけるイオン熱輸送フラックスの低減をもたらしている。さらに、図 2.1.2.1-11 と同様に、横軸を χ_i 、縦軸をゾーナルフローポテンシャルの自乗振幅で表した空間に 2 つのシミュレーション結果をプロットした (図 2.1.2.1-15 参照)。ゾーナルフローによる輸送抑制過程がはっきり見て取れる。定常乱流状態においては、内寄せ配位においてゾーナルフローが強く、かつ、輸送係数が小さい状態が実現されていることが分かる。この結果は、本小節の冒頭で述べた、「ヘリカル捕捉粒子の径方向ドリフトを減らして高いゾーナルフロー振幅を維持し、これにより乱流輸送を抑制する」という理論予測を、シミュレーションにより実証したものであり、同時に、LHD 実験の内寄せ磁場配位における閉じ込め改善について定性的な理解を与えている。一連の成果は、2007 年 10 月の土岐コンファレンス・国際ステラレータ／ヘリオトロンワークショップ合同会議で、招待講演として発表された。[16]

平成 20 年度および 21 年度においては、上述の研究をさらに発展させ、新古典輸送などから作られるより大規模かつ準定常的な径方向電場がゾーナルフローに及ぼす効果や、それがひいては ITG 乱流輸送にどのように影響するかについて、理論研究と密接な連携を図りながら、GKV シミュレーションを用いた研究を進めていく予定である。

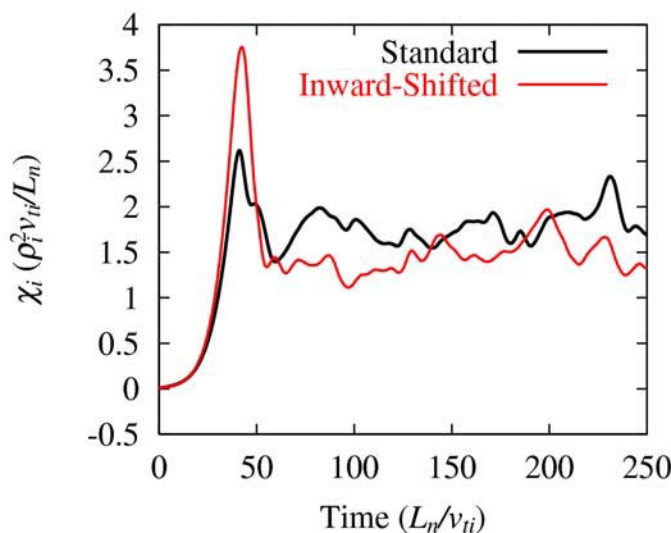


図 2.1.2.1-13 LHD 実験パラメータに基づいた標準（黒）および内寄せ（赤）磁場配位の改良モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーションから得られたイオン熱輸送係数の時間発展。 $t=60-250$ での時間平均では、内寄せ配位の χ_i は標準配位に比べ約 20%小さな値となっている。[16,17]

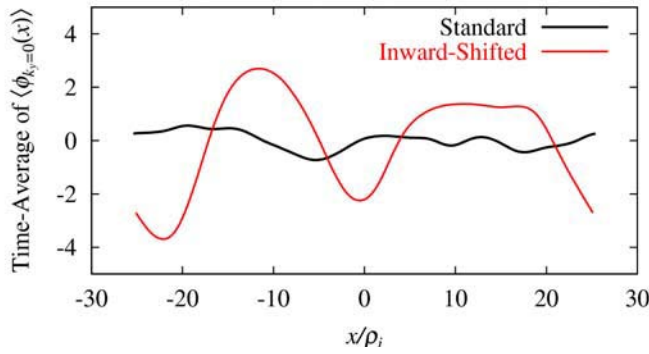


図 2.1.2.1-14 LHD 実験パラメータに基づいた標準 (黒) および内寄せ (赤) 磁場配位の改良モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーションから得られたゾーナルフローポテンシャルの径方向分布 ($t=60-250$ での時間平均)。[16,17]

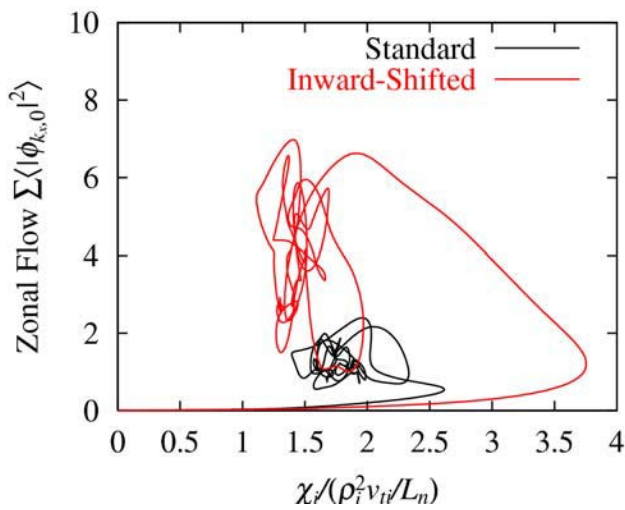


図 2.1.2.1-15 LHD 実験パラメータに基づいた標準 (黒) および内寄せ (赤) 磁場配位の改良モデルを用いた ITG 乱流の GKV シミュレーション結果を、横軸を χ_i 、縦軸をゾーナルフローポテンシャルの自乗振幅で表した空間で表示。内寄せ配位において、より強いゾーナルフローが輸送の低減をもたらしている。[16,17]

参考文献

- [1] T.-H. Watanabe and H. Sugama, “Kinetic Simulation of Steady States of Ion Temperature Gradient Driven Turbulence with Weak Collisionality”, Physics of Plasmas Vol.11, No.4, pp.1476-1483 (2004).
- [2] T.-H. Watanabe and H. Sugama, “Plasma Turbulent Transport and Fine-Scale Structures of Phase Space Distribution Function”, JPFR SERIES vol.6 23-27 (2004).
- [3] T.-H. Watanabe, and H. Sugama, “Velocity-Space Structures of Distribution Function in Toroidal Ion Temperature Gradient Turbulence” in proceedings of the 20th IAEA Fusion Energy Conference (Vilamoura, Portugal, 2004) TH/8-3Rb. (IAEA 発表論文)
- [4] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Dynamics of Zonal Flows in Helical Systems”, Physical Rev. Lett. Vol.94, 115001 (2005).
- [5] T.-H. Watanabe, and H. Sugama, “Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence”, Nucl. Fusion Vol.46, 24-32 (2006).
- [6] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless damping of zonal flows in helical systems”, Phys. Plasmas Vol.13, 012501 (2006).
- [7] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless damping of geodesic acoustic modes”, J. Plasma Phys. Vol. 72, 825-828 (2006).

- [8] T.-H. Watanabe, and H. Sugama, “Gyrokinetic Theory and Simulation of Zonal Flows and Turbulence in Helical Systems” in proceedings of the 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006) EX/5-4. (IAEA 発表論文)
- [9] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and W. Horton, “Gyrokinetic theory and simulation of toroidal ETG turbulence and zonal flow”, 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, UP1.00066 (2006).
- [10] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic-Vlasov simulations of the ion temperature gradient turbulence in tokamak and helical systems” in Theory of Fusion Plasmas (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006) p264.
- [11] S. Ferrando i Margalet, H. Sugama, T.-H. Watanabe, Y. Yoshimura, C. Suzuki, and A. Shimizu, “Simulations of Zonal Flow Damping and Electron Bernstein Waves in Helical Systems”, in Theory of Fusion Plasmas (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 330-335.
- [12] H. Sugama, T.-H. Watanabe, S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic and Gyrofluid Models for Zonal Flow Dynamics in Ion and Electron Temperature Gradient Turbulence”, in Theory of Fusion Plasmas (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006), 412-417.
- [13] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and W. Horton, “Collisionless kinetic-fluid model of zonal flows in toroidal plasmas”, Phys. Plasmas 14, 022502 (2007).
- [14] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic simulation of zonal flows and ion temperature gradient turbulence in helical systems”, Nucl. Fusion Vol.47, 1383-1390 (2007).
- [15] S. Ferrando-Margalet, H. Sugama, and T.-H. Watanabe, “Zonal flows and ion temperature gradient instabilities in multiple-helicity magnetic fields”, Phys. Plasmas (2007) in press.
- [16] H. Sugama, T.-H. Watanabe, and S. Ferrando-Margalet, “Gyrokinetic Studies of Ion Temperature Gradient Turbulence and Zonal Flows in Helical Systems”, Proceedings of the Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007, I-08.
- [17] T.-H. Watanabe, S. Ferrando-Margalet, and H. Sugama, “Effects of multi-helicity confinement fields on zonal flows and ion temperature gradient turbulence”, Proceedings of the Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007, P2-061.

2.1.2.2. コア流体モデル

2.1.2.2.1. アルヴェン固有モードと高速粒子の相互作用（藤堂）

高速粒子-MHD 連結シミュレーションコード(MEGA)及び摂動論的シミュレーションコードを開発して、アルヴェン固有モード(Alfvén Eigenmode) および高速粒子モード(Energetic Particle Mode; EPM)と高速粒子の相互作用に関する研究を推進している。中性粒子解析器(Neutral Particle

Analyzer; NPA)を用いて高速イオンエネルギー分布時間発展が計測されている LHD プラズマについて、AE3D コード[1]を用いてトロイダルアルヴェン固有モード(TAE)の周波数と空間分布を解析した。その TAE による高速イオン輸送をポアンカレプロットを作成して調べ、NPA 計測によって示唆される高速イオン輸送に対して整合性のある TAE 振幅を議論した[2]。MEGA コードの MHD 方程式をドリフトモデルに拡張して、ITER 弱負磁気シアプラズマにおけるアルヴェン固有モード時間発展と高速 α 粒子輸送を調べた[3]。高速粒子分布に対する高速粒子モードの周波数と空間分布の依存性を MEGA コードを用いて明らかにした[4]。低雑音粒子シミュレーション手法 (δf 法)の物理量保存を改善する全特性曲線法(total characteristic method)を独自に考案し[5]、それを用いてジャイロ運動論的電磁プラズマシミュレーションモデルを構築した[6]。

1) LHD におけるアルヴェン固有モードによる高速イオン輸送に関する数値解析

高速イオンエネルギースペクトルの時間発展が NPA によって計測されている LHD 実験がある。その中で#47645 の実験では、アルヴェン固有モードの不安定化に伴って高速イオンエネルギースペクトルに減少部分と増加部分の両方が観測されている。減少部と増加部の高速イオン減速時間の比較から、アルヴェン固有モードによって高速イオンがプラズマ小半径の 10%程度輸送されたものと推定することができる。このプラズマの安全係数分布とトロイダルモード数 $n=1$ のアルヴェン連続スペクトルを図 2.1.2.2.1-1 に示す。

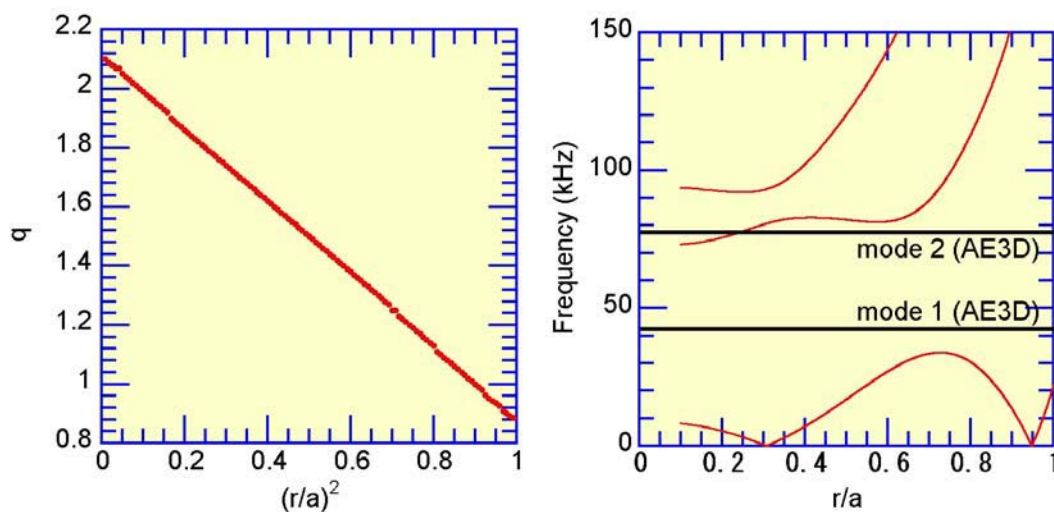


図 2.1.2.2.1-1 LHD プラズマ#47645 の安全係数分布 (左) とトロイダルモード数 $n=1$ のアルヴェン連続スペクトル (右)。

このプラズマにおけるアルヴェン固有モードの周波数と空間分布を AE3D コードを用いて解析し、実験で観測されたトロイダルモード数 $n=1$ の不安定性の候補として二つの TAE を見出した。その空間分布を図 2.1.2.2.1-2 に示す。

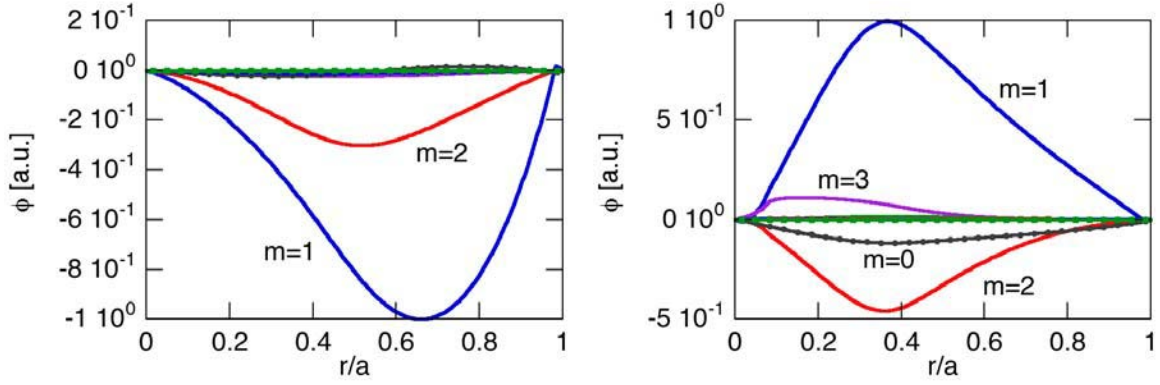


図 2.1.2.2.1-2 AE3D コードを用いて解析したトロイダルモード数 $n=1$ の二つの TAE。周波数はそれぞれ 42.7kHz (左) と 79.1kHz (右)。

また、NPA 視線上の高速粒子の軌道を解析した。高速イオンエネルギースペクトルに変化が観測された 150keV のエネルギーを持つ粒子を対象とした。NPA 視線上から粒子軌道を追跡し、粒子軌道がポロイダル面を一周する時間からポロイダル軌道周波数 ω_θ を定義し、その時間内に粒子が移動するトロイダル角からトロイダル軌道周波数 ω_ϕ を定義する。図 2.1.2.2.1-2 に示した TAE はトロイダルモード数 $n=1$ 、ポロイダルモード数 $m=1$ が主成分なので、 $m/n=1/1$ の軌道周波数 $f_{m/n} = (n\omega_\phi - m\omega_\theta)/2\pi$ を調べた。HINT コードで計算した MHD 平衡を用いた。計算した軌道周波数 $f_{1/1}$ を NPA 視線上の計算開始点の大半径の関数として図 2.1.2.2.1-3 に示す。実験で観測された二つの不安定モードの周波数、55kHz と 68kHz に一致する軌道周波数を持つ粒子が存在することが確認できた。

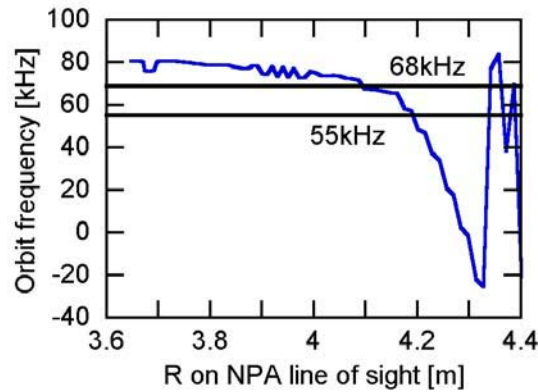


図 2.1.2.2.1-3 NPA 視線上のエネルギー150keV の高速イオンの軌道周波数 $f_{1/1}$ 。横軸は NPA 視線上の計算開始点の大半径。

軸対称系での波動と粒子の相互作用では、 $E' = E - \frac{\omega}{n} P_\phi$ が保存される。ここで E は粒子の全エネルギー、 ω は波動の角周波数、 n はトロイダルモード数、 P_ϕ は粒子のトロイダル運動量である。この性質を利用すると、位相空間の複雑な構造をポアンカレプロットで理解することができる。

そこで、LHD と同程度のトカマク配位での位相空間構造を調べた。用いたトカマク平衡は、大半径 3.67m, 小半径 0.54m, プラズマ中心でのトロイダル磁場 0.5T, 安全係数分布 $q=2.11-1.23(r/a)^2$ である。小半径 $r/a=0.7$ での粒子エネルギーを 150keV として、 E' が等しい粒子の軌道を調べる。図 2.1.2.2.1-2 で示した二つの TAE について解析を行った。但し、周波数は実験で観測された値に設定し、周波数が低いモードを 55kHz、周波数が高いモードを 68kHz とした。

周波数が低い TAE に関する解析結果を図 2.1.2.2.1-4 に示す。図の中で島状の構造は、TAE によって捕捉される領域に対応する。右図に示されている振幅が $\delta B/B \sim 2 \times 10^{-3}$ の場合に、幅 $\Delta R/a \sim 0.1$ の捕捉領域が形成されていることがわかる。周波数が高い TAE に関する解析結果を図 2.1.2.2.1-5 に示す。左図に示されている振幅が $\delta B/B \sim 10^{-3}$ の場合に、幅 $\Delta R/a \sim 0.1$ の捕捉領域が形成されていることがわかる。以上の結果から、NPA 計測から推定される規格化小半径の 10% の輸送は、 $\delta B/B \sim 10^{-3}$ 程度の振幅の TAE によってもたらされることが明らかになった。

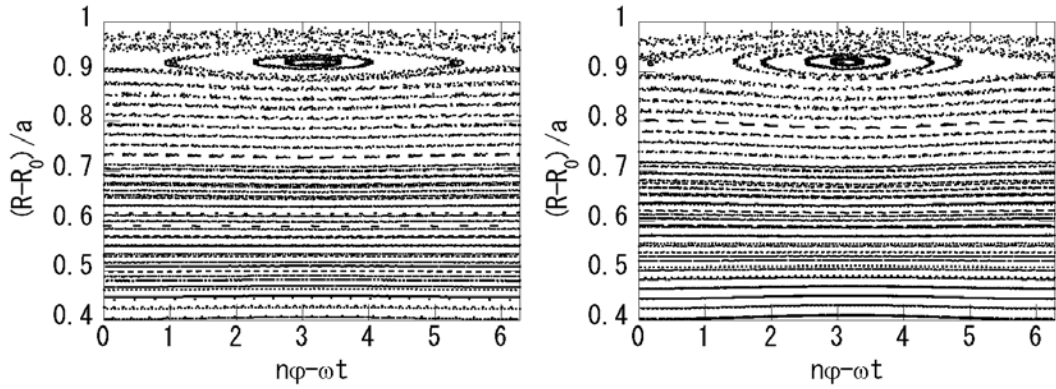


図 2.1.2.2.1-4 周波数が低い TAE と相互作用する高速イオンに関するポアンカレプロット。TAE の振幅はそれぞれ、 $\delta B/B \sim 10^{-3}$ (左) と $\delta B/B \sim 2 \times 10^{-3}$ (右)。

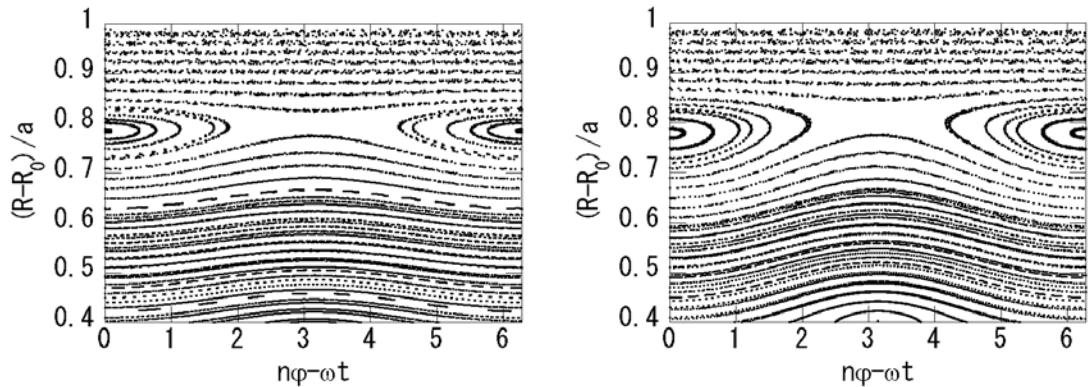


図 2.1.2.2.1-5 周波数が高い TAE と相互作用する高速イオンに関するポアンカレプロット。TAE の振幅はそれぞれ、 $\delta B/B \sim 10^{-3}$ (左) と $\delta B/B \sim 2 \times 10^{-3}$ (右)。

2) MEGA コードのドリフトモデルへの拡張

アルヴェン固有モード挙動予測の精度を向上するために、MEGA コードにドリフトモデルと拡張オーム則を導入した[3]。ドリフトモデルはイオン反磁性ドリフトとイオン有限ラーモア半径効果を含む流体モデルであり、その方程式系は MHD とよく似ている。このモデルを用いて 1 次元運動論的アルヴェン波のシミュレーションを実行し、分散関係がよく再現できることを確認した。その結果を図 2.1.2.2.1-6 に示す。

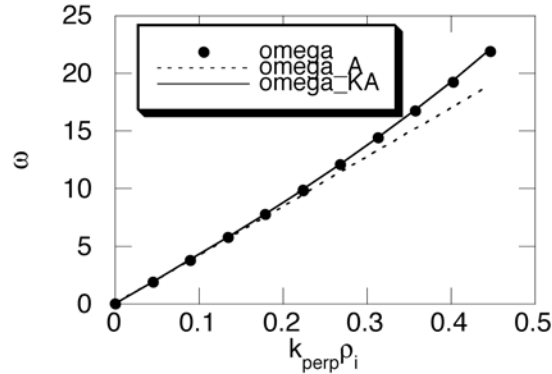


図 2.1.2.2.1-6 ドリフトモデルシミュレーションによる運動論的アルヴェン波の分散関係。横軸はイオンラーモア半径で規格化した磁場に垂直方向の波数であり、平行方向の波数は垂直方向の波数の 3 倍に設定されている。実線が理論値であり、黒丸がシミュレーション結果を示している。点線は有限ラーモア半径効果を見捨てた場合の分散関係を示している。

同時に、以下に示す電子のランダウ流体モデルを用いた拡張オーム則を MEGA コードに導入した。

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{en} \left(\frac{1}{2} \nabla P - \mathbf{j} \times \mathbf{B} \right) = \eta_{LF} \mathbf{j}_{\parallel}$$

$$\eta_{LF} = \frac{m_e}{n_e e^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} v_{te} |k_{\parallel}|$$

$$|k_{\parallel}| = \frac{1}{2qR_0}$$

磁場に平行な波数の大きさ $|k_{\parallel}|$ は TAE ギャップの中心周波数に基づいて評価されている。この拡張オーム則により電子ランダウ減衰による実効的な電気抵抗が取り入れられている。この拡張 MEGA コードを用いて、TFTR の D-T 実験において観測されたトロイダルモード数 $n=4$ の TAE のシミュレーションを実行し減衰率を計測した結果、減衰率は実周波数の 0.5% であった。これは NOVA-K による解析結果の約半分の値である。ランダウ流体モデルの計算においては、磁場に対して平行方向の波数が用いられる。減衰率計算の精度向上のためには、平行方向の波数をより注意深く評価する必要があるものと考えられる。

さらに、拡張 MEGA コードを用いて ITER 弱負磁気シニアにおける α 粒子駆動型不安定性のシミュレーションを実行した。初期条件は、ITER Technical Basis を参考にし、 α 粒子分布は D-T 反応率と減速時間に基づいて計算した。高速 α 粒子圧力分布と安全係数分布を図 2.1.2.2.1-7 に示す。中心部での α 粒子ベータ値は 2% であるのに対して、 α 粒子によって駆動される不安定性を調べるためにバルクプラズマの初期ベータ値は空間的に一定に設定しており、その値は体積平均値 2.77% である。上に述べたようにアルヴェン固有モードの減衰率を過小評価していることを考えると、この計算は α 粒子駆動型不安定性による α 粒子輸送の上限を与える。線形段階では、プラズマ中心付近の低 $n(n=2-5)$ アルヴェン固有モードが不安定性であり、最不安定モードは $n=3$ であった。その電場のトロイダル成分の分布を図 2.1.2.2.1-8 に示す。非線形段階での α 粒子ベータ値減少の最大値は中心値と比較して 5% であった。

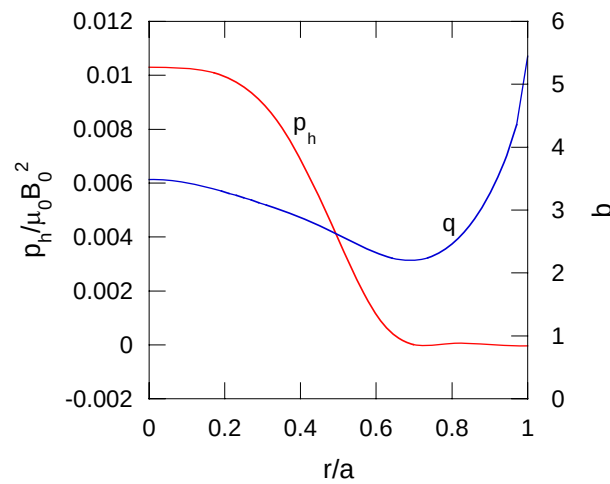


図 2.1.2.2.1-7 シミュレーションの初期条件に設定した α 粒子圧力分布(p_h)と安全係数分布。

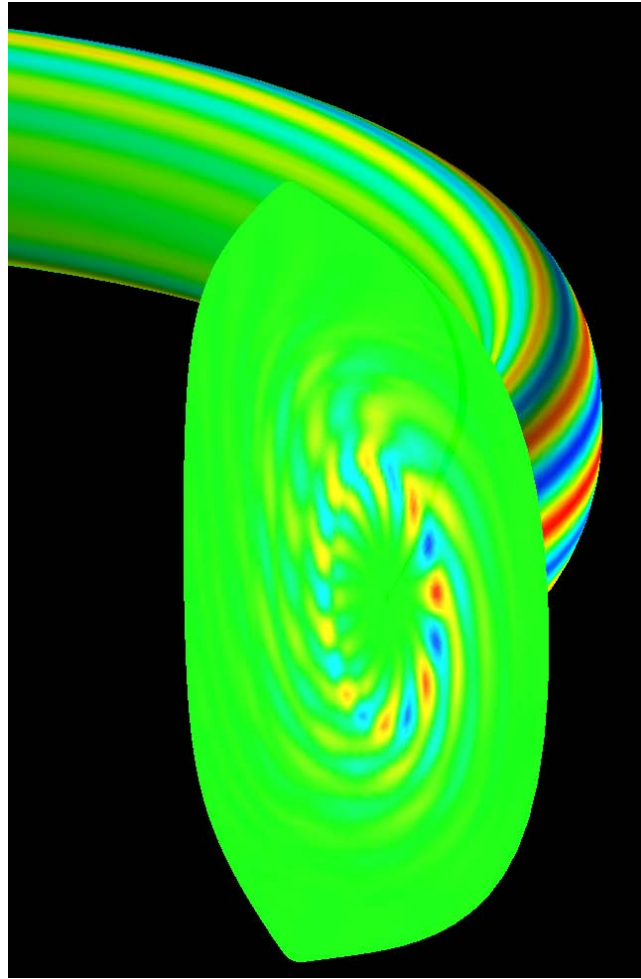


図 2.1.2.2.1-8 トロイダルモード数 $n=3$ の TAE のトロイダル電場分布。

3)高速粒子モード(energetic-particle mode)の線形特性

高速粒子モード(energetic-particle mode, EPM)の線形特性を、MEGA コードを用いて調べた。高速イオン速度分布をビーム型としたことで、EPM の高速イオン速度分布への依存性を明確に調べることができた。ビーム速度がアルヴェン速度よりも低い場合には不安定モードは EPM であるが、ビーム速度がアルヴェン速度を十分に超えると TAE が不安定モードとなる。図 2.1.2.2.1-9 は異なるビーム速度 v_0 に対する不安定モードのピーク位置と周波数をアルヴェン連続スペクトルに重ねて示したものであり、EPM の性質をはっきりと確認することができる。図 2.1.2.2.1-9 で $v_0 = 1.4v_A$ に対応する点はアルヴェン固有モードである。

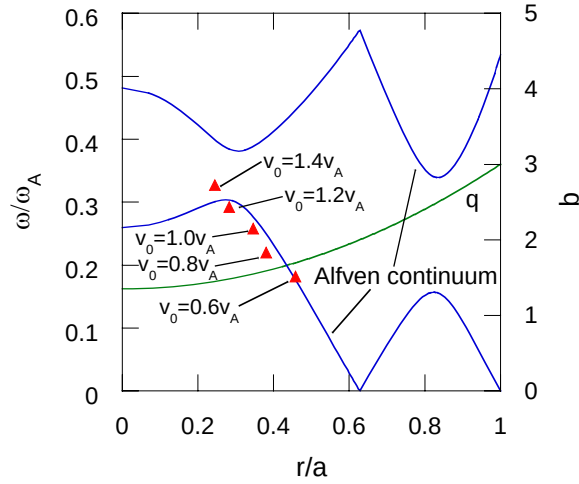


図 2.1.2.2.1-9 異なる速度を持つ高速イオンによって不安定化された振動の周波数とピーク位置が三角形で示されている。同時に安全係数(q)分布とトロイダルモード数 $n=1$ のアルヴェン連続スペクトルが示されている。

さらに、EPM の周波数が高速粒子の軌道周波数によって決定されることもシミュレーションによって確認した。これは理論的に予言されていた性質である。シミュレーション結果の EPM 周波数をビーム速度に対して示したものが図 2.1.2.2.1-10 である。EPM の周波数は、ビームイオン軌道中心の磁気軸からのずれを考慮した軌道周波数 $\omega_E = v_0[n/(1+\sigma) - l/q]/R_0$ とよく一致することがわかる。ここで、 n はトロイダルモード数、 l は EPM の主要ポロイダルモード数 m に対して $l = m, m \pm 1$ のどれかの値をとる整数、 R_0 はプラズマ大半径、 B_0 は磁気軸での磁場強度、 $\sigma R_0 \equiv qv_0m_h / Z_h e B_0$ は有限軌道幅による軌道中心の磁気軸からのずれをそれぞれ表す。

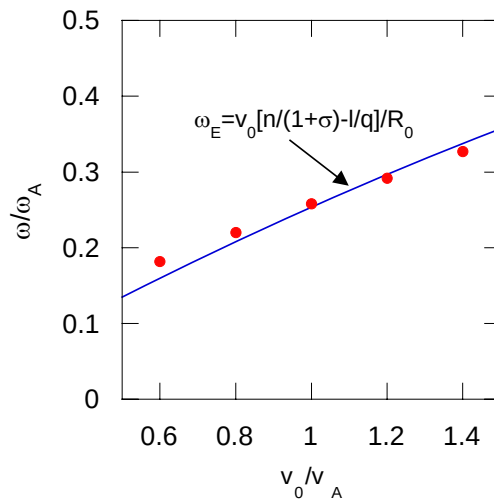


図 2.1.2.2.1-10 高速イオン軌道周波数（実線）と不安定モード周波数（丸印）の比較。高速イオン軌道周波数 $\omega_E = v_0[n/(1+\sigma) - l/q]/R_0$ の計算には、一定の安全係数値 $q=1.4$ が用いられている。ここで、 $n=1$ 、 $l=1$ 、 $\omega_A = v_A/R_0$ 、 $\sigma \equiv qv_0m_h / Z_h e B_0 R_0$ である。

4) 全特性曲線法の考案およびジャイロ運動論的電磁プラズマシミュレーションモデルの構築

プラズマ粒子シミュレーションにおいてしばしば問題となる数値雑音は、マーカー粒子数が実際のプラズマ粒子数と比較すると非常に少ないために発生する現象である。その解決策として δf 法が提案され、磁場閉じ込め核融合プラズマ分野において多くの重要な成果が挙げられている。 δf 法は数値雑音を低減する強力な手法であるが、粒子数・運動量・エネルギーなどの物理量の保存が保証されていないという欠点がある。 δf 法ではマーカー粒子一個一個が、Vlasov 方程式の一本一本の特性曲線に相当している。それぞれの特性曲線は数値精度の範囲で正しく計算されるが、マーカー粒子が存在しない位相空間領域の情報は欠落してしまう。このことが原因となって、物理量が保存されないのである。そこで、マーカー粒子が存在しない領域の特性曲線については、流体法を適用して計算する手法を考案し、全特性曲線法と名付けた。この手法では、全ての特性曲線によるソース項の伝播が近似的に解かれるからである。全特性曲線法を用いて1次元 bump-on-tail 不安定性のシミュレーションを実行し、物理量保存が改善されることを実証した。図 2.1.2.2.1-11 に δf 法と全特性曲線法の結果を比較する。全特性曲線法を用いれば、位相空間内で運動論的効果が重要な部分にのみマーカー粒子を配置する効率の良い連結シミュレーションが可能になる。全特性曲線法は粒子-流体連結シミュレーションを単独で継ぎ目なしに可能にするのである。

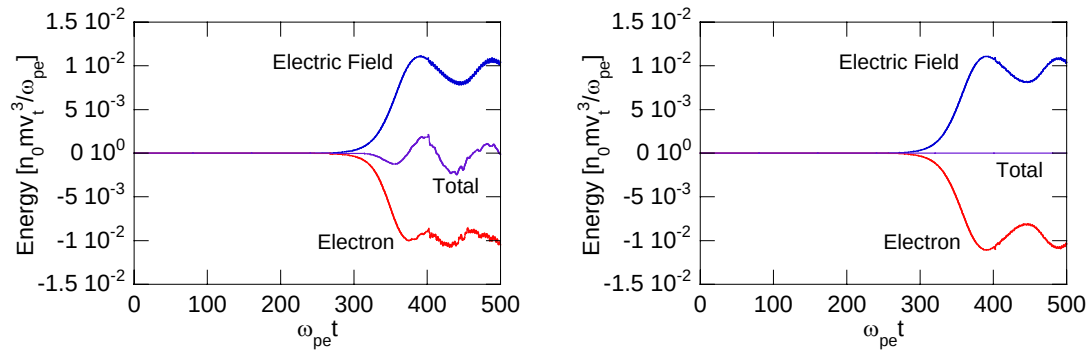


図 2.1.2.2.1-11 1次元 bump-on-tail 不安定性シミュレーション結果におけるエネルギー保存の比較。左は δf 法の結果であり、右は全特性曲線法の結果を示す。全特性曲線法ではエネルギー保存が大幅に改善されている。

全特性曲線法を用いて、電磁プラズマのジャイロ運動論的シミュレーションモデルを構築した。ジャイロ運動論モデルは低周波数の現象に対して役立つ理論的枠組みである。磁場に関して非圧縮の擾乱のみを取り扱うので、磁場に垂直なベクトルポテンシャルは無視する。磁場に平行なベクトルポテンシャルはアンペールの法則から計算され、静電ポテンシャルはジャイロ運動論的ポアソン方程式で与えられる。ジャイロ運動論的ポアソン方程式においては、分極ドリフトによる電荷が考慮されている。磁場に対して平行な電場成分はアンペールの法則の時間微分から計算される。

1次元のシミュレーションモデルを構築して運動論的アルヴェン波のシミュレーションを実行した。図 2.1.2.2.1-12 に示すように、さまざまな電子ベータ値に対して運動論的アルヴェン波の実周波数と減衰率が正しく計算されることを実証した。このとき、 $k_{\perp}\rho_s = 0.4$ ($\rho_s = \sqrt{T_{e0}/m_i/\Omega_i}$), $k_{\parallel}/k_{\perp} = 0.01$ という条件を課したので、電子ベータ値の違いは波長の違いに対応する。

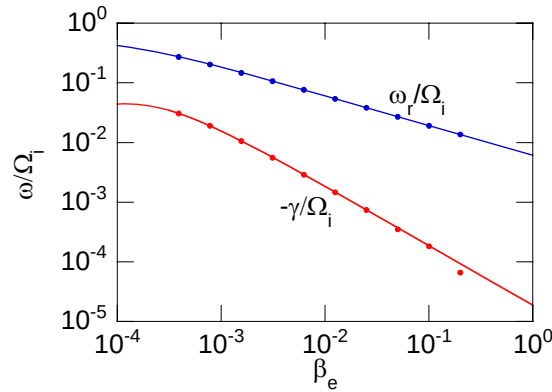


図 2.1.2.2.1-12 電子ベータ値に対する運動論的アルヴェン波の実周波数 ω_r と減衰率 $-\gamma$ 。丸印はシミュレーション結果であり、実線は理論値を示す。

加えて、格子サイズが電子スキン長よりも10倍大きく、従来の δf 法では計算することができない場合でも、全特性曲線法を用いれば運動論的アルヴェン波のシミュレーションが可能であることを示した。その場合の運動論的アルヴェン波の時間発展を図 2.1.2.2.1-13 に示す。ほぼ一定の振幅で振動を続ける解析解に対して、従来の δf 法の結果では運動論的アルヴェン波が急速に減衰する(左図)。右図に示す全特性曲線法によるシミュレーション結果は、解析解とよく一致していることが確認できる。

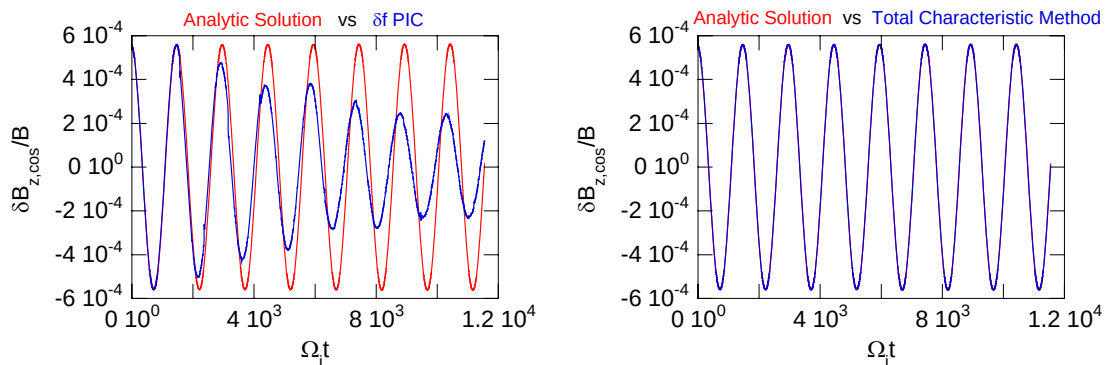


図 2.1.2.2.1-13 運動論的アルヴェン波時間発展に関するシミュレーション結果と解析解の比較。左図は δf 法による結果であり、右図は全特性曲線法による結果を示している。

参考文献

[1] D. A. Spong and Y. Todo;

- “Shear Alfvén spectrum and mode structures for 3D configurations”,
49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (12-16 November 2007, Orlando), PP8.00098.
- [2] Y. Todo, N. Nakajima, M. Osakabe, S. Yamamoto, and D. A. Spong;
“Simulation study of energetic ion transport due to Alfvén eigenmodes in an LHD plasma”,
Joint Conference of 17th International Toki Conference on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and
16th International Stellarator/Heliotron Workshop 2007 (15-19 October 2007, Toki), P2-062.
- [3] Y. Todo;
“Simulations of Alfvén eigenmodes with an extended Ohm's law”,
Journal of Plasma Physics, Vol. 72, No. 6 (2006) pp. 817-820.
- [4] Y. Todo,
“Properties of energetic-particle continuum modes destabilized by energetic ions with beam-like velocity
distributions”,
Physics of Plasmas, Vol. 13, No. 8 (2006) pp. 082503(1-7).
- [5] Y. Todo,
“A Complementary Fluid Method in delta-f Particle Simulation”,
Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 81, No. 11 (2005) pp. 944-948.
- [6] Y. Todo and A. Ito,
“Construction of a Gyrokinetic Plasma Simulation Model for Electromagnetic Phenomena”,
Plasma and Fusion Research, Vol. 2 (2007) pp. 020(1-5).

2.1.2.2.2. 二流体モデルに基づく多階層シミュレーション（石澤）

トーラス磁場閉じ込め装置のプラズマ実験に対する数値シミュレーションによる実験提案および実験結果の理解は、プラズマ性能の向上と計測技術の向上とともに今後ますます重要になると考える。実験プラズマの性能向上等から、個別の時空間スケールに焦点を当てた単階層モデルでは、プラズマの全体像を捉えきれなくなり、多階層時空間スケールに広がったシミュレーションが必要である。現在のスーパーコンピュータの能力は、二流体非線形シミュレーションを用いることによって、この多階層シミュレーションを可能にする。

核融合プラズマ実験において、巨視的な磁気流体不安定性はプラズマの巨視的な変形を伴いプラズマ閉じ込めを劣化させる。また、微視的不安定性による乱流（微視的乱流）は異常輸送を引き起こし、プラズマ閉じ込めを劣化させる。従来は、巨視的な磁気流体不安定性と微視的乱流のそれぞれのプラズマ閉じ込めへの影響は、空間スケールが分離されているために、独立に研究されてきた。しかし、現実のトーラス磁場閉じ込めプラズマ実験では、図 2.1.2.2.2-1, 2 に示されるように巨視的な磁気流体不安定性、微視的乱流および輸送障壁形成に関連したゾーナル流は共存する。そして、これらの現象の階層間相互作用の結果として、プラズマ閉じ込めが劣化する過程は、ほとんど理解されていない。巨視的磁気流体不安定性と微視的乱流およびゾーナル流が共存し非線形相互作用することによりプラズマ閉じ込めが劣化する過程を多階層シミュレーションによって明らかにする目的で研究を行う。

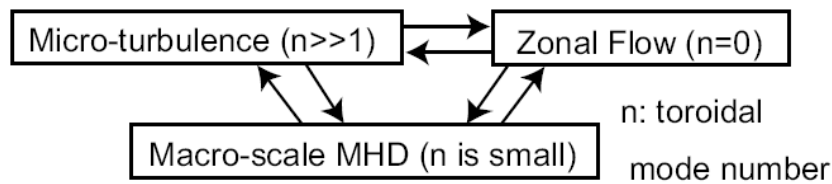


図 2.1.2.2.2-1 トーラス磁場閉じ込めプラズマにおける多階層相互作用

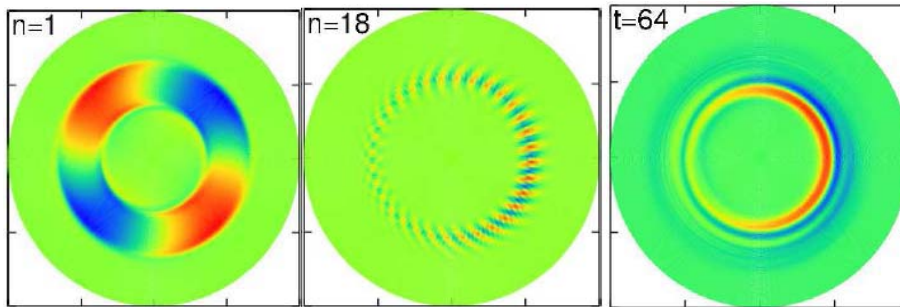


図 2.1.2.2.2-2 静電ポテンシャルのポロイダル断面分布： トロイダルモード数1の巨視的磁気流体不安定性（左）、トロイダルモード数18の微視的不安定性（中央）、トロイダルモード数0のゾーナル流（右）

平成16年度

磁場閉じ込めプラズマにおいて、巨視的磁気流体不安定性や微視的不安定性は磁力線の巻き数が有理数になる面に共鳴して発生する。粒子シミュレーションを行うことによりこの共鳴面において重要な役割を果たす運動論効果を明らかにした。特に共鳴面付近のイオンのジャイロ応力の重要性を示し、運動論効果が有効になる領域はイオンのラーマー半径によって決まることを明らかにした[1][2]（図 2.1.2.2.2-3）。このことは、運動論効果が磁気流体近似を破る領域がイオンのスキン長またはラーマー半径のどちら長さで特徴付けられるかという論争に終止符を打った。そして、磁場閉じ込めプラズマの多階層相互作用シミュレーションを流体シミュレーションによって行う場合、このイオンジャイロ応力を取り入れる必要があることを示した。

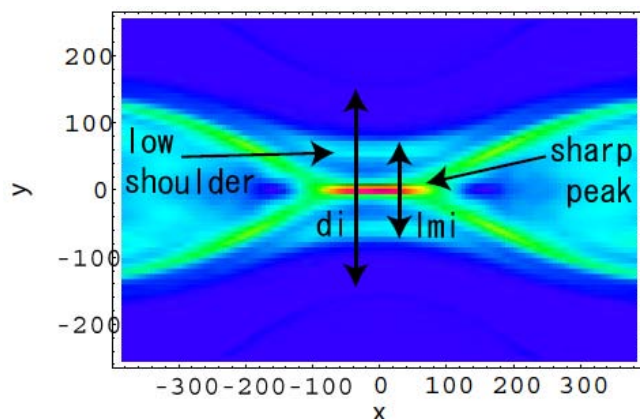


図 2.1.2.2.2-3 モード共鳴面付近の電流密度分布（ x ：ポロイダル方向、 y ：動径方向）：ジャイロ応力の働きにより、 y 方向の電流分布はイオンのスキン長 d_i ではなく局所的なラーマー半径 l_{mi} によって特徴付けられる。

平成17年度

上述の結果に従ってイオンのジャイロ応力を取り入れ、閉じ込め装置サイズからイオン運動論効果および電子の無衝突効果まで含んだ多階層時空間スケールを扱い得る二流体モデル及びジャイロ流体モデルに基づいたシミュレーションコードを新たに開発した[3]。ベンチマークテストの結果、図 2.1.2.2.2-4 に示すような巨視的磁気流体不安定性および微視的不安定性を再現した。このシミュレーションコードの構築によって多階層空間スケールに広がる数値シミュレーションが可能になった。

平成18年度

巨視的磁気流体不安定性、乱流によって生ずる微視的揺動及びゾーナル流の多階層非線形相互作用によりプラズマ閉じ込めが劣化する機構を明らかにするために、新たに開発したシミュレーションコードを用いて数値シミュレーションを行った。特に、磁気面を破壊する巨視的磁気流体不安定性の発生に着目し、巨視的磁気流体不安定性および微視的不安定性がともに線形不安定な平衡からシミュレーションを始めた。その結果、微視的乱流とそれに伴って生ずるゾーナル流が釣り合って形成される準平衡状態が得られた。その後、多階層相互作用によりこの平衡の中に、微視的乱流の揺動から巨視的磁気流体不安定性が発生する過程をはじめて示した[3]。この乱流とゾーナル流が釣り合った準平衡状態の中から乱流の揺動が巨視的磁気流体として成長する過程を示したシミュレーションは、従来の線形不安定性の成長から始まる磁気流体シミュレーションと本質的に異なる新しいシミュレーションである。そして、この研究は、実験で観測される巨視的磁気流体不安定性の描写に対してより現実的な新しい種類のシミュレーション研究である[4]。この結果は、第21回 IAEA 国際会議の理論総括論文 (S. I. Krasheninnikov, Nuclear Fusion, Vol. 47, (2007) S529-S542) に、シミュレーション結果の図が紹介される評価を得ている。

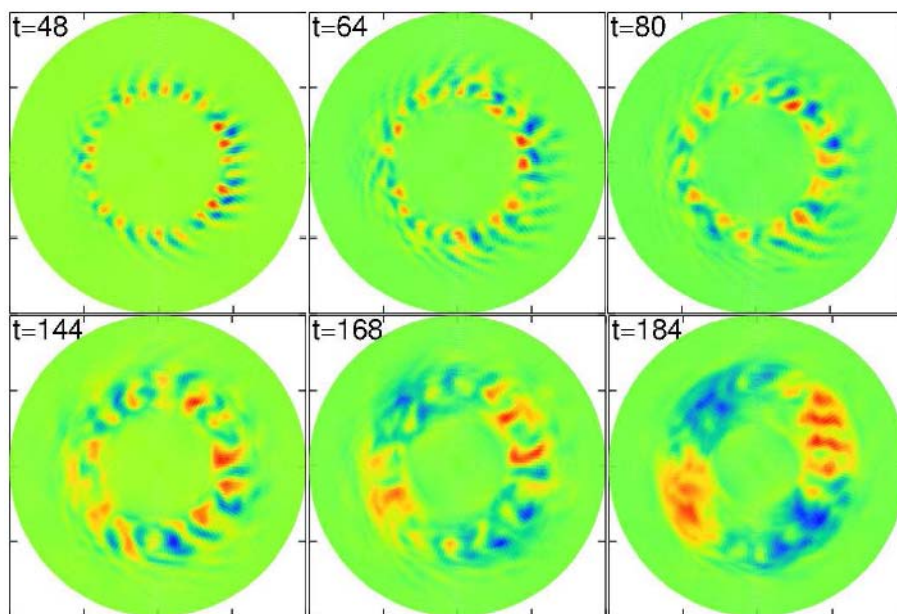


図 2.1.2.2.2-4 静電ポテンシャルのポロイダル断面分布の時間発展：ゾーナル流は微視的乱流を抑制し、 $t=64, 80$ において準定常状態が実現する。この状態は、乱流とゾーナル流を含んだ準平衡状態とみなせる。この平衡状態において巨視的磁気流体不安定性が乱流揺動を種として

成長をはじめの様子がポロイダルモード数2の巨視的な構造の出現として $t=168$, 184 に現れる。

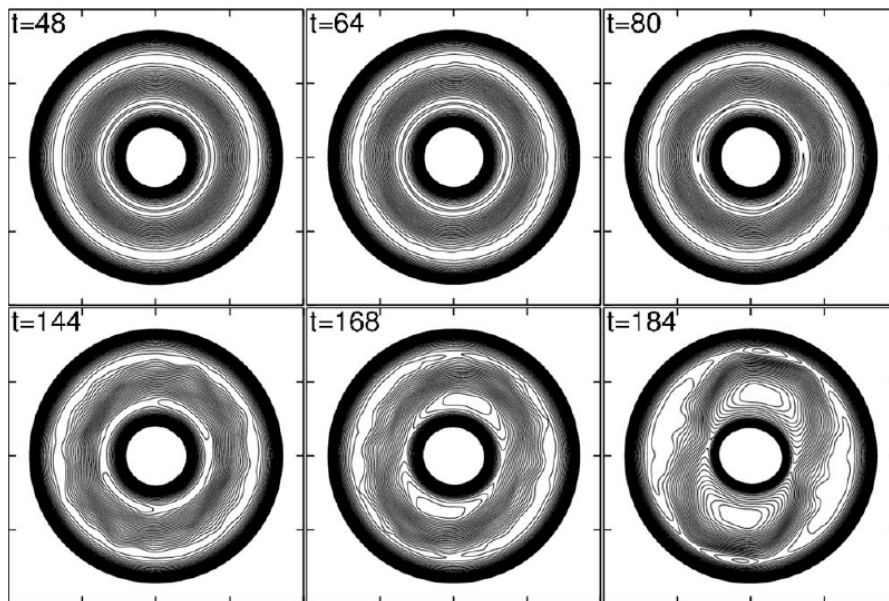


図 2.1.2.2.2-5 ヘリカル磁気ポテンシャルの時間発展: ゾーナル流が微視的乱流を抑制し、準定常状態が実現した $t=64$, 80 においては、磁気島は現れない。巨視的磁気流体不安定性の成長に伴いポロイダルモード数2の巨視的な磁気島が $t=168$, 184 に現れる。磁気島の0点およびX点は図 2.1.2.2.2-4の赤色領域と青色領域の境界で表されるコヒーレント渦の境に現れる。

平成19年度

上述の多階層シミュレーション結果を用いて、微視的乱流の揺動からゾーナル流及び巨視的磁気流体不安定性が発生する過程において、多階層相互作用を現す三つの効果、レイノルズ応力(ポテンシャル揺動に起因する)、非線形イオン反磁性(ジャイロ応力に起因する)、マクセル応力(磁場揺動に起因する)、が果たす役割を調べた[5]。その結果、レイノルズ応力はゾーナル流を生成し、非線形イオン反磁性およびマクセル応力がその生成を抑制する働きがあることを示した。特に上述の粒子シミュレーションによる運動論的効果の評価[2]に基づいて導入した非線形イオン反磁性(ジャイロ応力)の重要性を示した。巨視的磁気流体不安定性発生過程にはゾーナル流生成過程同様にこれらの応力が働くことを示した一方、さらに複雑な過程が含まれることが明らかになった[5]。

平成20年度

開放系としてトーラス型磁場閉じ込めプラズマをとらえ、この性質をシミュレーションに取り込むことを目的として、温度などの外部入力および出力効果を導入する。そして、微視的乱流、巨視的磁気流体不安定性及びゾーナル流の多階層相互作用が、外部からの熱入力に対して応答し、乱流輸送が変化しながら新たな平衡に推移する機構を明らかにする。この研究は階層統合型シミュレーションの乱流輸送モデル精密化に貢献することが期待できる。

参考文献

- [1] A. Ishizawa, R. Horiuchi, and H. Ohtani: *Two-scale structure of the current layer controlled by meandering motion during steady-state collisionless driven reconnection*, Physics of Plasmas, Vol. 11, (2004), pp. 3579-3585. 共同研究者 堀内利得、大谷寛明、引用回数 3
- [2] A. Ishizawa and R. Horiuchi: *Suppression of Hall term effects by gyroviscous cancellation in steady collisionless magnetic reconnection*, Physical Review Letters, Vol. 95, (2005), 045003. 共同研究者 堀内利得、引用回数 6
- [3] A. Ishizawa, N. Nakajima, M. Okamoto, J. J. Ramos: *Multi-Scale-Nonlinear Interactions among Micro-Turbulence, Magnetic Islands, and Zonal Flows*, 21st IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu, China, TH/P2-21, (2006). 共同研究者 中島徳嘉、J. J. Ramos、岡本正雄、引用回数 1
- [4] A. Ishizawa and N. Nakajima: *Excitation of Macro-Magnetohydrodynamic Mode due to Multi-Scale Interaction in a Quasi-Steady Equilibrium Formed by a Balance between Micro-Turbulence and Zonal Flow*, Physics of Plasmas, Vol. 14, (2007) 040702. 共同研究者 中島徳嘉、引用回数 1
- [5] A. Ishizawa and N. Nakajima: *Multi-scale-nonlinear interactions among micro-turbulence, double tearing instability, and zonal flows*, Nuclear Fusion, Vol. 47, (2007) 1540. 共同研究者 中島徳嘉、引用回数 0

2.1.2.2.3. ペレット（石崎）

固相、液相、気相、プラズマが同時に存在する多相効果を取り入れた計算コードを開発しペレットの溶発過程を評価した結果、ペレットの形状が変化することによりライフタイムが減少することを初めて示した[1-3]。また、溶発により生じたプラズモイドの運動をトカマク、および直線ヘリカルにおいて評価し、タイヤチューブ力等によって低磁場方向にドリフトすることを示した[4,5]。低磁場方向へのドリフトは従来から指摘されていたが、タイヤチューブ力によることを示したのは初めてである。

1. はじめに

燃料補給のためペレットをトラスプラズマに入射すると、溶発により低温高密度のプラズモイドが形成される。このプラズモイドは急速に磁力線方向に膨張すると同時に、低磁場方向にドリフトすることがトカマク実験で確かめられている。従って、トカマクではその特徴を利用してトラス内側の高磁場側からペレットを入射することによって、プラズモイドをコアに近づけ、密度を制御することに成功している。一方で、LHD では入射位置を変えても、プラズモイドは周辺に排出されてしまい、コアに近づけることに成功していない。このトカマクとの相違点を明らかにし、効率的なペレット入射法を提言することは、超高密度プラズマを目指す上で重要である。そこで、以下の二つのテーマにおいて研究を行った。

2. 高温プラズマ中におけるペレット溶発

従来の溶発モデルを構築する際には、等方加熱を仮定した単一流体を用いており、磁力線に沿った非等方加熱、固体が液相、気相を経てプラズマ化する多相効果、解離、電離を伴う原子過程、および分子、原子、イオン、電子から成る多流体の効果は含まれていない。これらは背景プラズマと相互作用し、プラズモイドの運動に影響を与える。そこで、多次元多相流体コードを開

発し、これらの物理を含めた評価を行った。但し、磁場は加熱方向にのみ寄与し、 $J \times B$ 力は考慮していない（次節において考慮する）。固体とプラズマは密度が7桁も異なり、また固体は非圧縮性、プラズマは圧縮性流体であるため、数値計算を行う際には固体とプラズマを分離する等、注意を要する。このような問題を包括的に解くために CIP 法（Cubic interpolated pseudo-particle method）を用いた。これは、物理量が大きく変動する場合に数値発散しにくく、また非圧縮性、圧縮性流体を特別な境界条件を用いることなく同時に解くことができる計算スキームである。ここでは2次元軸対称円柱座標(r, z)を用いて、原点に静止した球状ペレットに $\pm z$ 方向（磁力線方向）から背景プラズマ（電子温度2 keV、電子密度 10^{20} m^{-3} ）による熱流がある場合のペレット溶発について計算した。図 2.1.2.2.3-1 はペレット（赤）近傍の r - z 面における密度分布と第一音速面、衝撃波面、第二音速面の時間発展を示す。一般に、ペレット材料である固体水素は、0.5 MPa 以上に加圧されると非圧縮流体として振舞うことが知られている。従って、温度が数 keV のプラズマ中では、ペレット表面の溶発圧力は数～数十 MPa に達するため、流体的な変形が可能になる。プラズマ中の電子は殆ど磁力線に沿ってペレットを加熱するため、ペレット表面の溶発圧力は、磁力線に垂直なペレット表面（北極点、及び南極点、 $r=0$ ）で最大となり、磁力線に平行なペレット表面（赤道上、 $z=0$ ）で最小となり、円盤状に変形する。両極点における溶発が最も顕著であるため、トーラス状に変形し、消滅する。また、電離が支配的な領域では衝撃波が形成されることも明らかになった。図 2.1.2.2.3-2 にマッハ数、圧力、温度、解離度、電離度の(a) z 方向、及び(b) r 方向の分布を示す。電離領域では電離に伴い流体のエネルギーが急激に失われるため、溶発により膨張している流体にブレーキが働く。これがピストンの役割するため、衝撃波が形成される。一方で、解離領域においても運動エネルギー損失のためブレーキが働くが衝撃波は形成されない。解離領域においても溶発初期の非常に短い時間においては、一時的に衝撃波が形成されるが、基本的に解離領域は亜音速領域にあるため、音波がそのような構造を平坦化してしまう。一方、電離領域は超音速領域にあるため、音波による平坦化は起こらず衝撃波が維持される。このような状況における溶発率の時間発展を図 2.1.2.2.3-3 に示す。ペレットは溶発圧力の不均一により変形するため、電子に対する受面積は増大し、単位時間当たりの溶発率は高くなる。その後、ペレットの縮小に伴い、溶発率はゼロに近づく。結果として、形状変化を考慮していない1次元溶発モデルに比べると、ペレットのライフタイムは短くなることが明らかになった[1-3]。

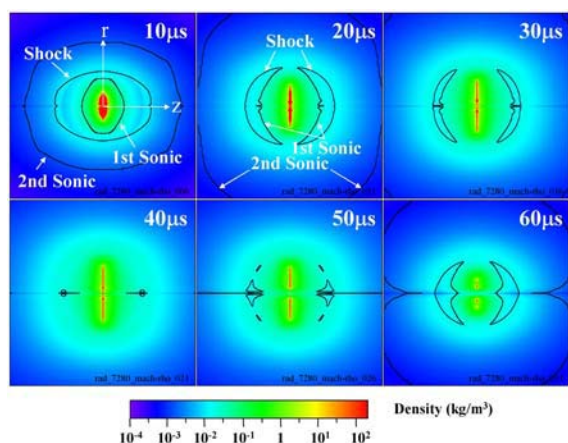


図 2.1.2.2.3-1 2次元軸対称円柱座標系の r - z 面における密度分布と第一音速面、衝撃波面、第二音速面。

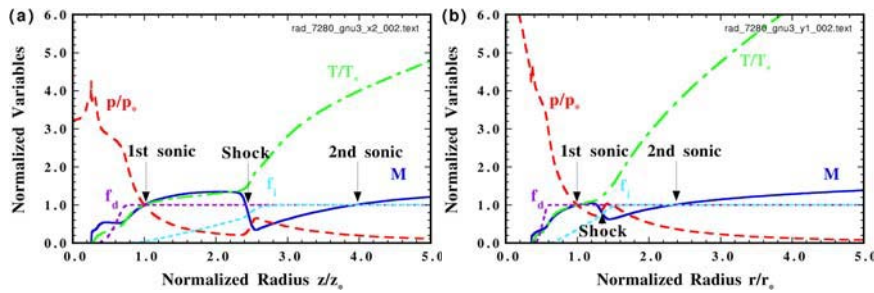


図 2.1.2.2.3-2 $t = 2\mu\text{s}$ におけるマッハ数 M 、圧力 p 、温度 T 、解離度 f_d 、電離度 f_i の(a) z 方向、及び(b) r 方向の分布。

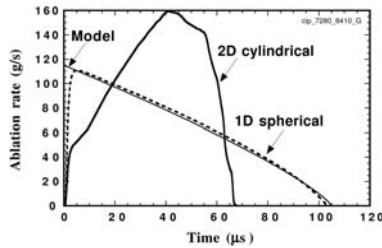


図 2.1.2.2.3-3 溶発率の時間発展。実線は 2 次元軸対称シミュレーションの結果、破線は 1 次元球対称シミュレーションの結果を示す。細い実線は、理論モデルの結果を示す。

3. トーラスプラズマにおけるプラズモイドの運動

ペレット溶発により生じた低温高密度のプラズモイドの、トーラスプラズマ中における運動を評価するために、前節で用いた背景プラズマからの加熱モデルを MHD 方程式に導入し溶発過程を直接取り扱えるコードを開発した。ただし、前節で評価した固体がプラズモイドになる過程は含まれておらず、低温高密度のプラズモイドが更に加熱を受けて運動する様子を評価した。数値スキームとしては CIP 法、計算格子としてはトカマクの場合は円柱座標、ヘリカルプラズマの場合は回転ヘリカル座標を用いている。

背景プラズマの 1000 倍の密度をもつプラズモイドが加熱を受け溶発すると、その溶発圧力は背景プラズマの 100 倍以上にも達するため、プラズモイドは磁力線方向に急速に膨張する。その結果、トーラスの内側と外側の径の差により力は外側に働く。これがタイヤチューブ力である。トロイダル磁場は、ほぼ $1/R$ の依存性をもっているため、磁気圧による同様な力（磁場の $1/R$ 力）も働く。この考え方は、 ∇B ドリフトによる電荷分離によりプラズモイド中に電場が生じ、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが誘発されるという従来の考え方とは異なる。一般にプラズモイドは磁気面上にあるため、電荷分離が生じていても高温の電子が磁力線に沿って 10^7 m/s の速度で打ち消そうとする。従って、電荷分離の大部分は打ち消されていると考える方が妥当である。一方でタイヤチューブ力、および $1/R$ 力は磁場に湾曲があると必ず生じる。図 2.1.2.2.3-4 はトカマクにおけるプラズモイドの運動を示しており、低磁場方向にドリフトしていることが分かる。このことをもう少し定量的に評価するために、磁場は $1/R$ で減少する真空トロイダル磁場のみを考え、背景プラズマの圧力は一様であるとする。また、プラズモイドは圧力擾乱 Δp 、磁場擾乱 ΔB^2 をもち、トーラス方向に一様、つまりリング状であるとする。このようなプラズモイドに働く加速度を評価すると、 Δp に比例する項（タイヤチューブ力）と ΔB^2 に比例する項（ $1/R$ 力）の和になる。図 2.1.2.2.3-5 は求められた理論式といくつかのシミュレーション結果を示しており、両者が非常によく一致していることが分かる。しかし擾乱が小さい場合だけはドリフトは起こらず振動していることが分

かる。ここでの背景プラズマは安定平衡であるため、小擾乱は振動することは線形理論から明らかである。一方、溶発によって生じるプラズモイドは大擾乱であるため力のバランスは崩れ、もはや安定平衡ではない。従って、線形理論は適用できなくなり、異なる結果が生じる[4]。

次に、直線ヘリカルにおけるプラズモイドの運動を評価した。図 2.1.2.2.3-6 に示すようにプラズモイドを磁気軸に対して低磁場側、および高磁場側に配置した場合の、磁気面を通過する質量流速を図 2.1.2.2.3-7 に示した。いずれの場合もプラズモイドの初期位置は図 2.1.2.2.3-7 の原点である。これは回転ヘリカル座標であるため、この磁気面図においては、背景プラズマの磁気圧はトロイダル方向に一様である。磁力線方向に急速に膨張すると同時に低磁場方向 ((a)は磁気軸と反対方向、(b)は磁気軸方向) にドリフトしていることが分かる。これはトカマクと同様の結果である[5]。今後は LHD における評価を行い、プラズモイドの初期位置による依存性について明らかにする。また前節で評価した多相効果等を含む総合的なシミュレーションを行うことにより、最適なペレット入射法を提言する予定である。

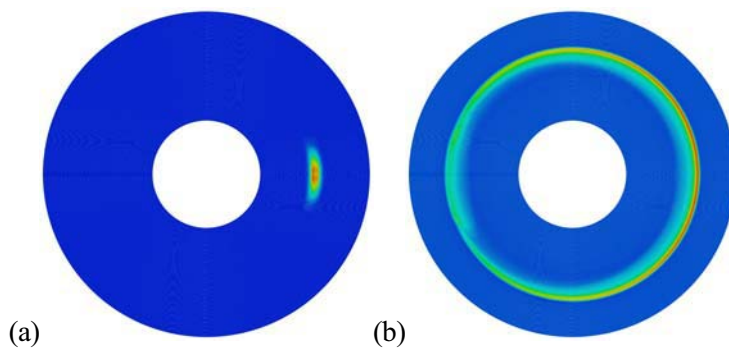


図 2.1.2.2.3-4 トカマクの赤道面におけるプラズモイドの密度分布。(a) $t = 1.0\tau_A$ (b) $t = 6.0\tau_A$

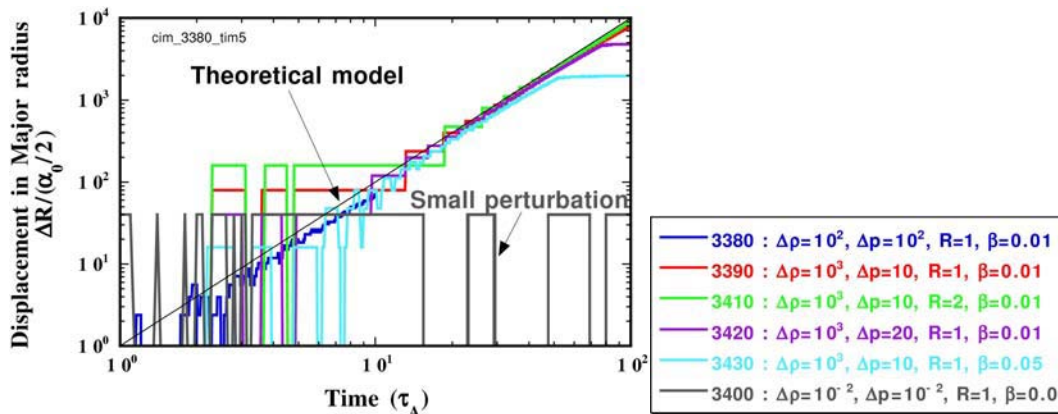


図 2.1.2.2.3-5 プラズモイドとして初期擾乱を与えたときの大半径方向の変位の時間発展。 $\Delta\rho$ は密度擾乱、 Δp は圧力擾乱、 R は初期位置、 β は背景プラズマのプラズマベータを示す。

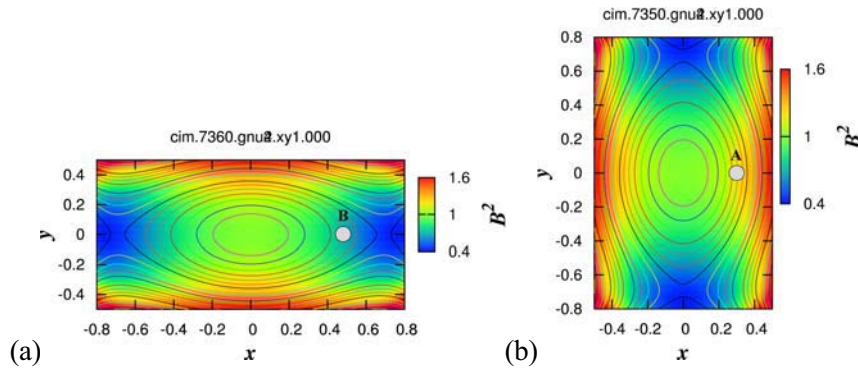


図 2.1.2.2.3- 6 直線ヘリカルのパロイダル面上におけるプラズモイドの初期位置。磁気軸に比べ(a)低磁場側、(b)高磁場側に位置している。カラーバーは磁気圧、等高線は磁気面を示す。

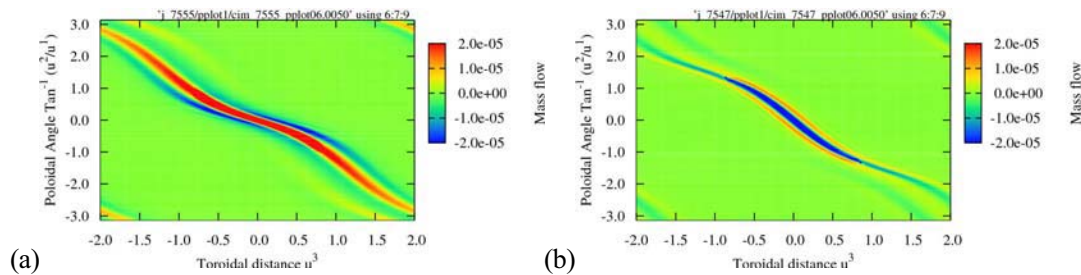


図 2.1.2.2.3- 7 $t = 5.0\tau_A$ におけるプラズモイドの位置している磁気面上における質量流速。正負の符号は磁気軸と反対方向、磁気軸方向を示す。

参考文献

- [1] R.Ishizaki, P.B.Parks, N.Nakajima, M.Okamoto:
“Two-dimensional simulation of pellet ablation with atomic processes”,
Physics of Plasmas, Vol.11 (2004) pp.4064-4080.
- [2] R.Ishizaki, N.Nakajima, P.B.Parks:
“Analysis of Pellet Ablation with Atomic Processes”,
Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 6 (2004) pp.353-356.
- [3] P.B.Parks, L.R.Baylor, R.Ishizaki, S.C.Jardin, R.Samtaney:
“Recent advances in the theory and simulation of pellet ablation and fast fuel relocation in tokamaks”,
IAEA-CN-116/TH/P3-9 (2004).
- [4] R.Ishizaki, N.Nakajima, M.Okamoto, P.B.Parks:
“Motion of the ablation cloud in torus plasmas”,
Journal of Plasma Physics, Vol.72 (2006) pp.1159-1162.
- [5] R.Ishizaki, N.Nakajima, M.Okamoto:
“MHD simulation on ablation cloud in tokamak and heliotron”,
IAEA-CN-149/TH/P3-6 (2006).

2.1.2.2.4. 流れをもつMHD・Hall-MHD・二流体平衡（伊藤）

(1) はじめに

流れをもつプラズマの平衡状態は、静止した状態とは異なる性質を示す。特に、非一様性をもつ方向に流れが存在するときには、平衡状態においてもドップラー効果によって波の周波数が生じるため、プラズマの波の性質が重要となる。それは、中性流体が **Laval** ノズルを通過するときの前後の状態が音速を境界として遷移することと同様である (図 2.1.2.2.4-1)。例えばトカマクプラズマのポロイダル断面では、ポロイダル流が磁気面に沿って流れ、その流路の断面積がトーラスの内側で外側に比べ小さくなっていることから、**Laval** ノズルに似た構造をしており (図 2.1.2.2.4-2)、非一様なポロイダル方向への強い流れの特異性が輸送障壁やペデスタルなどの急峻な構造をもつ定常状態を引き起こすと考えられている。

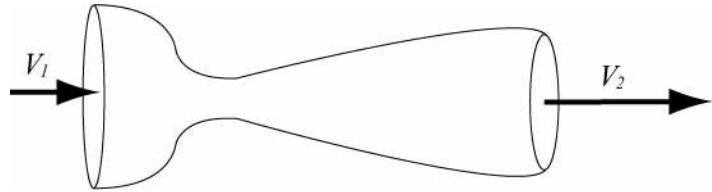


図 2.1.2.2.4-1 非一様な定常流の例 (**Laval** ノズル)

しかし中性流体とは異なり、プラズマの磁気流体 (**MHD**) モデルにおいては、シアアルヴェン波・速い磁気音波・遅い磁気音波の 3 種類の波が存在し、またそれらには非圧縮性または分散性があり中性流体における音波とは異なった振る舞いを示すため、流れをもつ平衡状態は複雑な性質をもつ。トカマクなどの軸対称トロイダル平衡を考えたとき、平衡状態を表す偏微分方程式は静止平衡を表す **Grad-Shafranov** (**GS**) 方程式に流れの効果が加わった一

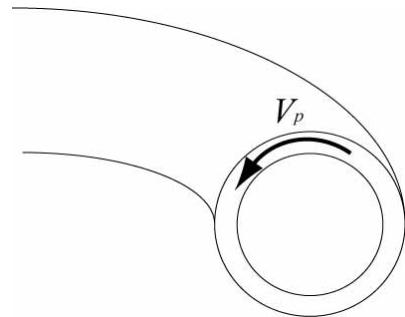


図 2.1.2.2.4-2 トーラスプラズマのポロイダル断面

般化された **GS** 方程式で表されるが、ポロイダル方向の流速とこれらの波の伝播する速度との大小関係によって、**GS** 方程式と同じポテンシャル型(楕円型)、または波動型(双曲型)、そして特異点の 3 つの性質をもつ。しかし、このような流れをもつ平衡状態の性質はプラズマが **MHD** モデルに従うことを前提としたものであり、磁場閉じ込め核融合におけるような高温・高ベータで無衝突のプラズマではこの前提が成り立たないことがある。プラズマ中の波は、短波長になるほど顕著となる小スケールの効果や速度分布のマクスウェル分布からのずれあるいは波-粒子相互作用といった運動論効果などによって、**MHD** の波の分散関係とは異なった振る舞いを示す。従って、平衡流と波の伝播との関係を正確に表すためには、**MHD** を拡張してこれらの効果を含むモデルを構築し、解析を行う必要がある。そのためには、考えているオーダリングの下で摂動展開された運動論的 (**Vlasov**) 方程式のモーメントをとり、必要とする微視的效果を取り込むことのできる完結モデルを用いて得られる拡張流体方程式系から平衡方程式を求めなければならない。本研究では、流れのある平衡状態を用いて **MHD** の拡張に取り組んでおり、得られた平衡状態は拡張 **MHD** モデルを用いたマルチスケール非線形シミュレーションの初期条件や、実験でみられる急峻な構造を持つ定常状態との比較などへの応用が期待できる。これまでに得られた成果の概要と、今後の計画を以下に示す。

(2) 非等方圧力をもつ一流体および **Hall MHD** 平衡

拡張磁気流体モデルを用いた平衡状態の解析の第一段階として、非等方圧力をもつ一流体および **Hall MHD** モデルにおける流れをもつ軸対称トロイダル平衡を表す偏微分方程式の楕円性につ

いて考察した[1]。この圧力非等方性はプラズマが磁力線に巻きついて運動することによって保たれている熱的に非平衡な状態であり、磁場に平行な方向と垂直な方向との粒子の運動の相違が対角的な圧力テンソルで表される。この解析では、イオンの圧力は無視し非等方な電子の圧力を仮定する。これは、Vlasov 方程式のモーメントから Hall MHD 方程式を導出する際に、イオンの圧力が有限である場合には、ジャイロ粘性などのイオンラーマー半径効果は無視することができないためであり、ここでは流体モーメント方程式の完結の問題が生ずる最も簡単な問題として、非等方な電子圧力のみが存在する場合を考える。流体方程式は三次のモーメントまでを考え、連続の式、運動方程式、圧力方程式、熱流束方程式を用いる。そして、熱流束方程式に現れる四次のモーメントを、速度分布を磁場に平行方向と垂直方向で2温度のマクスウェル分布を仮定して圧力の積で表し、流体方程式を完結させる。非等方圧力を表す方程式としてよく用いられる Chew-Goldberger-Low (CGL) 二重断熱方程式は、圧力方程式中の三次のモーメントである熱流束を無視することで完結しているが、これを用いると波の分散関係が運動論から求めたものと一致せず、とくに圧力非等方性によって生ずる不安定性であるファイアーホース不安定性・ミラー不安定性のうち、後者の安定性条件が正しく得られないという問題がある。本研究で用いたモデルでは、熱流束方程式において電子の質量を無視することで圧力方程式が得られる。熱流束は逆に圧力方程式から得られる。この方程式系が波の振る舞いを運動論と矛盾なく表せることを示すため分散関係式をまず求めたところ、等方圧力の場合と同様に運動論の Hall MHD の極限と一致し、正しいミラー安定性条件が得られた。

この圧力方程式を用いた流れをもつ平衡の解析として、まず一流体モデルを考えた。このとき、電子の圧力がプラズマ全体の圧力となる。一流体平衡は、GS 方程式に流れと圧力非等方性の補正が加わった2階偏微分方程式で表される。非等方圧力が存在するとき、静止平衡に対しても偏微分方程式の楕円性条件が存在する。その条件は、ファイアーホース及びミラー安定性条件を同時に満たすことであり、これが CGL モデルを用いた場合とは異なり、運動論による安定性条件と等価になっていることがわかった。流れのある平衡に対しては、楕円性条件を満たすポロイダル流速の境界値となっている非等方性が加わったシアアルヴェン波、速い磁気音波、遅い磁気音波の位相速度が、CGL モデルを用いた先行研究の結果とは異なり、運動論による波の分散関係から得られるものに対応していることが明らかになった。

次に、Hall MHD における非等方圧力をもつときの流れをもつ平衡を表す方程式を、磁束関数とイオンの流れ関数のそれぞれに対する GS 型の偏微分方程式の連立の形で表し (MIT: Jesus J. Ramos 博士)、それに対する楕円性について解析を行った。等方圧力の場合には、磁束関数の方程式は常に楕円型であり、流れ関数の2階偏微分方程式についての楕円性条件を求めればよく、ポロイダル速度が音速以下であれば楕円型であるという条件が容易に得られる。しかし非等方圧力の場合には、2つの関数の2階微分の項を別々の方程式に分離できないため、4階の偏微分方程式として考えなければならない。高階の偏微分方程式に対しては、最高階微分の項だけが不連続になるような波面をもつ波を考え、そのような波が伝わる速度が実数値を持たなければ方程式はポテンシャル型であるということで楕円性が判定できる。この方法を用いて解析したところ、楕円性のポロイダル流速に対する十分条件が得られ、その境界値が等方圧力の場合から推察される音速に圧力の非等方性が加わった速度よりもわずかに小さい速度であることが明らかになった。

(3) 簡略化一流体・二流体モデルを用いた流れをもつ平衡の解析

流れをもつ磁気流体軸対称平衡に対して前項で無視していたイオンの有限温度効果を導入し、磁場閉じ込めプラズマの定常状態におけるイオン温度による微視的效果の重要性を明らかにする。イオン温度が有限であることから現れるラーマー半径効果によるジャイロ粘性を表す圧力テンソルの非対角項と熱流束の磁場に垂直な成分が二流体方程式に含まれる。有限ラーマー半径効果によって、高温の無衝突プラズマにおいては速度分布関数の高次のモーメントの項が流体方程式に多数加わる。これらは、巨視的な特性長に対するイオンラーマー半径の比 δ を小パラメータとして漸近展開された形で導入され、流速と熱速度との比が δ となる遅いダイナミックスのオーダーリングを適用すると非常に簡単化される。そのため、そのような遅い平衡流を考え、平衡方程式も漸近展開を用いて簡略化することで、比較的簡単に矛盾なくイオンの温度効果を取り入れることができる。平衡方程式の漸近展開にはトカマクプラズマにおいて逆アスペクト比 ε を展開パラメータとし、高ベータ ($\sim \varepsilon$)、高アスペクト比近似を適用する。流速をどのオーダーとするかによって δ と ε との関係が決まる。流れの効果は、特異性をもつ領域の近傍で顕著になることから、ポロイダル音速とポロイダルアルヴェン速度の二通りのオーダーを流速に適用する。そのとき、 ε はそれぞれ δ と δ の自乗のオーダーとなる。後者は通常の簡略化二流体ドリフトモデルで用いられるものである。この2通りの場合に対して平衡方程式の漸近展開を行っていくが、まずこの手法を確立し、二流体・イオン温度効果が入る前の基準となる状態を示すために、一流体MHDにおいて解析を行い、そしてポロイダルアルヴェン速度程度の流れに対して簡略化二流体平衡方程式を導出し (MIT: Jesus J. Ramos 博士)、両者の比較を行った[2]。ポロイダル音速程度の流れに対する簡略化二流体平衡モデルの解析は現在進められている。

流れがポロイダル音速程度のとき、運動エネルギーは磁気エネルギーに対して ε の3次のオーダーとなるため、摂動展開の3次の項まで考慮に入れる必要がある。そのため、一流体MHDモデルに対して定式化した平衡状態は有限アスペクト比の簡略化MHDモデルの平衡状態を表している。このとき最低次では、磁束関数に対する方程式は静止平衡に対するGS方程式と等しくなり、密度と圧力は任意の磁気面関数となる。流れの効果は高次の方程式で現れ、トロイダル効果によってポロイダル流速がポロイダル音速と等しくなる面での特異性が再現された。この結果は低 β トカマクに対して定式化された理論の高 β への拡張であり、磁束関数に対する方程式に特異点が現れている点が低 β の場合と異なっている。

次に流れがポロイダルアルヴェン速度程度のときの一流体MHD平衡の簡略化方程式を求めたところ、流れの効果は磁束関数に対するGS方程式の最低次で現れ、ポロイダル流がポロイダルアルヴェン速度と等しくなる面での特異性が得られた。この特異性は、トロイダル性に関係なく現れる点で、ポロイダル音速の特異性とは異なる。二流体平衡の場合にはポロイダル流速にイオン反磁性ドリフトの効果が加わり、イオン温度効果による特異点のポロイダルアルヴェン速度からのずれが見られた (MIT: Jesus J. Ramos 博士)。

今後の計画として、以上のように求めたイオン温度効果を含む流れをもつ平衡状態の簡略化方程式を用いて数値解析を行い、解の性質を明らかにする。また、このように摂動展開を行うことでヘリカル効果を比較的容易に導入できることが予想されるため、次にヘリカル効果を含んだ簡略化二流体平衡方程式を導出し、数値解析でイオン温度効果が顕著となる流れをもつ二流体平衡

状態に対する軸対称系とヘリカル系での違いを明らかにしていく。

共同研究者

- ・ Jesus J. Ramos 博士 (MIT)
- ・ 中島徳嘉教授 (核融合科学研究所)

参考文献

[1] A. Ito, J. J. Ramos, and N. Nakajima, “Ellipticity of axisymmetric equilibria with flow and pressure anisotropy in single-fluid and Hall magnetohydrodynamics”, Phys. Plasmas Vol.14, No.6, (2007) pp.062502-1 - 062502-8.

[2] A. Ito, J. J. Ramos, and N. Nakajima, “Axisymmetric equilibria with flow in reduced single-fluid and two-fluid models”, Plasma Fusion Res.に投稿準備中

2.1.2.2.5. 高精度MHDコード、共通MHDコードの開発（三浦）

LHD 中の MHD 不安定性は、実験装置の性能等を左右する重要な要素である。MHD シミュレーションにおける主たる研究課題は不安定性の成長とその飽和機構の解明であり、これと関連して自由境界効果、流体の圧縮性、3次元性（トロイダル流れや装置の形状）の影響などが研究の要素としてとり上げられる。シミュレーション科学研究部では、一般座標を用いた3次元圧縮性・非線形 MHD 方程式のシミュレーションコードを作成し、この研究に取り組んできた。この研究による成果は、平成16年以降では、IAEA 核融合会議での発表[1]、国際ステラレータワークショップ[2]、ヴァレンナ・ローザンヌ核融合理論ワークショップ[3]などの場で報告した。以下では、高精度 MHD コードの開発の必要性和技術的側面、年度毎のコード開発と研究成果について報告し、最後に今後の展開を展望する。

高精度 MHD コードの必要性和取り組み：シミュレーション技術の観点から

ヘリカル形状の装置では、圧力駆動型不安定性、バルーニング不安定性など短波長不安定性が支配的である。短波長不安定性の成長に伴う非線形相互作用の発生、飽和の機構解明と LHD 実験結果の理解などが、本プロジェクトにおける MHD コアシミュレーションの役割である。短波長不安定性が支配的な場合、数値シミュレーションには十分に高い解像度・精度を要する。これが、最も基本的な MHD コードへの要請である。

現在のスーパーコンピュータでは、比較的大きい格子点数で高い解像度を用意できるが、同時に、安定性条件の制約による時間刻み幅の低下をもたらす。特に磁力線平行方向の熱伝導などの二階微分が数値的安定性を支配する場合、計算量は格子点数の二次関数として増加するため、可能な限り格子点数を抑えるのが望ましい。高解像度必要性和計算量抑制はお互いに矛盾する要請であるが、シミュレーションの計算解像度には、格子点数だけではなく離散化手法も大きな影響を与える。これらの事情に鑑み、MHD コアシミュレーションに当たっては、適切な離散化手法を採用し、微分近似の十分な精度、解像度向上を行うことにした。我々が採用する高精度計算手法は、Lele(1992)らによって開発されたコンパクト差分法である。これは、関数 $f(x)$ の i 番目の

格子点における微分を

$$\beta f_{i+2}^{(1)} + \alpha f_{i+1}^{(1)} + f_i^{(1)} + \alpha f_{i-1}^{(1)} + \beta f_{i-2}^{(1)} = a(f_{i+1} - f_{i-1}) + b(f_{i+2} - f_{i-2}) + c(f_{i+2} - f_{i-2})$$

のように、連立させて求める。この手法では最大 10 次精度まで精度を上げる事ができる上、人工粘性の影響が小さく、ほぼ Nyquist 波数の近くまでの解像度が与えられる。

計算手法の高精度化のもう一つのメリットは、磁力線平行方向と垂直方向の分離である。矩形格子でシミュレーションする場合、格子線方向と磁力線方向は一致しないため、この 2 方向への微分を、微分作用素の磁場ベクトルへの射影で分離する必要がある。差分法の打切り誤差のため、この分離は完全ではない。他方、LHD などの装置では磁力線平行方向と垂直方向の熱拡散係数は 10 桁以上の開きがある。シミュレーションで大きな磁力線平行方向を採用すると、わずかな誤差が 10 桁以上増幅され、結果として、磁力線平行方向に課した筈の熱伝導が垂直方向への緩和をもたらす。シミュレーションコードの高精度化により、磁力線平行方向と垂直方向の分離は非常に明確になり、垂直方向への人工的な緩和は発生しにくくなる。

このような技術的側面を踏まえ、高精度 MHD シミュレーションコードの開発を進めた。

平成 16 年度成果

圧縮性・非線形 MHD シミュレーションコード(MHD In Non-Orthogonal System, MINOS コード)による LHD 内寄せ磁場配位のシミュレーションを行い、このコードによるシミュレーション結果が簡約化 MHD コードのシミュレーション結果と定性的に類似する事、具体的には圧力駆動型不安定性の成長、非線形飽和を経て、比較的良好な閉じ込め状態に緩和し得ることなどを示した。([1]; 図 2.1.2.2.5-1)。対称性や簡約化を行わない完全な 3 次元ヘリカル形状での非線形シミュレーションで不安定性の成長と飽和を調べた、先進的な事例である。また、この研究で、磁力線平行方向への運動が強く励起される事、圧縮性が無視できない程に大きく作用することなど、簡約化方程式では無視される効果の影響が初めて示された。(この当時の MINOS コードでは、微分近似に 4 次精度中心差分法を用いた。)

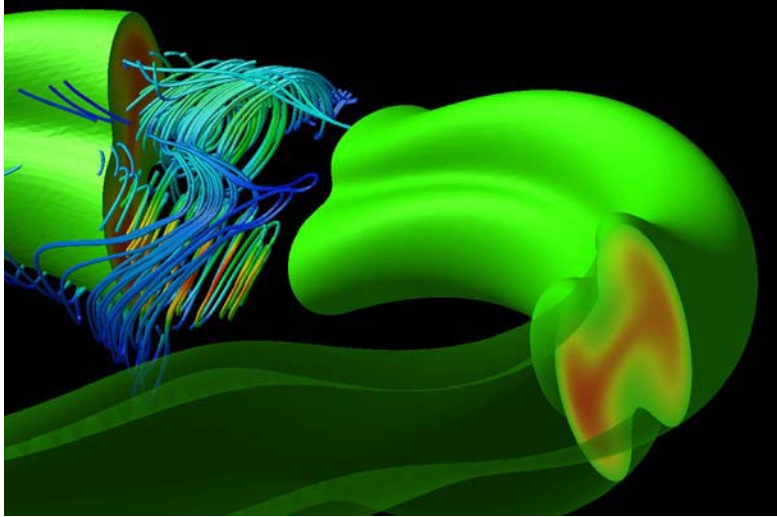


図 2.1.2.2.5-1: LHD 中の 3 次元フル MHD シミュレーションによる圧力の不安定性による変形。

平成 17 年度成果

MINOS コードの微分近似部分を、それまでの 4 次精度中心差分法から 6 次精度コンパクト法に変更し、磁力線平行方向への熱伝導効果が入ったシミュレーションを初めて行った。この結果、プラズマの挙動は安定な方向に変化し、粘性の値を一桁以上小さく出来るようになった。また、数値粘性の影響が劇的に軽減されたため、線形安定性解析コード CAS3D によって得られた線形成長率との比較が可能になった。

改良したコードを用いたシミュレーション結果から、線形成長に伴う磁力線平行方向への自由エネルギーの放出が大きく、これが不安定性の閉じ込め面の変形への影響を緩和している事、長時間シミュレーションでは、不安定性の飽和後に良好な閉じ込め状態へ緩和する傾向があることなど示した。([2][4]; 図 2.1.2.2.5-2) また、この圧縮性の影響の有理面ごとの評価を、パッシブ面の変形を通じて初めて行った。[5] この研究から、共鳴有理面ごとの圧縮性・膨張率の評価を行い(たとえば $\iota/2\pi=0.5$ 有理面では膨張率が 1.3 程度)、有理面ごとの流体の圧縮性の作用を明らかにした。同年に開催されたプラズマ数値シミュレーション国際会議(ICNSP'05)では、このシミュレーション結果作成した図により、Bunemann Award (Still Image) を受賞した。(図 2.1.2.2.5-3)

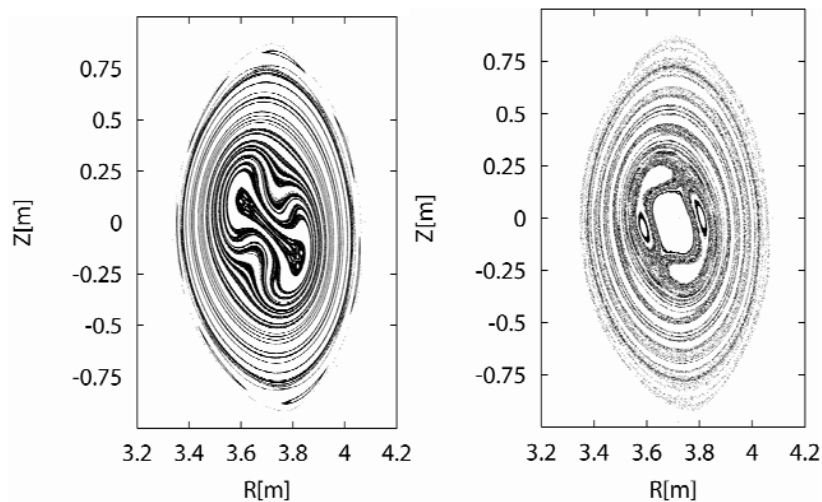


図 2.1.2.2.5-2: 不安定性の成長に伴う磁力線のポアンカレ断面の変形。 $m/n=2/1$ モードの成長に伴い、中心領域の磁気面はマッシュルーム状に変形する。これが飽和した後、中心部にはアイランド状の構造が形成されるが、比較的外側の有理面への不安定性の影響は小さいことがわかる。

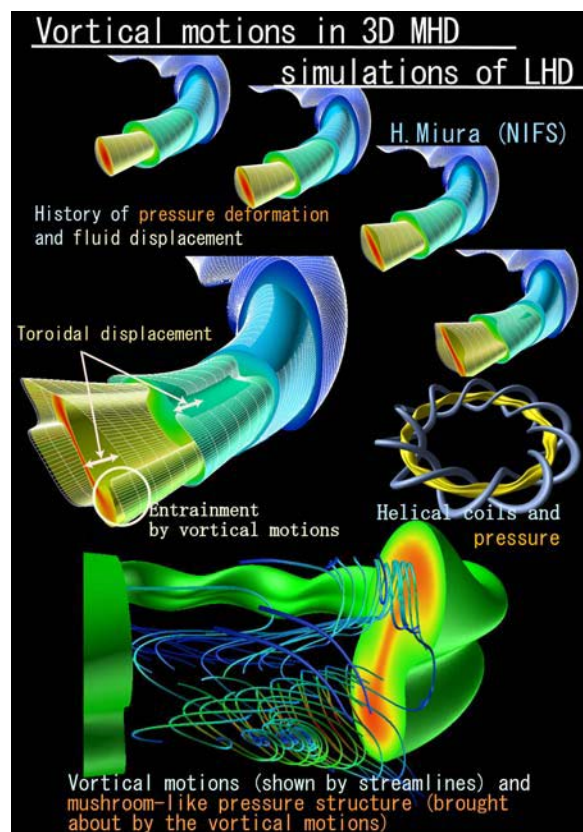


図 2.1.2.2.5-3: ICNSP'05 Bunneman Award (Still Image) .

平成 18 年度成果

MINOS コードの微分近似部分を 8 次精度コンパクト法に変更し、磁力線平行方向と垂直方向の

熱伝導係数の分離を一層大きくするなど、コードの改良を継続した。

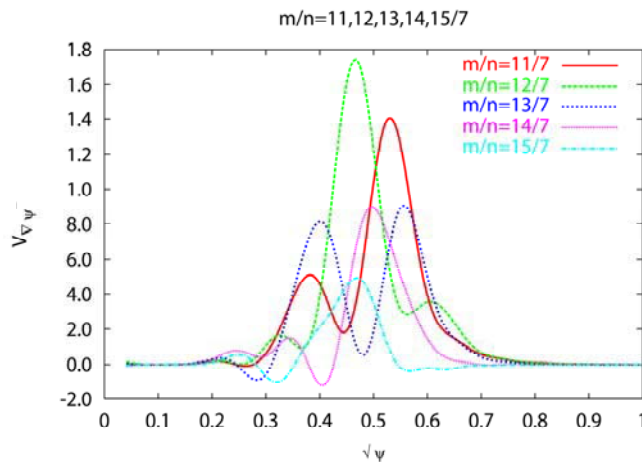


図 2.1.2.2.5-4:速度場垂直成分のフーリエ係数の動径方向分布。このシミュレーションでは $n=7$ モードが最も不安定である。 $m/n=12/7$ モードが最大振幅を持ち、これに隣接する $m/n=11/7$ の動径方向分布から、バルーニングモード的な性質が見受けられる。

図 2.1.2.2.5-4 は、Varenna-Lausanne 国際会議で報告した不安定モード(速度場垂直成分)の、動径方向分布である。この図に見られる分布はバルーニング的であり、これは CAS3D コードによる解析と定性的に合致している。また、圧力揺らぎの分布などもバルーニング的特長が明瞭に現れている。線形成長の飽和後にはポロイダル断面の運動エネルギーよりも磁力線平行方向の運動エネルギーが強くなる。垂直方向の運動エネルギーが減衰振動を伴いつつ低下するのに対し、平行方向のエネルギーは緩和されずに長時間残存する傾向が見られる。これらの傾向は平成 18 年度以前の、より大きな粘性係数を採用したシミュレーションにも共通して見られ、比較的大きな粘性係数を用いたシミュレーションでも、定性的な振る舞いを知る上で重要な参考情報となる事を示している。また、エネルギー方程式の解析から、圧縮性に由来する項が非圧縮性の不安定性駆動項のほぼ 60% 近くの大きさ(符号は反対)に達し、線形成長率を大きく押し下げることなどが判った[3]。このように、磁力線平行方向へのエネルギーの解放、圧縮性による線形成長率の大きな低減が、非線形的な効果とともに、プラズマの安定な閉じ込めに大きく寄与していることが明確に示された。

平成 19 年度成果

シミュレーション科学研究部では、広くトーラス系の MHD 研究を推進するため、これまでの MHD 研究の成果を基に、オープンソースコード「MHD 共通コード」(仮称)を作成する事にした。これは、ポロイダル断面内の微分をコンパクト差分法で、トロイダル方向の微分を記述し、空間を領域分割でいくつかに分けて分散並列シミュレーションを行うシミュレーションコードである。平成 19 年度は、コードの基本仕様の策定、各要素 (Fortran90 モジュール) の作成を行っている。平成 19 年 10 月現在で、基本仕様の決定、微分作用素用並列・分散 LU ライブラリーなどの作成を行った。今後、共通コードを使った不安定性のシミュレーションでの実行、不安定性の成長の再現性の検証などを経て、平成 20 年度もしくは 21 年度を目処に公開する予定である。

上記作業の一方、MINOS コードによるシミュレーションは、格子点数を従来よりも大きくする(最大 16 倍)事で、前年度よりも更に理想モードに近い不安定性の成長を実現した。成長率の振

る舞いはCAS3Dコードと合致しており、本シミュレーションコードが不安定性の成長を中程度の波数まで適切に再現していることがわかる。[6] 磁力線平行方向へのエネルギーの解放、圧縮性の影響などは平成18年度までの研究結果と一致しており、年度後半に向けて、非線形飽和後の緩和過程の研究を意識した長時間シミュレーションを継続中である。

平成20年度以降の計画

冒頭で記述した通り、高精度MHDシミュレーションの課題は、LHD実験で観測されるMHD揺動の理解、巨視的な圧力・温度分布の変化などの理解である。特に、短波長不安定モードの速い成長と飽和、短波長の飽和が長波長モードの成長に与える影響など、不安定性の非線形発展の基本性質の理解が主要課題となる。また、これまでのシミュレーションで得られた磁力線平行方向へのエネルギー放出による不安定性の影響の緩和、圧縮性による成長率の低減効果なども、より実験に即した配位・圧力分布で検証されなければならない。短波長モードの挙動の理解には二流体効果が重要であるため、シミュレーションモデルも一流体MHDモデルから二流体モデルへと移行する。これらを目標として、モデル・コード拡張を行いつつシミュレーション研究を推進する。以下は、この目標のための二つの計画について記述する。

第一は、現在のシミュレーションを技術的に改良し、規模を拡大する計画である。現在のMINOSコードや開発中の共通MHDコードなどは、ヘリカル座標系の中で格子を一様に配置している。実験結果の理解のためには、実験に近い平坦な圧力分布でのシミュレーションが必要である。このような圧力分布では狭い領域に高 β の圧力分布が局在化するため、現在の一様格子でシミュレーションを行うには格子点数が非常に大きくせざるを得ない。既に述べたように、格子点数の不用意な増加は急速な計算負荷の増大に直結するため、対策として、圧力勾配に応じて必要な格子を動的に確保する適合格子法へのコード改良を行う。二流体シミュレーションでは、ホイッスラーモードなど非常に速い波動が存在するため、技術的な困難が予想される。Hall MHDのシミュレーション研究[7] (Sect. 2.4.2.2) などで二流体モデルの数値的な安定性等の情報集積を行い、効率的に研究を進める。さらに、周辺部の低圧力・低密度（擬真空）領域を連続的に取り扱う技術として Immersed Interface Method を開発中であり[8]、この実装を予定している。このように、現在のシミュレーションコードの高精度・高解像度性を活かしつつ、シミュレーションモデルの拡張、コードのAMRによる効率化、周辺領域モデルの取り込みなどを行い、コアプラズマの挙動の背後にある不安定性の性質を明らかにする。

第二に、シミュレーションに数値的なモデルを導入する事で、実験により近いパラメータのシミュレーションを実現する事を計画している。現在のシミュレーション手法は、一般に「直接数値シミュレーション」と呼ぶ、方程式をそのまま離散化して解く手法である。この手法は、あらゆる物理効果をすべて取り入れるために信頼性が高いが、現実の実験装置に合わせた高レイノルズ数、高磁気レイノルズ数のシミュレーションは現実的ではない。このため、短いスケール長の効果をサブグリッドスケールでモデル化するラージエディシミュレーション(LES)を考える。方程式にフィルターをかけてグリッドスケール(GS)とサブグリッドスケール(SGS)に分離し、GSは直接数値シミュレーションと同様に解くが、SGSは簡単化したモデルで置き換える。この時、非線形項へのフィルタリングについてクロージャーの問題が発生するため、SGSモデルは一意には決

まらない。この複雑さのため、研究は難航が予想される。しかし、適切な SGS モデルが作成された場合には、現在のスーパーコンピュータで現実的なパラメータ領域のプラズマコアシミュレーションが可能になり得ることから、その意義は大きい。この研究は、前段に述べた MINOS コードの AMR 化、二流体効果の導入と歩調を合わせて進展を図る。AMR 化可能な領域まではグリッドスケールとして取り扱い、それ以上に微細なスケールは二流体効果を取り入れた SGS モデルとして取り扱う事を想定する。この研究は簡単な物理系での基礎研究から始める必要があり、Hall MHD シミュレーション (Sect. 2. 4. 2. 2) などを通じて、基礎的な知見を集め始めたところであるが、MINOS コードの AMR 化、二流体モデルの導入後の本格展開を目指して検討を進めていく。

参考文献

- [1] H. Miura et al., "Non-disruptive (20th IAEA Fusion Energy Conference, Villamoura, Portugal, 1-6 November 2004, IAEA-CSP-25/CD/TH/2-3, ISBN 92-0-100405-2)
- [2] H. Miura et al., "Nonlinear Evolution of MHD Instability in LHD" , Proc. the 15th International Stellarator Workshop (Madrid, Spain, 3-7 October 2005)(招待講演)
- [3] H. Miura et al., "Direct Numerical Simulation of Nonlinear Evolution of MHD Instability in LHD", in "Theory of Fusion Plasmas", Proceedings of Joint Varenna-Lausanne International Workshop (August 28-September 1, 2006, Varenna, Italy) (招待講演論文); AIP Conference Proceedings Vol.871 (2006)
- [4] H. Miura, N. Nakajima, T. Hayashi and M. Okamoto, "Nonlinear Evolution of MHD Instability in LHD", Fusion Science and Technology Vol.51 (2007) pp.8-19
- [5] H. Miura et al., "Vortical, Toroidal and Compressible Motions in 3D MHD Simulations of MHD", J. Plasma Physics Vol.72 (2006) 1095-1099.
- [6] H. Miura and N. Nakajima, "Growth of eigenmodes with moderate mode numbers in nonlinear MHD simulation of LHD", the 17th International Toki Conference/16th International Stellarator/Heliotron Workshop (October 15-18, 2007, Toki, Japan)
- [7] D.Hori and H. Miura, "Spectral properties of Hall MHD turbulence", the 17th International Toki Conference/16th International Stellarator/Heliotron Workshop (October 15-18, 2007, Toki, Japan)
- [8] C.O.Halahap and H. Miura, "Development of simulation code of flows with moving boundary using an immersed interface method", the 17th International Toki Conference/16th International Stellarator/Heliotron Workshop (October 15-18, 2007, Toki, Japan)

表 2.1.2.2.5-1：高精度 MHD コードの開発の経緯と今後のロードマップ

平成 16 年度	4 次精度中心差分法による非線形・圧縮性 MHD 方程式シミュレーションコード MINOS による完全 3 次元 LHD 形状での MHD シミュレーション
平成 17 年度	微分近似手法の 6 次精度コンパクト法への換装と、磁力線平行方向への熱伝導効果の導入
平成 18 年度	微分近似手法の 8 次精度コンパクト法への換装
平成 19 年度	共通 MHD コード用分散メモリー型コンパクト差分モジュールの開発 MINOS コードの AMR 化・二流体化の基礎研究
平成 20 年度(予定)	共通 MHD コードの開発 MINOS コード AMR 版の開発
平成 21 年度以降(予定)	共通 MHD コードの公開 AMR 化した MINOS コードによる超高解像度 MHD／二流体シミュレーション

2.1.2.3. 周辺モデル プラズマの接する壁近傍での電位構造と微粒子の振舞い（富田）

近年、閉じ込めプラズマの周辺プラズマの存在が重要視されている。そこでは、閉じ込めプラズマから流出するプラズマ粒子束、熱束に対してプラズマの接する壁から生成される金属不純物や炭化水素が混在しており複雑な振る舞いをしている。さらに、最近、核融合プラズマ実験装置 [LHD (大型ヘリカル装置:核融合科学研究所)、DIII-D (米) TEXTOR-94, ASDEX-U (独)、等] で数千放電の後、微粒子 (ダスト粒子) の収集、観測が行われた。これらの微粒子はダイバータ板やプラズマ周辺金属壁等へのプラズマ照射により発生して、大きさは数十ナノm から 数百マイクロンm 程度におよび、形は球状やフレーク状と様々で、その成分はカーボン等の構造材料金属や炭化水素から成っている。今後、核融合プラズマ保持時間の長時間化に伴い、これらの微粒子の発生は顕著になると思われる。重水素及び三重水素を燃料にした核融合燃焼実験では、発生した微粒子は、放射性同位元素である三重水素を多量に吸収したり、核融合反応で発生する中性子によって構成金属が放射化されたりする。放電終了後のこれらの放射化された微粒子の扱いや回収等は、安全性の観点から国際熱核融合実験炉 ITER においても解決すべき重要な課題の一つに挙げられている。

これまで、プラズマの接する壁前面での電位形成 (デバイシース、磁気プレシース、衝突プレシース) を研究して、そのような場での微粒子の振る舞いを研究してきた。以下にそれらの成果と今後の研究計画を示す。

2.1.2.3.1 研究成果

1) 球形微粒子のプラズマの接する金属壁からの離脱条件 [1-5]

現在のプラズマ閉じ込め装置で観測されている微粒子密度は 10^4 m^{-3} 以下であり、微粒子電荷がおおよそ $10^4 e$ であることを考慮しても、その集団的運動は無視でき、個々の微粒子の挙動を考えれば十分である。我々は、これまでに、1次元理論解析によってプラズマの接する壁近傍の電位構造を求め、壁上有る微粒子の壁からの離脱条件を明らかにした [1-5]。そして、1次元PIC (Particle In Cell) シミュレーションによって壁前面に衝突プレシースと静電シース (デバイシース) を構成して微粒子の荷電変化と運動を追跡してその挙動を調べてきた [6]。さらに、微粒子の大きさがデバイ長と同程度又はそれより大きい場合があることを考慮して、軸対称2次元PICシミュレーションコードを開発して壁からの離脱条件を求めた [7]。プラズマの接する壁上有る微粒子に働く壁方向の力としてはプラズマイオンの微粒子への吸収による力、イオンとのクーロン散乱による摩擦力、そして金属壁に対する微粒子負電荷の鏡像電荷による静電力である。一方、微粒子を壁から離す力としては共に負に帯電した壁と微粒子間の静電反発力である。壁上有る微粒子の電荷はその半径の2乗に比例し、これを考慮すると、イオンとのクーロン散乱による摩擦力は半径の4乗に、イオン吸収による力は3乗に、鏡像電荷による静電力は半径の2乗に比例する。これらの点

を考慮して磁場の存在しない系について、重力が壁外向きと壁方向の場合を図 2.1.2.3-1, 2 に示す。

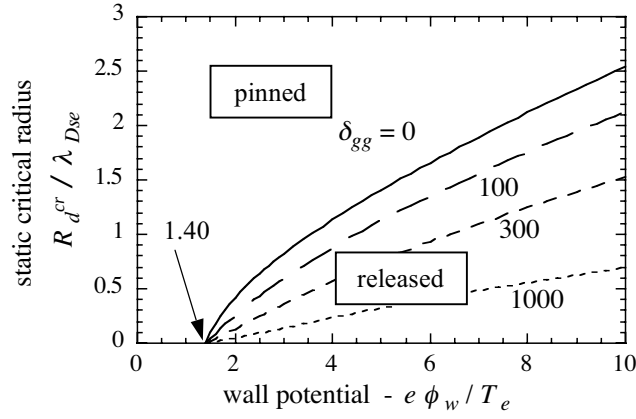


図 2.1.2.3-1 重力が壁外向きの離脱微粒子半径の壁電位深さ依存性

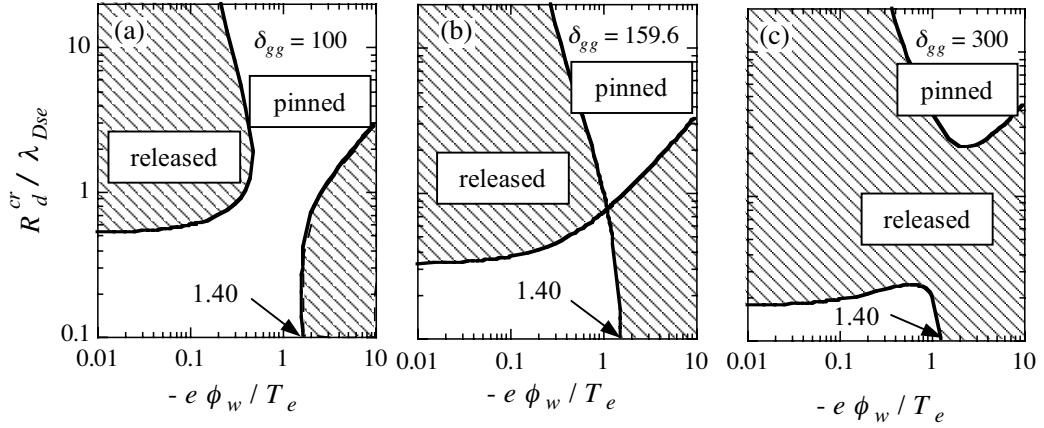


図 2.1.2.3-2 重力が壁向きの場合の離脱微粒子半径の壁電位深さ依存性。(a) $\delta_{gg} = 100$, (b) 159.6, (c) 300

ここで、 $\delta_{gg} \equiv \rho_d (g/cc) / n_{se,19} \sqrt{n_{se,19} T_e (eV)}$ は重力の影響を示すパラメータであり、炭素微粒子で、ダイバータ部のプラズマ密度が 10^{18} m^{-3} 、温度が 10 eV の場合、20 である。これらの結果から以下の点を明らかになった [1-5]。

a) 微粒子が壁から離脱するためには十分な静電反発力が必要であり、そのために壁電位に閾値が存在する。球形微粒子の場合、壁電位の深さは $1.4 T_e / e$ となる。ここで、 T_e はシース入口での電子温度である（図 1，2）。

b) 閾値より深い壁電位の場合、離脱微粒子半径に（静的）限界値が存在する。その大きさは壁電位の深さが $4 T_e / e$ の場合、デバイ長程度である（図 1）。

c) 静的限界値より大きな微粒子は主にイオンとのクーロン摩擦力によって壁から離れることができない。

d) 重力が壁と垂直方向に作用している場合では、重力の影響で壁電位の閾値より浅い壁電

位においても離脱する（図 2）。重力パラメータ δ_{gg} の大きさ、つまり壁前面のプラズマパラメータによって、離脱領域が結合したり、重なり合ったりする（図 2.1.2.3-2）。

次に、実際のダイバータ板のように壁に入射する斜め磁場の影響を研究した。そこでは、空間的に変化する電界と斜め磁場により荷電粒子は電界方向に分極ドリフトをして、その速度は電界の勾配に比例する。この効果により磁気プレシースが形成される。その特性長はイオンのラーマー半径程度であり、通常はデバイ長より長い。つまり、プラズマの接する壁前面には特性長がデバイ長程度のデバイシースが形成され、その外側に磁気プレシースが形成される。この磁気プレシースの影響を取り入れた解析による微粒子の壁からの離脱条件を求めた。重力が壁と垂直方向の結果を図 2.1.2.3-3 に示す。ここで、 $|f_w - f_{dse}|$ はデバイシース入口から壁への電位降下であり、 β は壁垂直方向からの斜め磁場の角度である。壁電位が深い場合は斜め磁場が壁と平行に近づくにつれて限界離脱半径が大きくなる。これは、微粒子を壁に押しつける原因となるプラズマイオン流が壁と平行に近づいて壁と垂直方向成分が静電反発力より小さくなるためである。しかし、壁電位が閾値電位より浅くなるとある角度領域で離脱する半径がなくなることが明らかになった。

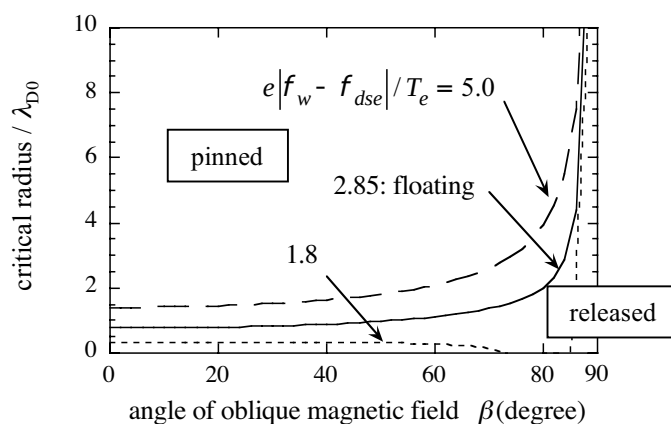


図 2.1.2.3-3 離脱微粒子半径の斜め磁場角度依存性。

以上の解析の結果、壁や斜め磁場の角度によって壁前面のプラズマパラメータ（密度、温度）を調節すれば壁から離れる微粒子の大きさをコントロールできることが明らかになった。これらの調節は予備電離プラズマ放電や放電洗浄時に行うことが可能と考えられる。

2) 壁近傍の電位形成と微粒子の振る舞い [6]

プラズマの接する壁近傍では磁場のない場合、デバイシースと衝突プレシース（特性長は衝突自由行程程度でデバイ長より十分長い）が形成されている。これらの電位構造を 1 次元 PIC シミュレーションによって形成した。その結果の電位、電荷密度、流速、および実効温度の空間分布を図 2.1.2.3-4 に示す。ここで、 $x=0$ に完全吸収壁があり、プラズマは $x = -L$ から注入して、中性粒子は一様に分布している。デバイシース入口はボーム条件からイオン流速とイオン音速が等しい場所で定義される（図 2.1.2.3-4：破線）。このように形成された系の中で壁から離れた微粒子はプラズマ中に進むが、壁から離れるに従って壁との静電反発力は弱まるが、プラズマイオンによる摩擦力は大きくなるので、壁に押し戻される。このようにして壁から離れた小さな微粒子は壁前面で空間的に振動する。微粒子の運動方程式と吸収電流による電荷の時間変化を同時に解いて微粒子の振る舞いを求めた結果を図

2.1.2.3-5 に示す。微粒子半径 (R_d) が大きな場合 (図 2.1.2.3-5 上段) は壁前面とプラズマの間を振動するが、小さな微粒子 (図 2.1.2.3-5 下段) では、その運動が速いため荷電の遅延によりプラズマ中深く浸透することがわかる。

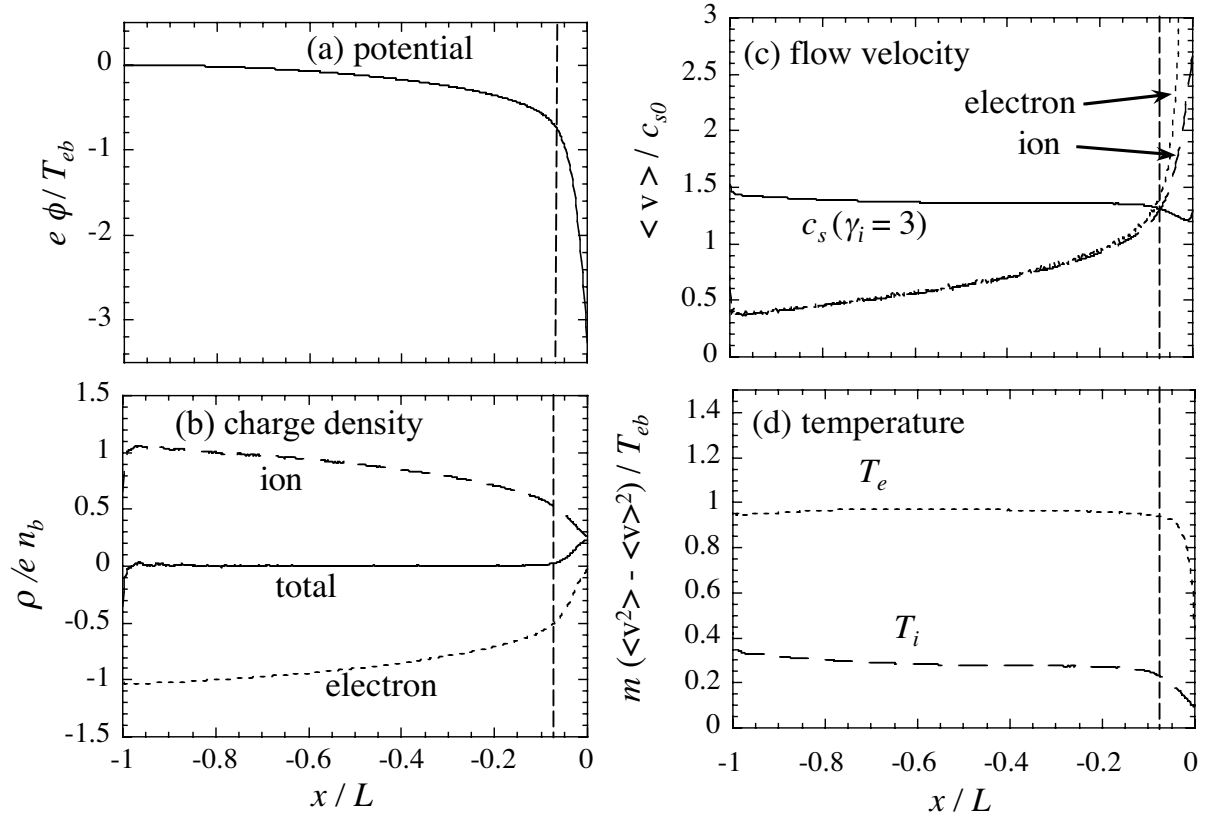


図 2.1.2.3-4 1次元P I Cシミュレーションによって形成された (a) 電位分布、(b) 電荷密度、(c) 流速、(d) 実効温度の空間分布。 $x=0$ に完全吸収壁があり、プラズマは $x=-L$ から注入されていて、中性粒子が一樣に分布している。

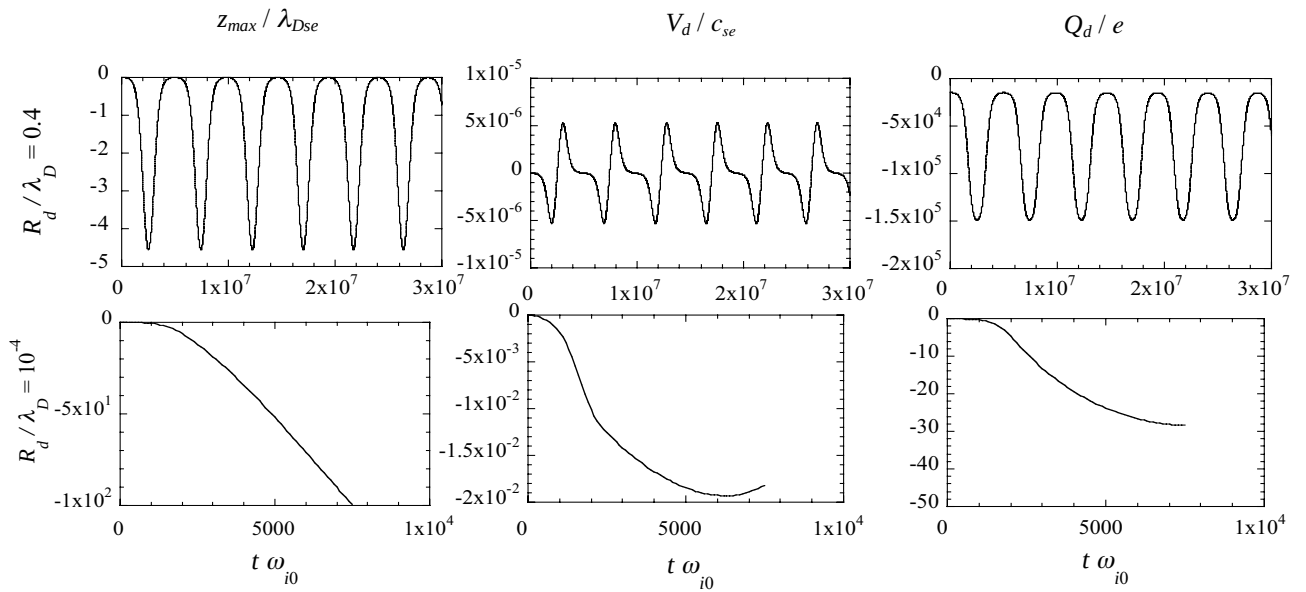


図 2.1.2.3-5 1次元P I Cシミュレーションによって形成された壁前面のデバイシース、衝突プレシース中での微粒子の位置、速度、電荷の時間変化。上段： $R_d/\lambda_{Dse} = 0.4$ ，下段： $R_d/\lambda_{Dse} = 10^{-4}$ 。

3) デバイ長と同程度の微粒子の壁からの離脱条件 [7]

これまでの解析やシミュレーション研究では微粒子はデバイ長より十分小さいとしてプラズマへの影響を考慮しなかった。しかし、現実の微粒子はデバイ長と同程度、またはそれ以上のものが存在するために、軸対称2次元PICシミュレーションコードを開発して微粒子の壁からの離脱条件を求めた。図 2.1.2.3-6 に得られた物理量 ((a) 電位、(b) イオン密度、(c) 電荷密度、(d) イオン流速) の空間分布を示す。ここで、 $z = 0$ に完全吸収壁が置かれ、プラズマは $z = -16 \lambda_{De}$ から入射されている。

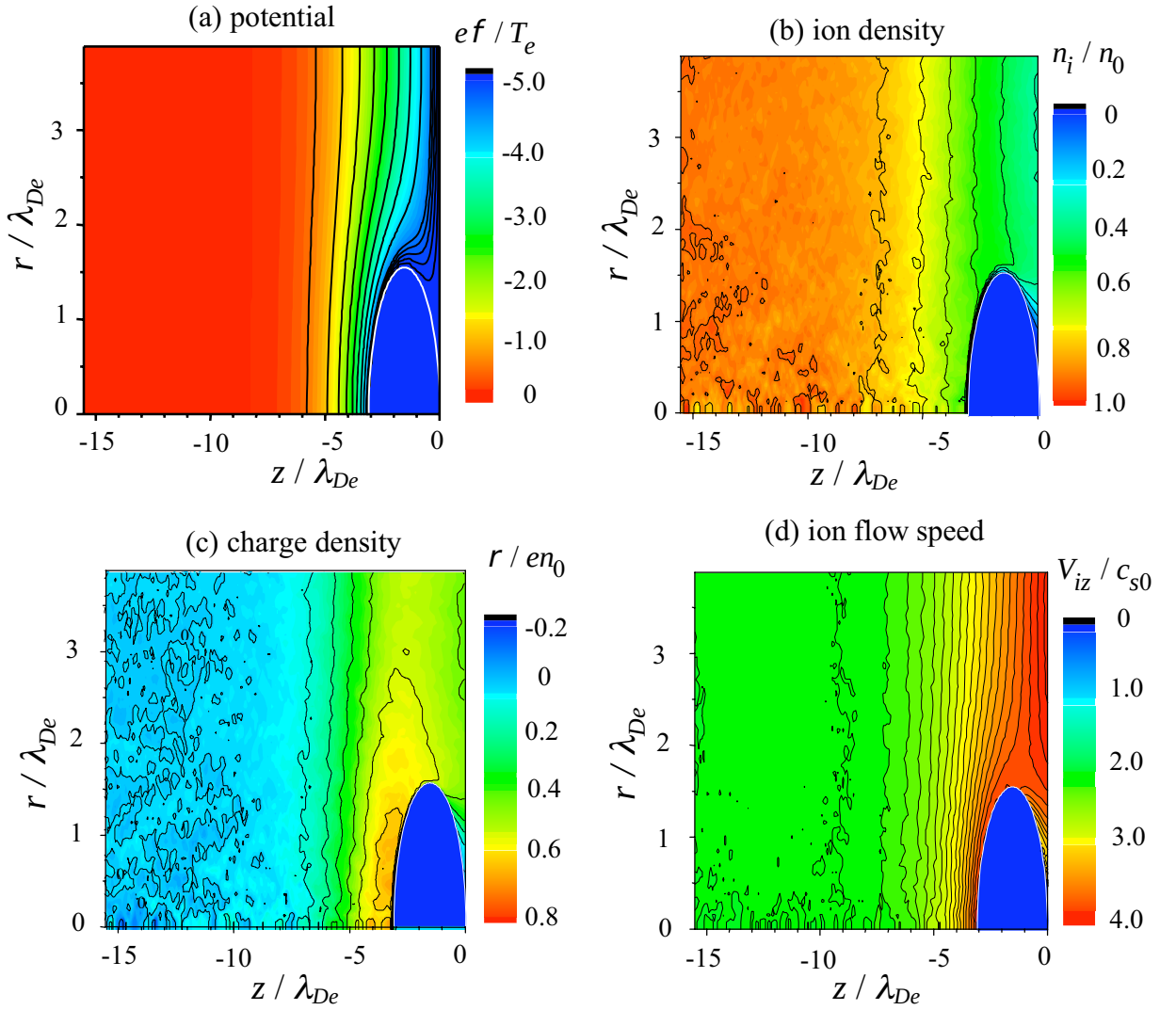


図 2.1.2.3-6 2次元PICシミュレーションによって得られた壁上に置球形金属微粒子による物量の空間分布：(a) 電位、(b) イオン密度、(c) 電荷密度、(d) イオン流速

この結果から得られた微粒子に働く力の微粒子大きさ依存性を図 2.1.2.3-7 に示す。

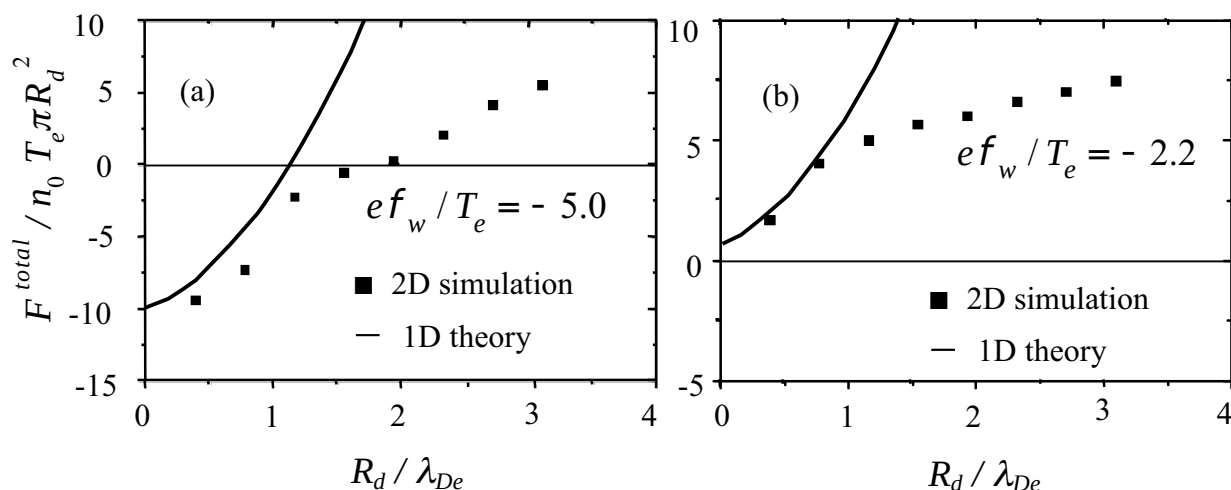


図 2.1.2.3-7 壁上の球形金属微粒子に働く力の微粒子半径依存性：(a) $e\phi_w/T_e = -5.0$,
(b) $e\phi_w/T_e = -2.2$ 。

ここで、(a) は壁電位が深い場合で、(b) は微粒子がない場合の浮遊電位に相当する浅い電位である。この結果から深い電位の場合は1次元解析によって予想されるように静的限界半径が存在し、浅い電位の場合はそれが存在しないことが確かめられた。微粒子半径がデバイ長より大きくなるとプラズマによる電位の遮蔽効果によって微粒子に働く力が弱くなっていることが明らかになった。

4) 壁からの粒子放出を含んだ壁近傍の電位形成 [8]

プラズマの接する壁からの粒子放出（2次電子、水素原子、水素分子）を含んだ場合の壁近傍の電位形成に関するPICシミュレーション研究をインスブルック大学の D. Tskhakaya との共同研究で遂行した [8]。その結果を図 2.1.2.3-8 に示す。ここでは衝突プレシース、斜

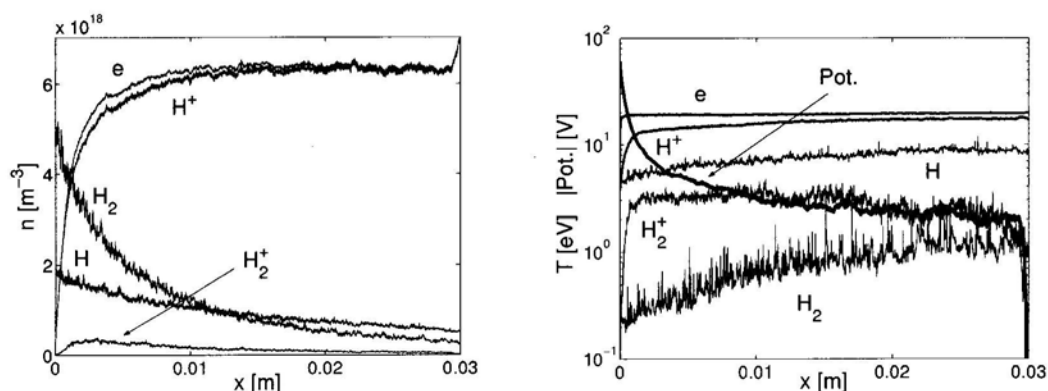


図 2.1.2.3-8 壁からの粒子（2次電子、水素原子、水素分子）の放出を含んだ系での (a) 各粒子の空間分布 (b) 電位と温度分布。

め磁場による磁気プレシース、デバイシースを考慮した。(a) は各種粒子の空間分布、(b) は電位分布と各粒子の温度分布である。これらの結果から磁気プレシース入口でのボーム条件、イオン流速、壁への電位降下が古典的表式とよく一致することが確かめられた。今後、これらの結果を核燃焼プラズマの多種イオンに発展させて計画である。

2.1.2.3.2 今後の研究計画

今後の研究計画は、ヘリカルプラズマに於ける周辺プラズマのシミュレーション研究として、SOL からダイバータ、プラズマの接する壁近傍の境界層プラズマ、さらに壁とプラズマの相互作用に至る周辺部領域での微視から巨視に至るスケールを有する複合物理現象に関する研究を、所内外の共同研究を組織して総合的に遂行する。そこでは、以下の3領域に分けられる。

(A) 壁材料中および表面：壁とプラズマとの相互作用によって壁中へのプラズマ粒子の蓄積、壁からの不純物（金属、炭化水素等）、微粒子の生成、およびそれらの壁表面への付着等に関する研究：分子動力学、モンテカルロ法シミュレーション。

(B) SOL/ダイバータプラズマと壁との間の境界層プラズマ：各種シース（非中性プラズマ）中での電位構造形成と壁と SOL/ダイバータプラズマの連結に関する研究：PICシミュレーション。

(C) SOL/ダイバータプラズマ：コアプラズマと境界層プラズマに繋がる領域でのプラズマ粒子、不純物粒子の輸送に関する研究：流体シミュレーション。

これらの相互関係を図 2.1.2.3-9 に示す。

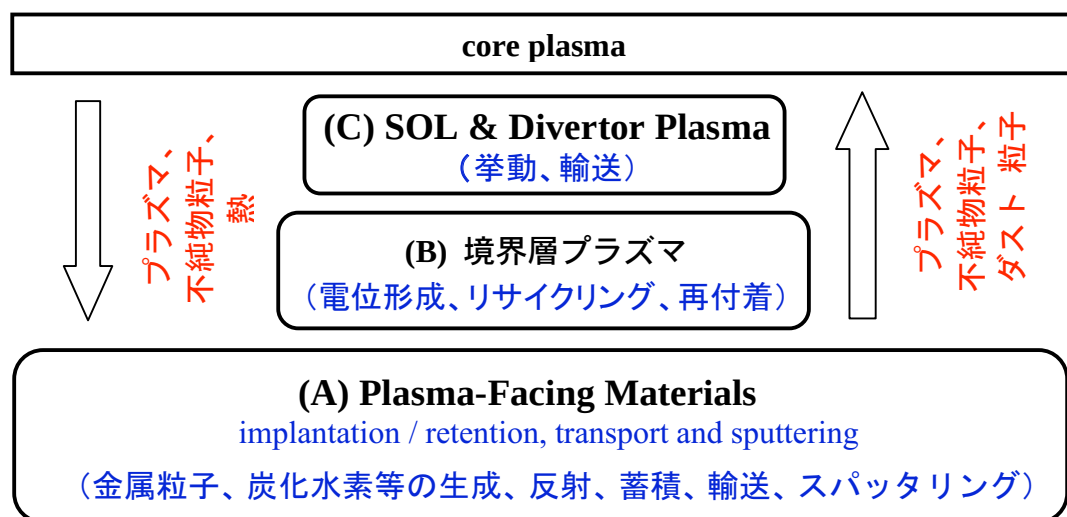


図 2.1.2.3-9 今後の研究計画の概略図

(A) 壁材料中および表面

この領域では、分子動力学やモンテカルロ法によって、金属壁（炭素、タングステン等）への入射粒子（プラズマ、不純物）の粒子束、エネルギー束、入射角度等による反射、材料中への蓄積、スパッタリング等を求める研究を行う。これまでに、大宅（徳島大）によって、プラズマ対向壁表面での動的イオン・固体相互作用コードにプラズマ中の不純物輸送を追加したコード(EDDY)が開発されている。また、A.Kirschner（独ユーリッヒ研究機構）によって、世界的に評価の高い不純物輸送コード'E R O'が開発されている。今後、これら両コードの比較検討を行い、今後得られる核燃焼プラズマの新たなデータを追加すると同時に「境界層プラズマ」との境界条件の整合化に進む。

[加藤太、富田（核融合研）、大宅（徳島大）、A.Kirschner（独ユーリッヒ研究機構）、小野（岡山理科大）、剣持（吉備国際大）]

この領域に於ける具体的な研究テーマを以下に挙げる。

- ・スパッタリング等のプラズマ壁相互作用(PWI)を評価できる古典的分子運動論(classical MD)シミュレーションコードの開発と粒子入射条件に対するスケーリング則の確立
[大宅（徳島大）]
- ・第一原理分子動力学(ab initio MD)による2体ポテンシャルモデルを用いた古典的分子運動論(classical MD)シミュレーションコードの有効性の確認および不純物の付着係数を求める [加藤太（核融合研）]
- ・モンテカルロコードによる壁内の水素、ヘリウムの挙動解析と壁からの離脱率を求める
[小野（岡山理科大）、剣持（吉備国際大）]
- ・不純物生成、輸送コードの整備と境界層プラズマへの連結
[大宅（徳島大）、A.Kirschner（独ユーリッヒ研究機構）、富田（核融合研）]

(B) SOL/ダイバータプラズマと壁との間の境界層プラズマ

この領域は、SOL/ダイバータプラズマと壁とを連結する領域であり、核燃焼プラズマのために多種イオン（重水素、三重水素、ヘリウム）の存在する系でのシース安定条件や壁への粒子束、エネルギー束をPICシミュレーションによって求める。そこでは壁の粗さ（フラクタル構造）を考慮に入れる。これまでに、単一種イオンによる斜め磁場が入射する平板壁前面での電位形成や壁への入射束は理論およびシミュレーション共同研究を通じて求められてきた [8]。今後は核燃焼プラズマを目標にして、これまでの成果を多イオン成分プラズマへ拡張させる。そこでは、研究領域（A）で得られた壁から生成される各種粒子の粒子束、エネルギー等と SOL/ダイバータとの境界での物理量を境界条件としてPICシミュレーションによって領域内の電位、プラズマ物理量を自己無撞着に求める。

[富田（核融合研）、D. Tskhakaya（インスブルック大）、河村（京大）]

この具体的な研究方法を以下に述べる。

1) 第一段階で SOL/ダイバータ境界（磁気プレシース入口）で物理量（プラズマ密度、温度、粒子束等）を境界条件として、シース中での粒子加速、減速を考慮して、P I Cシミュレーションによって壁上でのプラズマの速度分布を求める。

2) 求められた速度分布から壁に入射する粒子密度とエネルギーを計算して、領域（A）で得られている壁からの各種粒子（2次電子、プラズマ粒子、不純物粒子）の反射率、放出率を求める。

3) 壁から放出された各種粒子を取り込んで再度P I Cシミュレーションを行って電位構造、壁上でのプラズマの速度分布を求めて、壁からの各種粒子放出率を計算する。

4) 以上の過程を繰り返して、SOL/ダイバータ境界（磁気プレシース入口）で物理量（プラズマ密度、温度、粒子束等）に対して、境界層プラズマから SOL/ダイバータ境界へ放出される各種粒子の密度、流速等を求める。これらは SOL/ダイバータ輸送コードの境界条件となる。

(C) SOL ダイバータプラズマ

この領域では3次元周辺プラズマ解析コード（EMC3）を用いてコアプラズマと境界層プラズマとの整合性の取れた研究をおこなう。具体的には以下の研究テーマが挙げられる。

- ・境界層プラズマとの整合性

- [小林、富田（核融合研）、滝塚（原子力機構）]

- ・壁付近から SOL 領域に至る不純物の振る舞いに対する運動論効果の考察

- [小林（核融合研）、清水、川島（原子力機構）、畑山（慶応大）]

- ・壁付近から SOL 領域に至る中性粒子や不純物の振る舞いを評価できるモンテカルロ (MC) シミュレーションコードの開発（小林（核融合研）、清水（原子力機構））

- ・3次元コアプラズマ解析コードとの整合性の取れた接続 [小林、中島、佐藤（核融合研）]

参考文献

[1] Y. Tomita, R. Smirnov, and S. Zhu: "Stationary Potential Formation and Oscillations in Plasma with Immovable Dust Particles", Plasma Science and Technology, Vol. 7, No. 1 (2005) pp.2657 - 2659

[2] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya: "Gravitational Effect on Release Conditions of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", Contributions to Plasma Physics, Vol. 46, No. 7-9 (2006) pp. 617-622.

[3] Y. Tomita, R. Smirnov, S. Zhu: "Induced Charge of Spherical Dust Particle on Plasma-Facing Wall in Non-uniform Electric field", Plasma Science and Technology, Vol.8, No.1, (2006) pp. 122-124.

[4] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya: "Charging of spherical dust particle on plasma-facing wall", J. of Plasma Physics, Vol.72, Part 6 (2006) pp. 1015 - 1018.

- [5] Y. Tomita, R. Smirnov, H. Nakamura, S. Zhu, T. Takizuka, D. Tskhakaya, " *Effect of Truncation of Electron Velocity Distribution on Release of Dust Particle from Plasma-Facing Wall*", Journal of Nuclear Materials, Vol. 363-365 (2007) pp. 264-269.
- [6] R. Smirnov, Y. Tomita, T. Takizuka, A. Takayama, Yu. Chutov, "Particle Simulation Study of Dust Particle Dynamics in Sheaths", Contributions to Plasma Physics, vol. 44, no. 1-3 (2004) pp. 150 - 156.
- [7] R. Smirnov, Y. Tomita, D. Tskhakaya, T. Takizuka, "Two-Dimensional Simulation Study on Charging of Dust Particle on Plasma-Facing Wall", Contributions to Plasma Physics, Vol. 46, No. 7-9 (2006) pp. 623-627.
- [8] D. Tskhakaya, S. Kuhn and Y. Tomita, "Formulation of boundary conditions for unmagnetised multi-ion plasma sheath", Contributions to Plasma Physics, Vol. 46, No. 7-9 (2006) pp. 649-654.

2.1.3 階層統合シミュレーション

LHD 実験において予定されている DD 実験や ITER 実験に先行して磁場配位、及び外部加熱入力や外部粒子供給等の最適化を評価でき、実験シナリオが策定できる水準の予測性を持つシミュレーションコードの開発においては、様々な外的要因の元での巨視的実験観測の全時間的振る舞いを迅速に解析・予測することに重点が置かれるため、外的要因に対する様々な階層でのプラズマ応答が比較的単純な理論モデルで統合された拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションコードが適している。このため、国内外の大学等との共同研究を基本として、京都大学で開発された 2 次元環状磁場配位統合シミュレーションコード TASK を 3 次元環状磁場配位に拡張した TASK3D を階層統合シミュレーションのコアコードとして開発している。

階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等として階層統合シミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションコード TASK3D の予測精度の向上を図り、最終的には、磁場閉じ込め核融合炉システムにおける核融合プラズマの外部要因に対する応答を予測できる階層統合シミュレーションコードとして「LHD 数値試験炉」を目指す方針である。

2.1.3.1 3 次元環状磁場配位における拡散輸送方程式の定式化（中島）

2 次元環状磁場配位と 3 次元環状磁場配位とにおける拡散輸送モデルの大きな違いは、メトリックを与える平衡が 2 次元平衡であるか 3 次元平衡であるかという問題ではなく、3 次元環状磁場配位においては真空中で磁気面及び回転変換が存在すること、及び新古典輸送が径電場依存性を有する点にある。そこで、様々な仮定やオーダリングの導入が導出された時間発展方程式の適用範囲等にどのような影響を与えるかを明確にする形式で、一般的な環状系磁場配位に対して回転変換及び径電場の時間発展方程式を再定式化した。回転変換の時間発展方程式の導出においては、まず、磁気面の存在だけを仮定して定式化を行い、次に磁気面上を電流が流れる（電流が流れている面と磁気面が一致する）と仮定して式の変形を行い、最後に、MHD 平衡の式が成立しているとして更なる式の変形を行った。又、径電場の時間発展方程式の導出においては、導出に用いられる仮定やオーダリングを明示し、他の拡散輸送方程式と矛盾を生じないかどうかに注意した。

2.1.3.1 a) 回転変換時間発展方程式の導出

輸送現象は、MHD 平衡形成の時間スケールと比較して、非常に緩やかな現象として記述される。従って、原理的には、輸送の時間スケールでは、MHD 平衡は瞬時瞬時に成立しているとして定式化され得る。すなわち、輸送時間スケールにおけるプラズマの変化とは、瞬時瞬時に構築される磁気座標系 (ρ, θ, ζ) における磁気面上の断熱不変量（磁気面量）である、密度 n_a 、圧力 p_a 、トロイダル磁束 Φ_T 及びポロイダル磁束 Φ_P の時間変化として捉えることができる。しかしながら、上記の考えに忠実に従うと、輸送方程式（時間発展非線形偏微分方程式系）と MHD 平衡（定常非線形偏微分方程式系）は、同時に解かれなければならない。実際 2 次元磁場配位では、Grad-Shafranov 方程式の時間変化を解く手法も考えられているようである。しかしながら、

輸送方程式の立場から見ると、MHD 平衡は幾何的情報を確定する手段であり、輸送量の時間発展中、MHD 平衡の幾何配位が大きく変わらなければ、これを固定して輸送量の時間発展を解くことが望まれる。それ故、なるべく MHD 平衡の性質を直接的に使用しないで輸送方程式系を構築する手順が取られる。以下では、輸送方程式系の構築に必要とされる条件を順次示し、どのように条件が強められてゆくかを回転変換の時間発展方程式の定式化を通して考察する。

磁気面存在の仮定 ($\mathbf{B} \cdot \nabla \rho = 0$)

磁気面の存在を仮定し、磁気面のラベル ρ 、トロイダル磁束 Φ_T 、及びポロイダル磁束 Φ_P が磁気面の運動に沿って変化しないこととマックスウェルの電磁誘導則より、

$$\left. \frac{\partial I}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} = \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \left. \frac{\partial I}{\partial \rho} \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} + \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \rho} \langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{E} \rangle \right\}$$

を得る。更に、非誘導電流を J_s として、 $\langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{E} \rangle = \eta_{\parallel} \langle \mathbf{B} \cdot (\mathbf{J} - \mathbf{J}_s) \rangle = \eta_{\parallel} [\langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J} \rangle - \langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J}_s \rangle]$ より、

$$\left. \frac{\partial I}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} = \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \left. \frac{\partial I}{\partial \rho} \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} + \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \rho} \eta_{\parallel} [\langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J} \rangle - \langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J}_s \rangle] \right\}$$

となる。従って、磁力線方向電流及び非誘導電流の磁力線方向成分の磁気面平均が回転変換の関数として求められれば、回転変換に関する時間発展方程式が得られる。

電流面が磁気面と一致するという仮定 ($\mathbf{J} \cdot \nabla \rho = 0$)

更に、電流面が磁気面と一致するという仮定を導入すると、ポロイダル電流 I_P 、トロイダル電流 I_T を用いて、 $\langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J} \rangle V' = I_P^2 [I_T / I_P]'$ が成立する (ここでプライムは ρ に関する微分である)。

Boozer 座標系のように磁力線が直線で表現される磁気座標 (ρ, θ, ζ) に対して、サセプタンス行列 S_{ij} を用いて、電流と磁束を関連づけると以下ようになる：

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_P' \\ \Phi_T' \end{bmatrix}, \quad S_{11} = \frac{V'}{4\pi^2} \left\langle \frac{g_{\theta\theta}}{g} \right\rangle, \quad S_{12} = S_{21} = \frac{V'}{4\pi^2} \left\langle \frac{g_{\theta\zeta}}{g} \right\rangle, \quad S_{22} = \frac{V'}{4\pi^2} \left\langle \frac{g_{\zeta\zeta}}{g} \right\rangle$$

磁力線が直線でみえる座標系では、サセプタンス行列は対称行列となる。更に、軸対称トカマクにおいては、磁気座標のトロイダル角を幾何座標のそれと取ることにより、サセプタンス行列は対角行列となる。ヘリカル系のように対称性のない一般的な環状系磁場配位においては真空磁気面が存在するが、その影響は、サセプタンス行列の非対角項として現れる。注意すべきは、サセプタンス行列の要素はあたかも電流と磁束の比例係数のように現れてはいるが、実際には、電流及び磁束の汎関数となっている点である。サセプタンス行列を用いて回転変換の時間発展方程式を表現すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial I}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} &= \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \left. \frac{\partial I}{\partial \rho} \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} \\ &+ \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \eta_{\parallel} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right] (S_{21} I + S_{22})^2 \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\frac{S_{11} I + S_{12}}{S_{21} I + S_{22}} \right] - \eta_{\parallel} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \rho} \langle \mathbf{B} \cdot \mathbf{J}_s \rangle \right\} \end{aligned}$$

軸対称系の場合、通常この発展方程式が回転変換の拡散輸送方程式として使用される。3 次元系

と 2 次元系の大きな違いは、3 次元系の場合真空磁場の存在により方程式が回転変換に関して線形でない点である。この性質のため、標準的に用いられる数値解法が適応しにくいいため、平衡の関係式を仮定した場合を更に考察する。

平衡の関係式を仮定 ($J \times B = \nabla P$)

上記の考察に対して、更に平衡の関係式が成立すると仮定して発展方程式を変形する。平衡の関係式が成立すると仮定すると、 $\langle B \cdot J \rangle = \langle B^2 \rangle I'_T / \Phi'_T + P I'_T / \Phi'_T$ が成立するため、回転変換の時間発展方程式は

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial}{\partial t} \right|_{\rho=\text{const}} &= \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right] \bigg|_{\rho=\text{const}} \\ &+ \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^{-1} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \eta_{\parallel} \left[\frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \right]^2 \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \rho} \left\{ \langle B^2 \rangle \frac{\partial}{\partial \rho} [(S_{11}t + S_{12})\Phi'_T] + \frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \frac{\partial P}{\partial \rho} (S_{11}t + S_{12}) - \frac{\partial \Phi_T}{\partial \rho} \langle B \cdot J_s \rangle \right\} \right\} \end{aligned}$$

となる。現時点では、平衡の関係式を用いた時間発展方程式を採用しているが、今後、数値解法を陰解法に変更することにより、平衡の関係式を用いない時間発展方程式を採用する。

2.1.3.1 b) 径電場時間発展方程式の導出

3 次元トーラス磁場配位における径電場の時間発展方程式を導出する。2 次元トーラス磁場配位への適用は、オーダリングの範囲内で可能と考えられるが、トロイダル方向へ高速の回転を持つような場合には、適用できないと考えられる。時間微分を多重時間スケールで展開し、径電場の時間発展を、密度や温度の時間発展（輸送オーダリング：新古典輸送で引き起こされる遅い時間スケール）よりも速い現象として取り扱っているため、径電場の時間発展を輸送方程式に取り入れる場合、通常の輸送方程式の時間刻みよりも細かい時間スケールで径電場の発展を解き、その結果を輸送に戻す必要がある。逆に、通常の輸送方程式の時間刻みで輸送方程式を解く場合には、径電場の発展方程式の定常解を常に用いればよいと考えられる。径電場の大きさは、ドリフトオーダリングを採用し、準中性条件を前提としている。以下では、電子と一種類のイオンとからなる単純プラズマ（サフィックス $a=e,i$ で表示）に、高速粒子（サフィックス f で表示）及び外部運動量源（損失）（ S で表示）が存在する場合を考える。イオンのラーマ半径を ρ 、小半径方向の温度又は密度勾配長を L として、展開パラメータ $\varepsilon \equiv \rho/L$ で時間微分及び物理量を展開し、径電場の時間発展方程式を導出する。時間や物理量に付いている数字のサフィックスは、各オーダーを示す。この時、磁気面を横切る電流は、濱田座標系で表示すると（ $\sqrt{g_H}$ は濱田座標のヤコビアン）、

$$\langle J_2 \cdot \nabla \psi \rangle = \sum_{a=e,i} m_a n_{a0} \frac{\sqrt{g_H}}{l} \frac{\partial \langle B_T \cdot u_{a1} \rangle}{\partial \tau_0} + \frac{\sqrt{g_H}}{l} \left\{ \sum_{a=e,i} \langle B_T \cdot \nabla \cdot \Pi_{a1} \rangle - \sum_{a=e,i} \langle B_T \cdot S_{a1} \rangle \right\} + e_f \langle n_{f1} u_{f1} \cdot \nabla \psi \rangle$$

となる。 B_T はトロイダル磁場成分である。右辺第 1 項は分極電流成分、第 2 項は、トロイダル粘性による粒子束、第 3 項及び第 4 項は、それぞれ、外部運動量源、及び高速粒子の影響を示す。1 次の流れが磁気面内の非圧縮流であること、及び磁力線方向運動方程式の磁気面平均の 1 次のオーダーを利用して変形すると、

$$\begin{aligned} \langle J_2 \cdot \nabla \psi \rangle = & \sum_{a=e,i} m_a n_{a0} \left\{ \left\langle \frac{|\nabla \psi|^2}{B^2} \right\rangle + \left\langle \left(\frac{g_2}{B} \right)^2 \right\rangle - \frac{\langle g_2 \rangle^2}{\langle B^2 \rangle} \right\} \frac{\partial}{\partial \tau_0} \frac{d\Phi_0}{d\psi} - \frac{J\sqrt{g_H}}{l(J+l)} \left\{ \sum_{a=e,i} \langle B \cdot \nabla \cdot \Pi_{a1} \rangle - \sum_{a=e,i} \langle B \cdot S_{a1} \rangle \right\} \\ & + \frac{\sqrt{g_H}}{l} \left\{ \sum_{a=e,i} \langle B_T \cdot \nabla \cdot \Pi_{a1} \rangle - \sum_{a=e,i} \langle B_T \cdot S_{a1} \rangle \right\} + e_f \langle n_{f1} u_{f1} \cdot \nabla \psi \rangle \end{aligned}$$

となる（ Φ_0 は0次の静電ポテンシャル）。ここで、関数 g_2 は、磁気微分方程式

$$B \cdot \nabla \left(\frac{g_2}{B^2} \right) = B \times \nabla \psi \cdot \nabla \left(\frac{1}{B^2} \right)$$

の解として求められる。2 次の磁気面を世区切る電流の表式を、同一のオーダリングで求められるマックスウェル方程式

$$\varepsilon_0 \left\langle |\nabla \psi|^2 \right\rangle \frac{\partial}{\partial \tau_0} \frac{d\Phi_0}{d\psi} = \langle J_2 \cdot \nabla \psi \rangle$$

へ代入することにより（ ε_0 は真空誘電率）、最終的な径電場の時間発展方程式を得る：

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \left\langle |\nabla \psi|^2 \right\rangle \frac{\partial}{\partial \tau_0} \frac{d\Phi_0}{d\psi} = \sum_{a=e,i} \langle B_X \cdot \nabla \cdot \Pi_{a1} \rangle - \sum_{a=e,i} \langle B_X \cdot S_{a1} \rangle + e_f \langle n_{f1} u_{f1} \cdot \nabla \psi \rangle$$

ここで、真空誘電率 ε_r 及び磁場 B_X は次式で定義される：

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{c^2}{\langle |\nabla \psi|^2 \rangle} \left\{ \left\langle \frac{|\nabla \psi|^2}{v_A^2} \right\rangle + \left\langle \left(\frac{g_2}{v_A} \right)^2 \right\rangle - \frac{\langle g_2 \rangle^2}{\langle v_A^2 \rangle} \right\}, \quad B_X = \frac{\nabla \psi \times B}{B^2} + \left[\frac{g_2}{B^2} - \frac{\langle g_2 \rangle}{\langle B^2 \rangle} \right] B$$

真空誘電率 ε_r の第1項は真空からの寄与、第2項は、ジャイロ運動に基づく古典的分極電流の寄与、第3及び4項は、新古典的分極電流の寄与を示す。外部源（損失）や高速イオンが存在しない場合の定常状態は、両極性条件

$$\sum_{a=e,i} \langle B_X \cdot \nabla \cdot \Pi_{a1} \rangle = 0$$

で与えられ、ヘリカル系の場合には、主として対称性の破れから生じる電子とイオンの $1/v$ リップル拡散粒子束のバランスの結果として径電場が決定される。

数値的に径電場の時間発展方程式を解く場合には、磁気面を横切る電流（粒子束）の評価の仕方に依じて注意が必要である。各粒子種のダイナミクスをモンテカルロ法等で解かないで、準定常を仮定して磁気面を横切る粒子束を求める場合には、前述のようにモーメント法の範囲内で古典的及び新古典的分極電流の効果を評価して比誘電率に含めておく必要がある。しかし、例えばモンテカルロ法等でイオンのダイナミクスを解く場合には、イオンの新古典分極電流の効果はモンテカルロ法の計算に中に取り込まれているので、イオンに対しては、古典的分極電流の効果のみを取り出す必要がある。電子の分極電流の効果はイオンに対して無視できるので、比誘電率を単純に古典的分極電流の効果のみで置き換えればよい。

上記の導出では、陽に示さなかったが、トレースレスの圧力項 Π_{a1} には、磁力線に垂直方向のジャイロ回旋から生じる成分が含まれており、この項を正確に評価することにより、径電場の磁気面方向の拡散項を評価できる可能性がある。多重解の選択問題も含めて、今後考察の予定である。

2.1.3.2 TASK3Dの開発状況（佐藤）

京都大学で開発された軸対称環状系に対する統合輸送コード TASK（福山：京都大学）の 3 次元拡張版である TASK3D の現在の開発状況は、1 次元拡散型輸送モジュール TR 関連部分をヘリカル系プラズマへと拡張するため、2.1.3.1 の定式化に基づき回転変換時間発展モジュール EI、径電場時間発展モジュール ER を開発し、1 次元拡散型輸送モジュール TR への組み込みを進めているところである。径電場時間発展モジュールの開発にあたっては、非軸対称系プラズマに対する新古典輸送モデル DCOM/NNW の導入も行っている。この節では、採用する理論モデルの妥当性、及び数値計算の正当性を考慮したこれらモジュールの開発状況、及びその計算例を示していく。

2.1.3.2.a) 回転変換時間発展モジュールの開発

2.1.3.1 a) における MHD 平衡を仮定した回転変換時間発展方程式に基づいて、回転変換時間発展モジュールの開発と TASK3D への組み込みを進めている。現段階では、回転変換時間発展モジュールを TASK3D へ組み込む前段階として、回転変換時間発展モジュールの数値計算手法の正当性の検証（動作確認）を行うため、回転変換時間発展モジュール EI、3 次元 MHD 平衡モジュール VMEC、及び非誘導新古典電流モジュール BSC/FIT とを組み合わせた部分的統合シミュレーションを行ってきた。このシミュレーションでは、回転変換時間発展モジュール EI で用いる時間の刻み幅よりも十分長い時間間隔で、3 次元 MHD 平衡モジュール VMEC による MHD 平衡の再計算を行っている。回転変換時間発展における全電流値、及び MHD 平衡計算における密度・温度は LHD 実験結果の時間発展データを用いている。[1,2]

初期に開発された回転変換時間発展モジュールにおいては、規格化されたトロイダル磁束の平方根を座標として用い、半整数格子状において離散化を行った。この回転変換時間発展モジュールを用いて電流分布の時間発展のシミュレーションを行ったところ、計算で得られた非誘導電流の分布が、プラズマ周辺近くにおいて大きく負となる非物理的な現象が現れ、信頼できる計算結果を得ることができなかった。これは離散点として半整数格子を用いると、境界条件を直接的に与えることができず、境界条件を与えるために補間を用いなければならないことが原因と考えられた。そこで、離散点を半整数格子から境界条件を直接的に与えられる整数格子に変更すると共に、座標を 3 次元平衡モジュール VMEC 同様、規格化されたトロイダル磁束へと変更し、磁気軸近傍での取り扱いを改良した。これにより、初期のバージョンでみられたプラズマ周辺の負の非誘導電流という非物理的な現象は現れなくなり、物理的な計算結果が得られるようになった（中村：京都大学、渡邊）。

この改良された回転変換モジュールを用いて、LHD 実験プラズマに対する電流分布の時間発展解析を行い、電気伝導度のモデルに対する依存性を調べることを行った。図 2.1.3.2-1 において(A)と(B)は Spitzer 電気伝導度を、(C)と(D)は新古典電気伝導度を用いた計算結果を示している。ここで、非誘導電流 $\langle \mathbf{j} \cdot \mathbf{B} \rangle_{\text{NI}}$ は、BSC/FIT モジュールにより、全電流 $\langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} \rangle$ は、回転変換時間発展モジュールにより評価されている。この計算では、回転変換の時間変化と矛盾しないように 0.1 秒ごとに MHD 平衡とそれに伴う非誘導電流分布の変化を計算し直している。このケースでは、Spitzer 電気伝導度は新古典電気伝導度と比べるとプラズマ中心で同程度、周辺では 5 倍程度大き

いため、Spitzer 電気伝導度も用いると磁場の抵抗性拡散が遅くなり、電流分布ならびに回転変換分布の時間変化は遅く評価されてしまう。したがって、以降の計算では新古典電気伝導度を用いることとした（中村：京都大学、渡邊）。

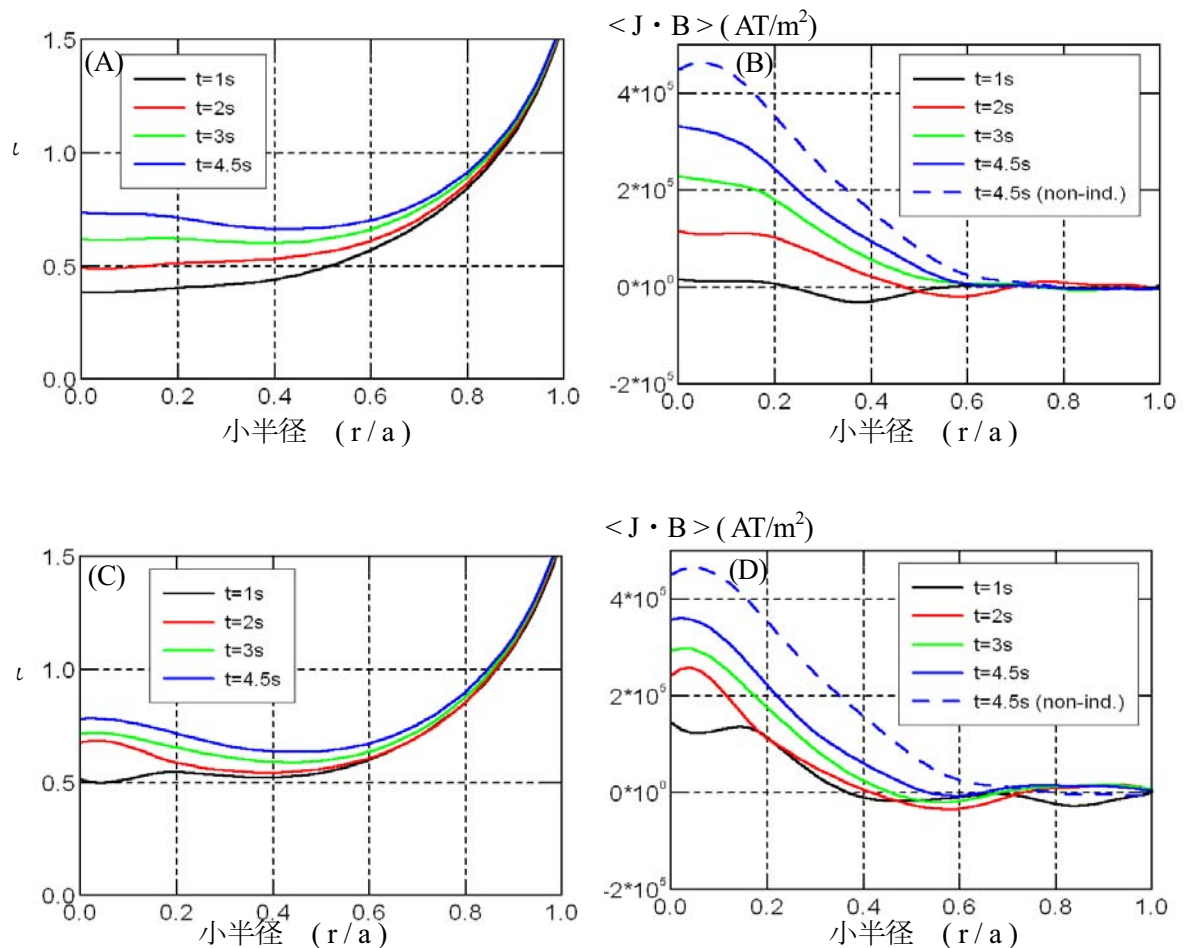


図 2.1.3.2-1. LHD プラズマの電流分布の時間発展に対する電気伝導率のモデル依存性。
(A)と(B)はスピッツァー電気伝導度を用いたときの回転変換分布と電流分布を、(C)と
(D)は新古典電気伝導度を用いたときの回転変換分布と電流分布の時間発展を示してい
る。(B)と(D)の電流分布の図においては、 $t=4.5$ 秒のときでの非誘導電流の分布（破線）
も一緒に示している。

輸送現象の時間スケールにおいては、輸送による密度及び温度の変化に伴い MHD 平衡も変化するため、MHD 平衡の時間変化の影響を適切に輸送シミュレーションに反映させなければならない。LHD のようなシャフラノフシフトが大きいヘリカル系においては、MHD 平衡の再計算の時間間隔が長すぎると、シャフラノフシフトによる計量の変化が正しく輸送方程式に反映されず、物理的に信頼性のある結果を得ることができない。他方、3 次元 MHD 平衡計算は計算コストが

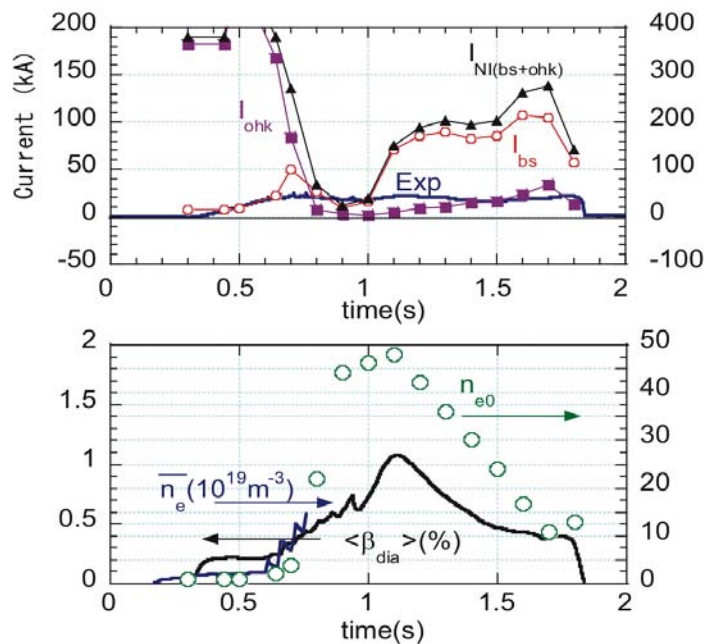


図 2.1.3.2-2 上図：観測電流値（実線）、計算非誘導電流（大河電流 I_{ohk} 、ブートストラップ電流 I_{bs} ）の時間変化。下図：計測密度、ベータ値の時間変化。

高いため、できる限り MHD 平衡の再計算の回数を減らすことが望まれる。そこで、回転変換時間発展の MHD 平衡再計算の時間間隔依存性に対する検討を行った。図 2.1.3.2-2 は、低温高密度の SDC (Super Dense Core) の実験結果の一例である。全電流の観測値は、せいぜい 20kA 程度であるが、密度及び温度の観測時刻（図の中心密度の測定時刻）の MHD 平衡を用いて評価した非誘導電流（大河電流 I_{ohk} 、ブートストラップ電流 I_{bs} ）は、実験値とかけ離れて大きい。つまり誘導電流（オーミック電流）が非誘導電流同様主要な役割を果たしていることが分かる。改良版回転変換時間発展モジュール EI、3 次元 MHD 平衡モジュール VMEC、及び新古典電流モジュール BSC/FIT を組み合わせた部分的統合シミュレーションを用いて図 2.1.3.2-2 に対応する回転変換時間発展の解析を行い、MHD 平衡再計算の時間間隔の回転変換時間発展に対する影響を評価した。図 2.1.3.2-3 は平衡の再計算を 100ms おきに行ったものと 10ms おきに行った場合における回転変換分布と電流分布の時間発展を示したものである。ただし、10ms おきに平衡計算を行う場合では、全電流値は 10ms おきに異なる値を用いているが、密度分布、温度分布は、100ms 区間では固定して MHD 平衡を計算している。この結果を比較すると両者ともほぼ同一の計算結果が得られ、適切な時間間隔が取られていることがわかる。今後は、密度、温度に対しても 10ms ごとに異なる値を用いた場合の計算を行い、回転変換時間発展の MHD 平衡再計算の時間間隔依存性に対する更なる検討を進めていく（中村、渡邊、佐藤）。

高いため、できる限り MHD 平衡の再計算の回数を減らすことが望まれる。そこで、回転変換時間発展の MHD 平衡再計算の時間間隔依存性に対する検討を行った。図 2.1.3.2-2 は、低温高密度の SDC (Super Dense Core) の実験結果の一例である。全電流の観測値は、せいぜい 20kA 程度であるが、密度及び温度の観測時刻（図の中心密度の測定時刻）の MHD 平衡を用いて評価した非誘導電流（大河電流 I_{ohk} 、ブートストラップ電流 I_{bs} ）は、実験値とかけ離れて大きい。つまり誘導電流（オーミック電流）が非誘導電流同様主要な役割を果たしていることが分かる。改良版回転変換時間発展モジュール

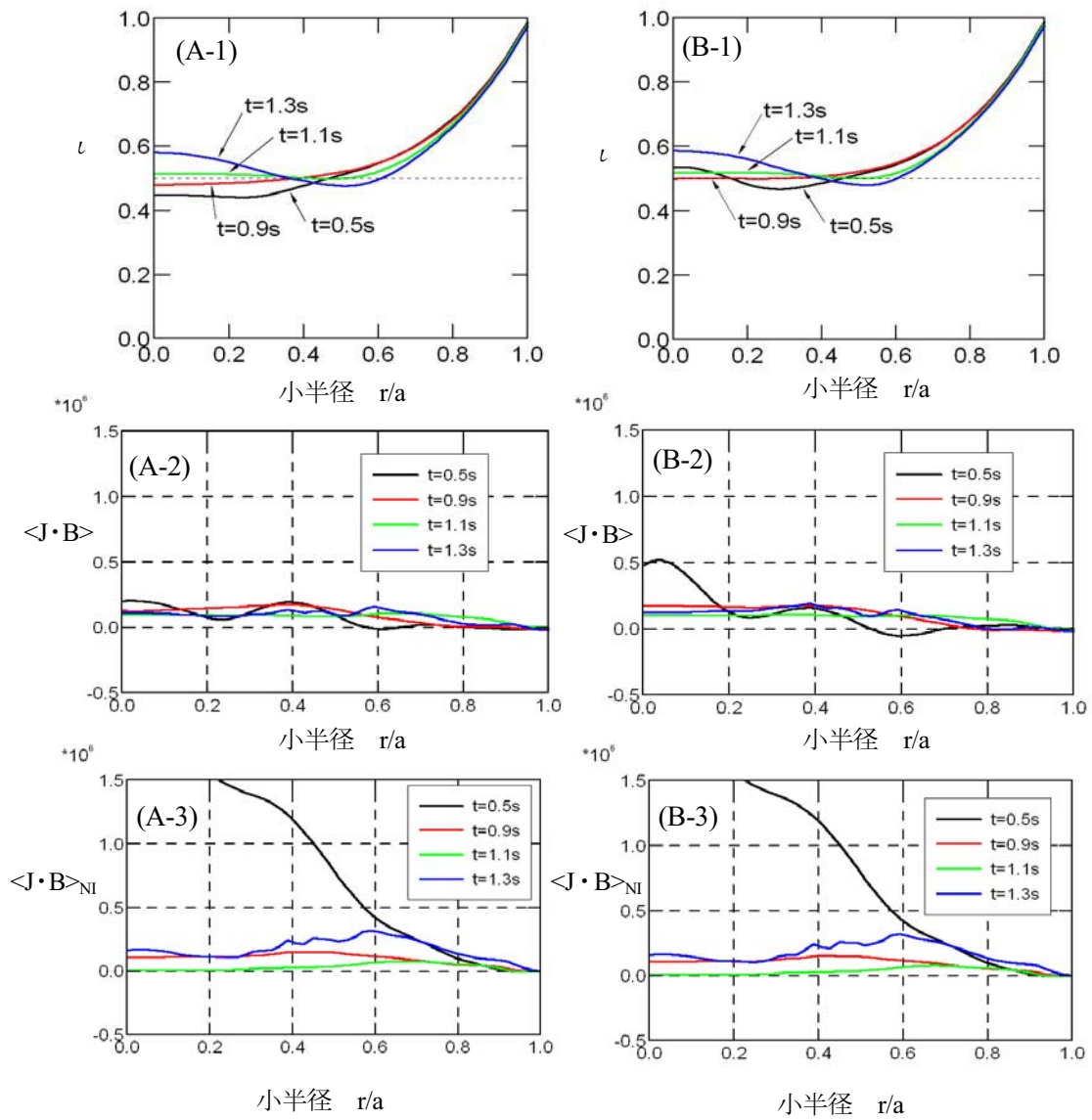


図 2.1.3.2-3 MHD 平衡再計算の時間間隔に対する計算結果の依存性。平衡を 100ms 間隔で計算したときの(A-1)回転変換分布、(A-2)全電流分布、(A-3)非誘導電流分布の時間発展の様子。(B-1)～(B-3)は MHD 平衡を 10ms 間隔で計算した場合の計算結果を示している。

2.1.3.2 b) 径電場モジュールを用いた計算例

ヘリカル系プラズマにおいては、非軸対称性より両極性条件が自動的に満たされず、径電場が新古典的閉じ込めに大きな影響を持つことがトカマクのような軸対象系プラズマとは大きく異なる点の一つである。従って、TASK の 1 次元拡散型輸送モジュール TR に径電場の効果を適切に含め、かつ、非軸対称性の効果を含めた新古典輸送モデルに基づく径電場時間発展モジュール ER の追加を行う必要がある。この径電場時間発展モジュール ER の組み込み、および、非軸対称系プラズマでの新古典輸送モデルの導入は、核融合科学研究所大型ヘリカル研究部理論・データ解析研究系（登田）の協力のもとで行われている。現段階の TASK3D では、使用されている理論モデルの妥当性と数値計算手法の正当性（動作確認）を検討するため、径電場の時間スケールは十分早いとして、径電場の時間発展方程式の定常状態を考えて得られる両極性条件により径電場を決定するモジュールを開発し、ファイル形式 Ufile に変換された LHD 実験データの読み込みに対応させ（福山：京都大学）、1 次元拡散型輸送モジュール TR への組み込みを行った。以下で示す両極性条件

径電場モジュール ER を用いた計算結果では、初期分布として Ufile 形式の実験データを用いているが、密度、回転変換などの温度以外の変数に対しては時間変化させずに固定し、電子温度、イオン温度、及び径電場の時間発展をシミュレーションにより求めている（Ufile 実験データ提供：舟場）。図 2.1.3.2-4 は、このシミュレーションの初期分布として用いた LHD 実験データの電子の密度と温度分布である。この実験では、NBI による加熱が定常的に行われており、時刻 1.01 秒の時点で電子温度はすでに定常状態になっているが、

電子密度はまだ上昇の段階にあり、時刻が 2.01 秒で電子密度も定常状態に落ち着く。まず、この定常状態に落ち着いた $t=2.01$ における実験データの分布を初期値としてシミュレーションを行った。その際、イオン温度の初期分布は電子温度と等しいと仮定し、更に、非軸対称系プラズマにおける新古典輸送モデルとして Shaing により導かれた単一ヘリシティモデル [3]を用いた。また、異常輸送係数は空間、時間ともに一定とし、 $\chi^{\text{an}}=0.6 \text{ (m}^2/\text{s)}$ と仮定した。初期値と定常状態に落ち着いた時の電子温度、イオン温度分布、および、径電場分布は図 2.1.3.2-5 に示されている。よく知られているように、両極性条件より径電場を求める際には、衝突周波数の領域によっては多重解が表れるため、その解の選択が必要となる。図 2.1.3.2-5 で示している計算結果では、多重解が表れた場合にはイオンルートである負の径電場を優先的に選択するようにして得られたものであ

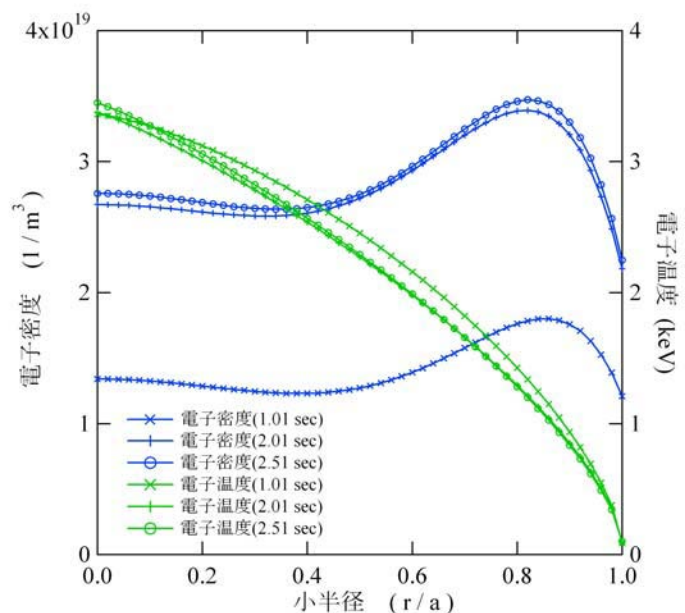


図 2.1.3.2-4. 径電場モジュールを用いたシミュレーションで用いた LHD 実験により得られた電子温度と電子密度分布。

る。図 2.1.3.2-5 においては、径電場の新古典輸送への影響をみるために、径電場を強制的に 0 にしている場合の計算結果についても示してある。径電場が存在する方が定常状態の温度が高く、イオン温度の方にその影響が大きいことがわかる。

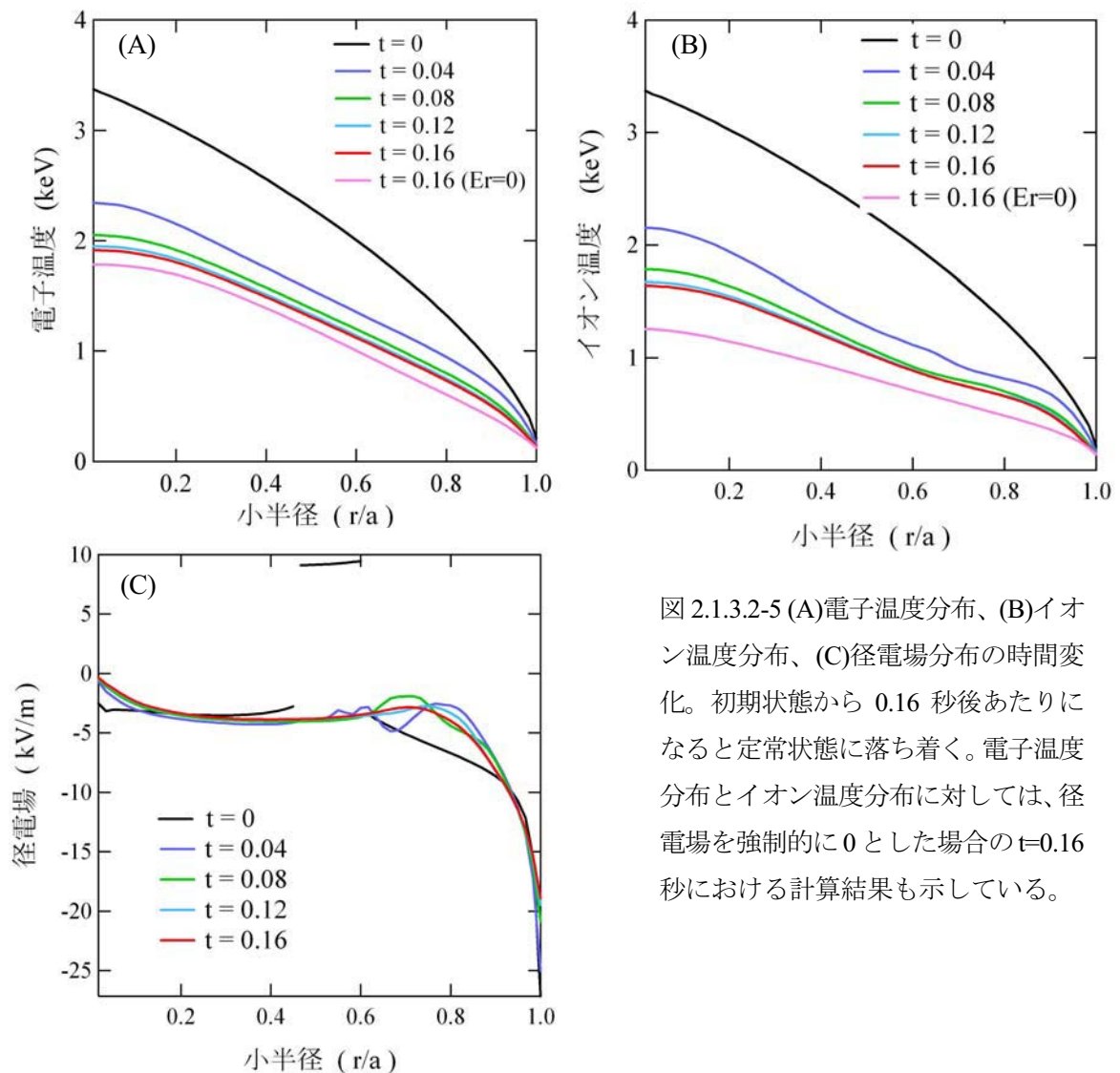


図 2.1.3.2-5 (A)電子温度分布、(B)イオン温度分布、(C)径電場分布の時間変化。初期状態から 0.16 秒後あたりになると定常状態に落ち着く。電子温度分布とイオン温度分布に対しては、径電場を強制的に 0 とした場合の $t=0.16$ 秒における計算結果も示している。

多重解が存在する場合に解の選択が定常解にどのような影響を与えるかを考察するため、イオンルートである負の径電場、又は電子ルートである正の径電場を、各々優先的に選択して、定常解に対する影響を考察した。初期条件として図 2.1.3.2-4 で示されている時刻 2.01 秒の実験結果を用いる場合には、イオンルートである負の径電場を選択する場合も電子ルートである正の径電場を選択する場合も、定常状態においては両者の結果は一致した。これに対して、初期分布として図 2.1.3.2-4 で示されている時刻 1.01 秒における実験データを用いた場合においては、図 2.1.3.2-6 で示されるようにルートの選択によって定常状態が異なる結果が得られた。

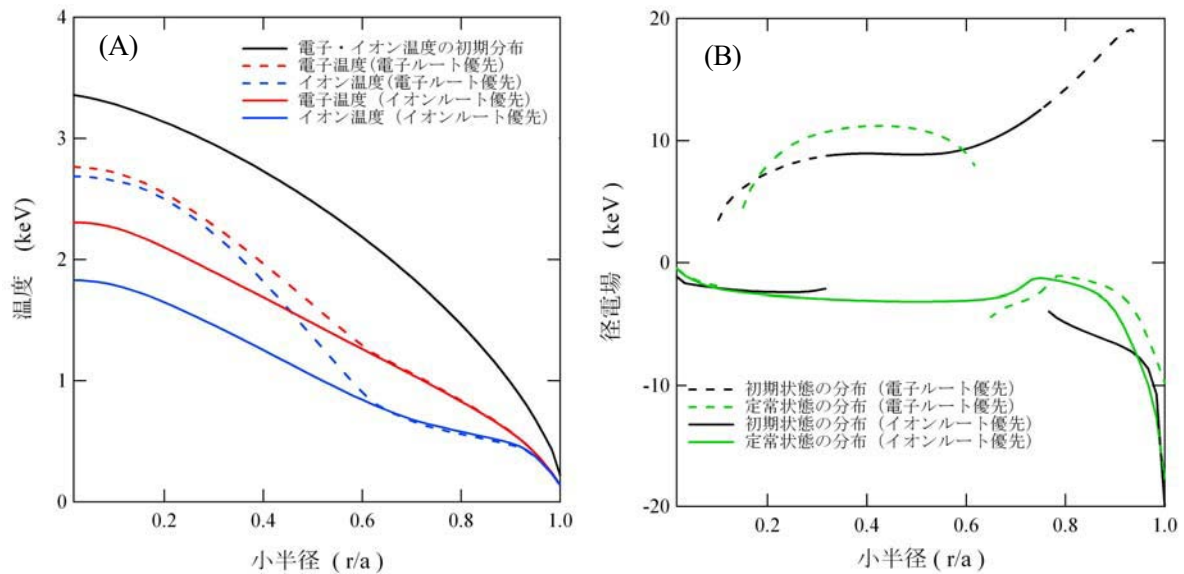


図 2.1.3.2-6. 図 2.1.3.2-4 の時刻 $t=1.01$ を低密度を初期値とする場合の、定常解のルート選択依存性。破線は電子ルートを優先的に選択し、実線はイオンルートを優先的に選択して得られた(A)電子、イオン温度と(B)径電場分布を示している。黒色の線は初期分布。

図 2.1.3.2-6 で用いた図 2.1.3.2-4 の $t=1.01$ 秒での密度は、図 2.1.3.2-5 で用いた $t=2.01$ 秒での密度よりも低いいため、衝突周波数が小さく電子ルートである正の径電場が表れやすい。その結果、定常状態においても正の径電場が残る定常解が得られている。低密度では、 $r < 0.6 a$ で正の径電場が表れており、この領域内ではイオンルートを優先的に選択した場合と比較して温度が高くなっている。このように、両極性条件により径電場を決定する場合には、解（ルート）の選択が重要となる場合がある。径電場の拡散も考慮した時間発展方程式により径電場を決定することにより、時間発展段階での解の選択性の問題は回避できるが、初期状態における径電場の選択によりその後の径電場の発展が影響を受ける可能性があり、予測性を持つ階層統合シミュレーションコードの構築においては、多重解の選択問題に対する径電場時間発展モデルの妥当性を検討して行く必要がある。

単一ヘリシティを仮定することにより、Shaing は解析的に新古典輸送を評価している。しかしながら実際には、ヘリカル系プラズマの平衡磁場強度は多重ヘリシティからなっており、径電場時間発展、及び温度時間発展を考察する際、この多重ヘリシテ

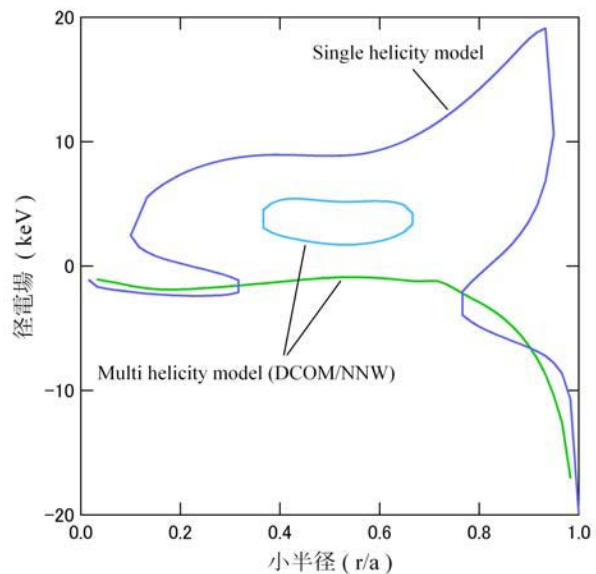


図 2.1.3.2-7 径電場径方向分布の多重ヘリシティ (DCOM/NNW) と単一ヘリシティ (Shaing) モデルの比較。

イの効果を取り入れたより精密な新古典輸送係数を求める必要がある。このために、実際的な LHD 実験に対応する新古典拡散整数を評価できる TDCOM/NNW モジュール[4]の TASK3D への組み込みを進めている。DCOM ではクーロン衝突下での粒子軌道を追跡するモンテカルロ法により単一エネルギー粒子に対する拡散係数を求める。DCOM/NNW においては、あらかじめ多くのパラメータに対してモンテカルロ法を用いた計算を行ってデータベースを構築し、ニュートラルネットワークによる非線形補間を用いることで、磁場配位、温度、密度等の入力パラメータに対して、エネルギー積分された新古典輸送係数を素早く計算できる(村上: 京都大学)。DCOM/NNW の多重ヘリシティモデルにより得られる計算結果と Shaing の単一ヘリシティモデルにより得られた計算結果の比較を図 2.1.3.2-7 に示す。図 2.1.3.2-7 では図 2.1.3.2-6 で用いられた低密度初期状態での径電場分布の比較を行ったものである。ここでは多重解が現れた場合には不安定根についても示されている。ここで用いた磁場配位、温度、密度条件では、正の径電場の大きさは大きく異なるものの、負の径電場の値はほぼ一致する結果となっている。単一ヘリシティモデルと同様に、電子ルートを優先的に選択した場合と、イオンルートを優先的に選択した場合に対して、DCOM/NNW を用いた計算結果を図 2.1.3.2-8 に示す。LHD のようにシャフラノフシフトが大きい装置では、ほとんどの場合多重ヘリシティを考慮した DCOM/NNW の使用が必須であるが、この場合においても、多重解の選択制の問題は不可避であり、実験観測結果との比較により、解の選択制に関する理論モデルを構築する必要がある。

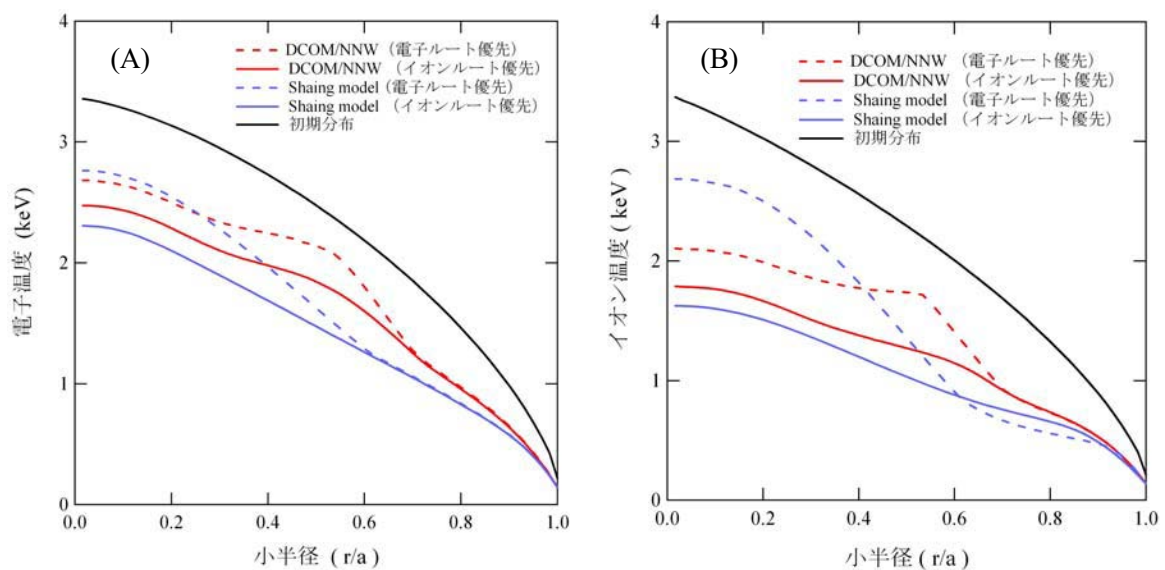


図 2.1.3.2-8 多重ヘリシティモデル (赤) と単一ヘリシティモデル (青) の比較。(A)は電子温度、(B)はイオン温度の分布を示している。

京都大学、及び LHD 研究部との共同研究を主体として、階層統合シミュレーションコード TASK3D の開発を精力的に進めている。階層統合シミュレーションコード TASK3D は、LHD で

予定されている DD 実験の先行シミュレーションや、SDC プラズマを炉へと外挿するヘリカル型数値試験炉研究における基幹コードでもあり、コードに採用されている理論モデルの妥当性、及び数値計算手法の正当性を検証しつつ、着実に進展させることが必須と考えられる。このため、特に平成 20 年度及び 21 年度においては、

1. 実験結果との比較による回転変換時間発展モジュール EI の物理モデルの妥当性、及び数値計算手法の正当性に対する更なる検証(Validity & Verification)
2. 実験結果との比較による両極性条件及び径電場時間発展モジュール ER の物理モデルの妥当性、及び数値計算手法の正当性に対する更なる検証(Validity & Verification)、特に、多重解選択問題に対する指針の確定
3. 外部粒子加熱モジュール (HFREYA、MCNBI、FIT) の導入 (導入のための f95 化が進行中)
4. 外部波動加熱モジュールの精度向上
5. 外部粒子供給モジュール、特に、ペレットの精度向上
6. ユーザーインターフェースの整備
7. D-D 反応関連の整備

が計画されている。これらの発展を通して、第一世代階層統合シミュレーションコード TASK3D を平成 21 年度内には完成し、共同研究者や LHD 実験解析への利用者に配布する。LHD 実験結果との比較を様々なモジュールに対して行い、コードに使用されている理論モデルの妥当性、及び数値計算手法の正当性を段階的に検証し、第二世代へ向けた改良を行う。第二世代階層統合シミュレーションコードにおいては、階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データベース、モジュールとして繰り込む（繰り込みモデル）。特に、コア流体モデルからは過渡応答ダイナミクスをモジュールとして、コア運動論モデルからは乱流輸送係数を数値データベースとして、更に周辺モデルからは PWI 等も考慮した SOL 領域の情報を境界条件として、第二世代階層統合シミュレーションコードへと繰り込む予定である。

参考文献

- [1] Y. Nakamura et al., Fusion Sci. and Tech. 50 (2006) pp.457-463.
- [2] Y. Nakamura et al., Proc. of 21th IAEA Fusion Energy Conf.(Chengdu, China, 2006) IAEA-CN-149/TH/P7-1.
- [3] K. C. Shaing, Phys. Fluids 27 (1984) 1567.
- [4] A. Wakasa et al., Jan. J. Appl. Phys. 46 (2007) 1157.

2.1.4 ロードマップ

国内外の大学等との共同研究を元に、実験及び理論と連携しつつ、外部制御下での巨視的な実験観測量の全時間応答の解析を基本とし実験シナリオ策定に適した拡散輸送モデルに基づく階層統合シミュレーションを用いたアプローチと、複合物理過程の階層間相互作用における基本物理過程の探求に適した階層拡張シミュレーションを用いたアプローチの両者を段階的に推進しつつ、階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等として階層統合シ

ミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションの予測精度の向上を図り、最終的には、磁場閉じ込め核融合炉システムにおける核融合プラズマの外部要因に対する応答を予測できる階層統合シミュレーションコードとして「LHD 数値試験炉」を目指す方針で、ロードマップは作成されている。

階層統合シミュレーションのロードマップ

磁場閉じ込め階層統合シミュレーションコード；TASK/3D を段階的に開発する。その際、階層拡張シミュレーションで得られた複合物理過程間の階層間相互作用の知見を、理論モデル、数値データ、モジュールとして取り込む繰り込みモデルを段階的に開発し、予測精度の向上を図る。

第1段階（平成18年～平成23年）

第1世代磁場閉じ込め階層統合シミュレーションコード；TASK/3D の基幹部分の開発：

- 3次元磁場配位における回転変換及び径電場の時間発展の再定式化とモジュールの導入
- 時間発展ソルバーの改良（Newton-Klyrov-Schur 法等のインプリシット法への置換）
- 径電場の時間発展のための3次元新古典輸送モジュール（輸送係数データベースのニューラルネットワーク）の導入
- 改良型粒子加熱（NBI）モジュールの導入
- 波動加熱（ECH、ICH）モジュールの改良
- 中性粒子モジュールの導入
- 不純物モジュールの導入
- D-D 核反応モデルの導入
- 粒子供給（Pellet、Gas puff）モジュールの改良
- 実験結果及び理論解析結果との比較によるモジュール群の開発・改良

第2段階（平成24年～平成29年）

階層拡張シミュレーションの知見

- 包括的コア流体モデル（過渡的ダイナミクス）
- イオン系及び電子系局所静電輸送係数
- SOL/Divertor 領域との境界条件

等を、理論モデル、データベース、モジュール等の形式で繰り込み、更に、実験計測及び制御モジュールを導入することにより、第2世代磁場閉じ込め階層統合シミュレーションコードを開発する。

第3段階（平成30年～）

階層拡張シミュレーションの知見

- 包括的コア流体モデル（過渡的及び連続的ダイナミクス）
- イオン・電子統合系局所電磁輸送係数
- SOL/Divertor 領域との境界条件の改良

を、理論モデル、データベース、モジュール等の形式で繰り込み、核融合エネルギー炉システムにおける外部要因に対する核融合プラズマの応答に適用できる水準に拡張することにより、第3世代磁場閉じ込め階層統合シミュレーションコード「LHD 数値試験炉」を目指す。

階層拡張シミュレーションのロードマップ

階層拡張シミュレーションは、配位空間内の巨視から微視に至る時空間スケールの様々な複合物理過程の階層間相互作用を研究対象とするコア流体モデル、ジャイロ運動論モデルに基づき微視的速度空間構造（揺動）の巨視的配位空間構造への影響を乱流輸送・構造形成等の観点から研究するコア運動論モデル、及び SOL から壁に至る周辺部領域での微視から巨視に至るスケールを有する複合物理過程の階層間相互作用を研究する周辺モデル、各々に対してロードマップが作成されている。

コア流体モデル

第1段階（平成18年～平成23年）

第1世代コア流体プラズマモデルとして、複合物理過程の無撞着な階層間相互作用を研究するための様々な拡張モデル

- MHD と高エネルギー粒子相互作用系への非摂動論的及び摂動論的拡張、
- MHD からイオン・電子二流体及び運動論効果を含むジャイロ流体等への拡張、
- 単相（気相）の MHD からペレット等を含む多相（プラズマ相・気相、液相、固相）への拡張

を更に発展させると共に、このための基盤技法開発として

- コンパクトスキームを用いた MHD 基盤コードの開発
 - 適合格子法を用いた流体コード開発
 - スペクトル法と Newton-Klyrov-Schur インプリシット法を併用した流体コード開発
- を発展させる。更に、これらの成果に基づく包括的コア流体モデルの構築を始める。

第2段階（平成24年～平成29年）

第1段階の成果にコア運動論プラズマモデルのクロージャー（完結問題）等の成果を取り込んだ包括的コア流体モデルを開発する。包括的コア流体プラズマモデルの中のイオン・電子二流体モジュール及び摂動論的 MHD 高エネルギー粒子相互作用モジュールを階層統合シミュレーションの拡散輸送モデルと連結し、過渡的ダイナミクスを含んだ階層統合シミュレーションへと発展させる。

第3段階（平成30年～）

包括的コア流体プラズマモデルにコア運動論プラズマモデルの成果を取り込みつつ、周辺プラズマ包括的モデルとの相互連結モデルの構築を目指す。更に、包括的コア流体プラズマモデルを階層統合シミュレーションの拡散輸送モデルと置き換え、MHD 時空間スケールのダイナミクスを含んだ階層統合シミュレーションを開発する。

コア運動論モデル

第1段階（平成18年～平成23年）

静電的イオン温度勾配（ITG）乱流や電子温度勾配（ETG）乱流の局所モデルを用いた異常輸送のジャイロ運動論的シミュレーション研究を一層発展させ、乱流輸送と帯状流の相互作用や、イオン熱輸送係数、電子熱輸送係数等の閉じ込め配位依存性を明確化するとともに、完

結問題（クロージャー）に対するモデルの構築を進展させる。イオンジャイロ半径スケールの乱流輸送に対し、捕捉電子効果や電磁揺動を取り入れたモデルの拡張を行うとともに、大域的な ITG 乱流モデルの開発を始める。

第2段階（平成24年～平成29年）

電磁乱流モデルの有限ベータプラズマへの適用を進めるとともに、輸送障壁等の構造形成の物理機構探求に向けて、イオンスケール乱流輸送の局所モデルを大域モデルへと拡張する。コア流体プラズマモデルへの繰り込みを目指したクロージャーモデルの開発を進める。イオン及び電子スケールの局所乱流輸送係数を階層統合シミュレーションへ繰り込むための整備を行う。

第3段階（平成30年～）

イオン・電子共存系へのモデルの拡張を目指して、包括的ジャイロ運動論的モデル（イオン・電子共存系電磁ジャイロ運動論モデル）への発展を図る。包括的ジャイロ運動論モデルに基づく微視的乱流輸送の理論・シミュレーション研究を、乱流輸送レベルの磁場配位依存性、輸送障壁等の構造形成、乱流輸送係数に関する理論／数値モデルの構築へと発展させる。

周辺モデル

SOL から壁に至る周辺部領域での微視から巨視に至るスケールを有する複合物理過程の相互作用を研究するための包括的シミュレーションコードを段階的に開発し、更に、コアプラズマの境界条件を設定するための相互連結モデルの構築を目指す。

第1段階（平成18年～平成23年）

- スパッタリング等のプラズマ壁相互作用（PWI）を評価できる古典的分子運動論（classical MD）シミュレーションコードの開発と粒子入射条件（粒子束、エネルギー束、入射角度等）に対するスケーリング則の確立（大宅（徳島大）、中村）
- 第一原理分子動力学（ab initio MD）による2体ポテンシャルモデルを用いた古典的分子運動論（classical MD）シミュレーションコードの有効性の確認（加藤太治）
- モンテカルロコードによる壁内の水素、ヘリウムの挙動解析と壁からの離脱（小野（岡山理科大）、剣持（岡山理科大））
- 壁からの不純物等の生成を考慮したプラズマの接する壁近傍での電位形成に関する自己無撞着モデルの構築：MD による PWI と粒子シミュレーションによるシース電位形成（富田）
- 粒子シミュレーションを用いた SOL 領域とシース領域の境界での整合性の取れた境界条件の確立（富田、小林、滝塚（原子力機構））
- 壁付近から SOL 領域に至る中性粒子の振る舞いを評価できるモンテカルロ（MC）シミュレーションコードの開発（小林、清水（原子力機構））
- 壁付近から SOL 領域に至るプラズマ・不純物の振る舞いを評価できる流体モデルシミュレーションコードの開発（小林、清水（原子力機構）、川島（原子力機構）、畑山（慶応大））
- 壁付近から SOL 領域に至るプラズマ・不純物の振る舞いに対する運動論効果の考察（小林、清水（原子力機構）、川島（原子力機構）、畑山（慶応大）、高山）

■ 階層統合シミュレーションコードに向けた各階層のモデル、スケーリング則の確立
第2段階（平成24年～平成29年）

- 壁付近から SOL 領域に至るプラズマ・不純物の振る舞いを評価できる粒子（PIC）シミュレーションコードの開発
- プラズマ壁相互作用（PWI）を評価できる分子運動論（MD）シミュレーションコード、壁付近から SOL 領域に至る中性粒子の振る舞いを評価できるモンテカルロ（MC）シミュレーションコード、更に、壁付近から SOL 領域に至るプラズマ・不純物の振る舞いを評価できる流体モデルシミュレーションコード及び粒子（PIC）シミュレーションコードを統合する周辺プラズマ包括的シミュレーションコードを開発する。
- 階層統合シミュレーションコードに向けた各階層のモデル、スケーリング則を改良し、階層統合シミュレーションコードにおける SOL/Divertor 領域との境界条件を与える。

第3段階（平成30年～）

- 周辺プラズマ包括的シミュレーションモデルと包括的コア流体モデル、及び包括的コア運動論モデルとの相互連結モデルの構築を目指す。

短期目標となる LHD-DD 実験の先行予測シミュレーションは、第1世代階層統合シミュレーションを基本として実行する。階層拡張シミュレーションで得られた知見は、

- 主要物理過程の時間依存性に着目した時間分割法に基づく時間的相互連結モデル
- 乱流輸送係数等の時空間のスケール分離に着目した粗視化モデル
- 主要物理過程の空間依存性に着目した領域分割法に基づく空間的相互連結モデル

等の数値的繰り込み手法を用いて、比較的単純化された繰り込みモデルからより高度な繰り込みモデルへと発展させながら、理論モデル、数値データ、モジュール等として階層統合シミュレーションへと段階的に繰り込み、最終的に、第3世代階層統合シミュレーションをベースに磁場閉じ込め核融合炉プラズマの振る舞いを予測できる「LHD 数値試験炉」を目指す。

ロードマップ

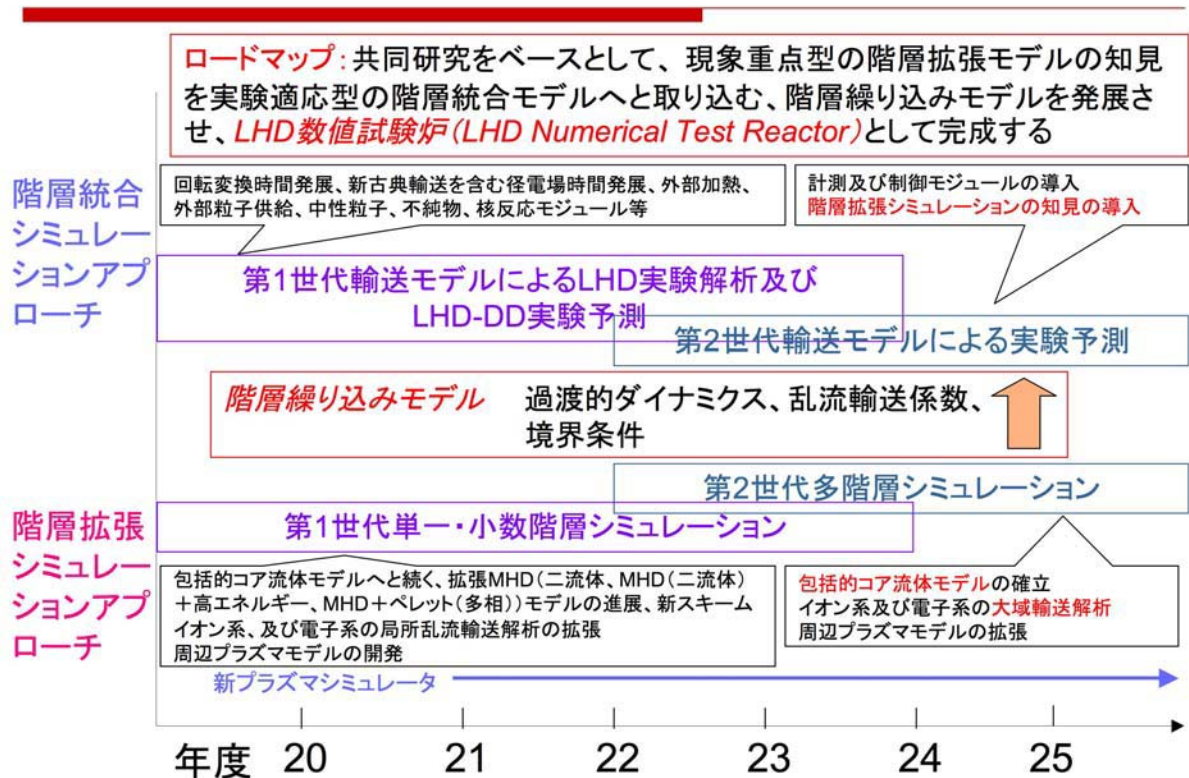


図 2.1.4-1 ロードマップ

2.2. レーザー核融合シミュレーションプロジェクト

世界的にレーザー核融合研究の進展は著しく、間接照射方式で自己点火を目指すための装置として米国の NIF(National Ignition Facility)や仏国の LMJ(Laser Mega Joule)の建設が精力的に進められている。NIF は、2009 年には装置が完成して予備実験が開始され、2010 年には自己点火の実証実験が始まる。一方、LMJ は、おおよそ NIF の 2-3 年遅れで計画が進んでいる。また、他の大型レーザー実験装置として、米国では直接照射方式の OMEGA EP がロチェスター大学で、中国では間接照射方式の ShenGuang III (神光 3 号) がレーザー核融合研究センター (綿陽) で建設されている。一方、我が国では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターが高速点火方式を用いた実験計画 FIREX (Fast Ignition Realization EXperiment) を提案している。FIREX は、点火温度への加熱を目的とする第 1 期計画と自己点火・燃焼を実証する第 2 期計画とから成る。本研究所の中期計画では、FIREX 第 1 期計画を新規開拓分野と位置づけ、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと連携協力して、第 1 期計画の遂行に必要な統合シミュレーションコードや実験設備を開発し、新たな診断技術確立することを目指している。また、平成 15 年 1 月 8 日に報告された科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合ワーキンググループの「今後の我が国の核融合研究の在り方について (報告)」にも、レーザー核融合に関する研究推進の重要性が記述された。この両者に応えるため、本研究部では、平成 17 年よりレーザー核融合プロジェクトとして、大阪大学、摂南大学、九州大学、兵庫県立大学と密接な共同研究の下、シミュレーション研究を開始した。本プロジェクトの目的は、大学共同利用機関の中核研究所として、我が国におけるレーザー核融合の研究開発をシミュレーションの観点から推進することである。以下に述べる本プロジェクトの研究成果は、密接な共同研究の賜物であり各研究項目が連携融合しているため、本研究部としての成果のみを個別に切り出すことは難しい。このため、総合的に成果を記述しているが、本研究部の果たした役割は、全体の 20%程度と考えてもらいたい。

2.2.1. 概略

従来の爆縮によりターゲット中心にホットスポットを生成して自然点火により核融合反応を引き起こす方式では、流体力学的不安定性による均一圧縮の阻害を避けるため、ターゲットそのものの球対称性およびドライバの均一照射性について強い制約があった。また、爆縮に多くのドライバエネルギーが費やされるため、点火に必要な最少のドライバエネルギーは数メガジュールと見積もられており、100 以上の大きな利得を得ることは難しいと考えられている。そこで、爆縮と点火をまったく別のステップで実現する高速点火の概念が考案されている[1]。高速点火とは、比較的長いパルスレーザーによって低温で高密度に圧縮されたターゲットに超高強度の短パルスレーザーを打ち込み加熱・点火を行う方式である。この方式では、従来のホットスポット自然点火方式よりも高利得が期待でき、点火に必要なドライバエネルギーも 1-100 キロジュールと見積もられている。この点火に必要なドライバエネルギーの低減は、現実的な核融合炉の設計を可能にし、核融合発電実現への近道を切り拓く可能性が高い。

しかし、高速点火方式を実証するためには、解明されていない数々の物理現象を明らかにしな

なければならない[2, 3]. なかでも, 超高強度レーザーから点火スポットへのエネルギー輸送がもつとも重要な課題である. 単純なモデルでは, 超高強度レーザーは光圧力によって低密度プラズマ中を掘り進み臨界密度近傍に到達し, レーザー・プラズマ相互作用により数 MeV の相対論的エネルギーを持つ高速電子を生成する. そして, その高速電子が高密度プラズマ中を伝播して, 点火領域でエネルギーを燃料に与え, それを加熱する. 高速電子による電流はアルフベンリミットを大きく超えるため, 背景電子による帰還電流を必要とする. このとき, 高速電子電流は, プラズマの抵抗率の影響を受けないが, 低速な帰還電子電流は, プラズマ抵抗率のため減衰する. 帰還電子の伝播が阻害されると電流中性を保てなくなるため, 大きな電場が生成されて高速電子の伝播も阻害される. このため, 高速電子の伝播は, 通常のプラズマ抵抗率ではない, いわゆる異常抵抗率を考慮に入れなければならない. また, 帰還電流によって生成される磁場は, この両者の電子流れに影響を与え, 小スケールのワイベル不安定性を併発する. この電氣的性質および磁場構造と電子運動の相互作用は極めて重要な問題点であり, ドライブエネルギーから点火燃料へのエネルギー変換効率に大きく影響する. 以上に述べた高速電子伝播の複雑さを避けるため, 加熱用超高強度レーザーによって生成された高速電子を爆縮された燃料中心に容易に導けるよう金 (Au) コーンを付加したターゲットを用いる方法が脚光を集めている. また, 超高強度レーザーが伝播する領域においては, 相対論的自己収束やパラメトリック不安定性が誘起され, 現象をいっそう複雑にする.

このように, 高速点火の研究においては, 相対論的領域での高密度プラズマとレーザーの相互作用が重要となるが, この領域で起こる物理現象は, 低強度レーザー・低密度プラズマで起こる物理現象とは根本的に異なり, 現象解明には新たな研究を必要としている. また, この現象は, 様々なスケールの異なる現象が相互に入り組んで絡み合った複雑現象であり, これを解明するためには大規模計算機シミュレーションによる研究が重要である. しかし, スケールが異なる複数の現象を単一のコードでシミュレーションすることは困難であり, 階層的に積み上げられた多数のコードを用いて, コード間で適宜データ交換しながら統合的にシミュレーションするシステムが必須となる. そこで, 大阪大学, 摂南大学, 九州大学, 兵庫県立大学, 名古屋大学と密接な共同研究の下, 放射・流体コード, 相対論的粒子コードおよびフォッカープランクコードを統合して高速点火をシミュレーションする Fast Ignition Integrated Interconnecting code (FI³) プロジェクト[4-6]を推進している.

2.2.2 FI³の推進

高速点火方式の中でも, ターゲットに金 (Au) コーンを付加して, 加熱用超高強度レーザーによって生成された高速電子を爆縮された燃料中心まで容易に導ける方式の実験が, 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターで進められている[7, 8]. この金コーン付きターゲットを用いた高速点火の物理を総合的に理解するためには, ミクロな現象とマクロな現象が相互に入り組んで絡み合った複雑現象を解明することが必要であり, 大規模計算機シミュレーションによる研究が重要だと考えられている. しかし, 空間・時間スケールが大きく異なる複数の現象を単一のコードでシミュレーションすることは非常に困難である. この場合, 超高強度レーザーとターゲットの相

相互作用の特性を明らかにするためには、空間、時間についてレーザーの波長や周期を捕らえることのできるオーダー、即ちサブミクロンの空間スケールかつフェムト秒の時間スケールでシミュレーションしなければならない。一方、相互作用の結果として発生する電子は高エネルギーなので、飛程が固体中でもミリメートルオーダーに達するため、数ミリメートルの空間スケールのシステムをナノ秒の時間に渡り追跡することが必要である。このため、原子分子レベルから第一原理に基づいて計算機シミュレーションをすることが不可能なほど研究対象のシステムは大きい。以上のことから、階層的に積み上げられた多数の計算機シミュレーションコードから成る統合されたシステムの構築が必須となる。この多階層化を具体的に金コーン付きターゲットによる高速点火に当てはめると、1) 爆縮用レーザーの吸収と爆縮による流体運動、2) 加熱用レーザーの吸収と高速電子の生成、3) 高速電子の伝播とそれによるコア加熱が考えられる。

まず、爆縮によるオーバーオールな流体運動は、ターゲットの空間スケールと形状が大きく変化することを考慮して ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)法を用いた放射・流体コード[9]を用いる。次の超高強度レーザーとプラズマの相互作用は、高密度プラズマ中の高速電子を運動論的に扱う必要があるため集合型粒子を導入した相対論的粒子コード[10]を用いる。最後の高速電子によるコア加熱については、衝突を精密に扱うためフォッカープランクコード[11]により計算する。以上述べた3つの独立したコードをデータ交換しながら協調動作をさせて統合的にシミュレーションできるシステムの構築を大阪大学、摂南大学、九州大学、兵庫県立大学と密接な共同研究の下、FI³プロジェクトとして推進している。各コードを独立としたことで開発や保守が容易になり、コード毎に計算方法や計算粒度に適したベクトル型計算機または並列計算機を適材適所で選ぶことが可能となる。粒子コードは一般にベクトル処理の効率が悪いので、大規模シミュレーションにはスカラ型超並列計算機が適している。一方、高効率なベクトル処理が可能な放射・流体コードとフォッカープランクコードは、ベクトル型並列計算機上で実行することが好ましいと考えられる。FI³プロジェクトにおいてコードが受け持つ計算領域の概念図を金コーン付ターゲットによる高速点火において生成されるプラズマの密度プロファイルと共に図 2.2.2-1 に示す。

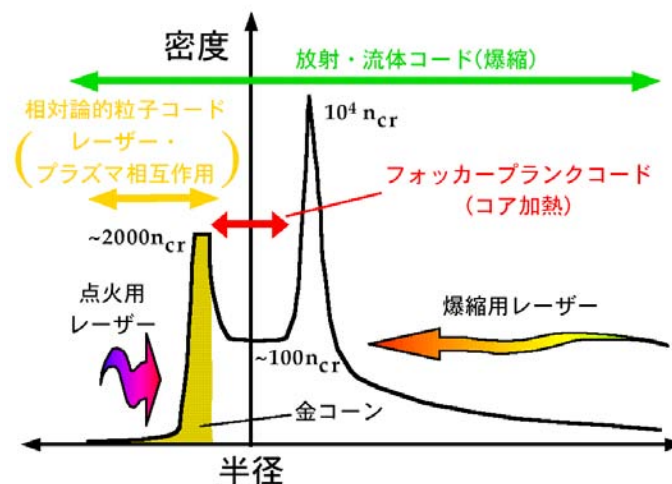


図 2.2.2-1：生成されるプラズマの密度プロファイルと各コードが担当する計算領域

また、協調動作の際に3つのコード間でやり取りすべきデータを結合ダイアグラムとして図

2.2.2-2 に示す．コードの実行時間スケールを考慮すると粒子コードおよびフォッカープランクコードのシミュレーション結果が放射・流体コードの実行状態に大きな影響は与えないと考えられるので，一方向にのみデータ交換するだけで十分だと考えている．つまり，放射・流体コードから粒子コードとフォッカープランクコードに爆縮過程で生成されるコーンプラズマと背景プラズマの密度プロファイルをそれぞれに渡す．そして，粒子コードを用いてレーザー・プラズマの相互作用をシミュレーションし，生成される高速電子の分布関数を一定時間毎にてフォッカープランクコードに渡す．

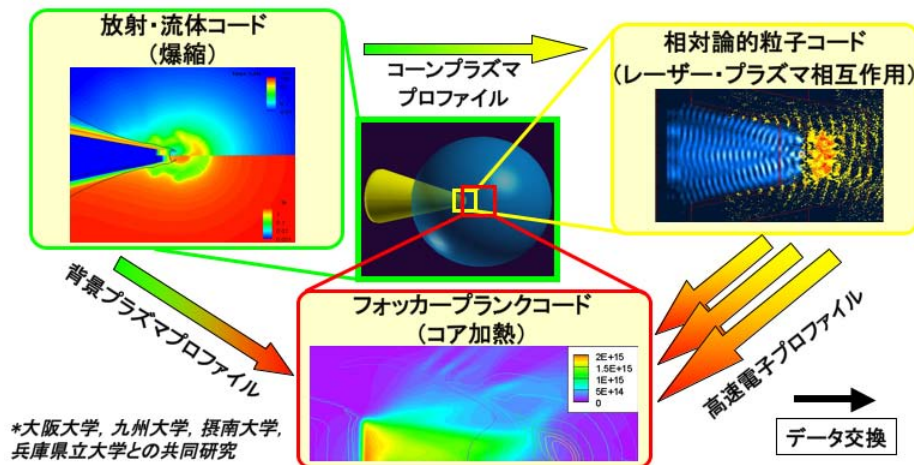


図 2.2.2-2：高速点火統合シミュレーションにおけるコード結合ダイアグラム

最初の FI³シミュレーションとして，加熱用レーザーを波長 1.06[μm]，半値全幅 300[fs]，強度 $10^{20}[\text{W}/\text{cm}^2]$ と設定して，ターゲットの爆縮，高速電子の生成，コア加熱を含む統合シミュレーションを行った．その結果として，密度が $50[\text{g}/\text{cm}^3]$ 以上の高密度コア部で平均したコア加熱率とイオン温度の時間発展を図 2.2.2-3 に赤線で示す．また，統合シミュレーションと比較するため，エネルギー1[MeV]，半値全幅 300[fs]，強度 $3 \times 10^{19}[\text{W}/\text{cm}^2]$ の単色エネルギーの電子ビームを仮定してコア加熱を計算した結果を図 2.2.2-3 に青線で示す．ここで，電子ビームの全エネルギーは，統合計算においてレーザー・プラズマ相互作用によって生成された高速電子の全エネルギーと同じになるように設定した．また，単色エネルギー電子ビーム強度が $3 \times 10^{19}[\text{W}/\text{cm}^2]$ であることから，統合シミュレーションにおいては，加熱用レーザーのエネルギーの 30%が高速電子のエネルギーに変換されたことを示している．図 2.2.2-3 より，単色エネルギーを仮定した電子ビームを用いた場合は，イオンが 0.6[keV]まで加熱されているが，統合シミュレーションの場合には，コア加熱率が単色エネルギー電子ビームに比べて 1/100 しかなく，コアのイオンはほとんど加熱されていないことがわかる．従来コア加熱を評価する場合，適当な単色エネルギーを持つ電子ビームを仮定することが多かったが，このような評価は，相対論的粒子コードからフォッカープランクコードに高速電子のプロファイルを渡し，実際的な条件下で行ったターゲットコアの加熱評価とはまったく異なることがわかった．以上のことから，高速点火を詳細にシミュレーションするためには，統合シミュレーションが極めて重要であり，本統合システムの必然性を強く示唆している[6]．

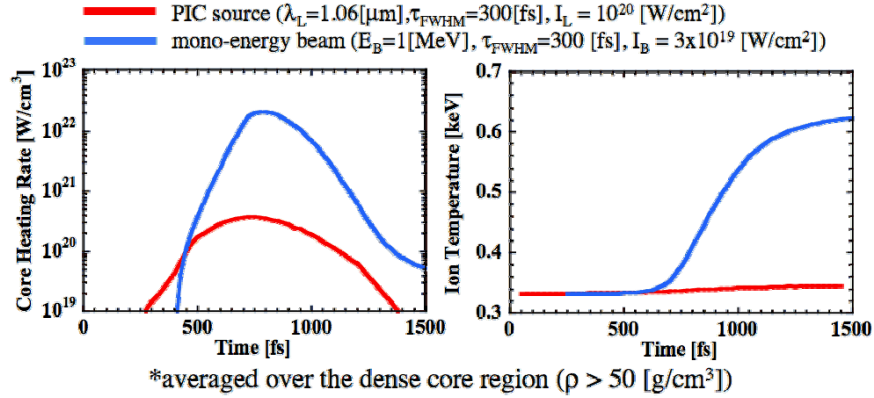


図 2.2.2-3：高密度コア部で平均したコア加熱率とイオン温度の時間発展

上に述べた FI³ 統合シミュレーションでコアイオンがほとんど加熱されなかったのは、生成される高速電子のエネルギーが高くて平均自由行程がコアサイズ以上であることが原因である。しかし、2002 年に大阪大学で行われた金コーン付ターゲットを用いた高速点火実験では、発生する核融合中性子の計測により、コアは 0.86[keV]まで加熱されたことが観測された[8]。このため、この統合シミュレーションに使ったモデルでは不十分であり、高速電子のエネルギーを緩和する新たなシミュレーションモデルを導入する必要がある。このモデルの一つとして、高速電子伝播に対するコーンプラズマとコーン裏面にあるコアプラズマの密度差による障壁の影響が考えられる。そこで、コーン裏面にあるコアプラズマとして異なった電子密度のプラズマを相対論的粒子コードに導入し、加熱用レーザーのパルス長を実験と同等の半値全幅 750[fs]として、統合シミュレーションを行った。プラズマ中に高速電子が入射すると、電流中性を保つように背景電子による帰還電流が形成される。背景電子の密度が入射する高速電子の密度と同程度になると、背景電子のドリフト速度は光速に近いオーダーとなる。このため、非常に強い二流体不安定性が生じ、背景電子は加熱されるとともに、帰還電流としての流れは阻害される。この結果、高速電子流は減速する方向、背景の帰還電流は加速する方向に強い静電場が生じ、高速電子の一部はコーン裏面プラズマ中に入射することができずコーン内に閉じ込められ、背景電子は高エネルギーに加速されてコーンに浸入し、コーン内部には高エネルギーの電子が充満する。この高エネルギー電子は、加熱用レーザー照射後に徐々に漏れ出し、コアを加熱する。統合シミュレーションにより、この効果は、背景電子密度が入射する高速電子密度と同程度になると顕著に現れることがわかった。図 2.2.2-4 にコーン裏面のコアプラズマ密度が 10n_c（この効果が大きい）と 100n_c（この効果が小さい）の場合について、加熱用レーザーがピーク時（1500[fs]）と照射後（3000[fs]）における高速電子によるコアの加熱率と密度分布を示す。図 2.2.2-4 より 10n_cの場合には、レーザー照射後もコアが引き続き加熱されていることがわかる。この時のコアイオン温度の時間発展を図 2.2.2-5 に示す。コーン部に閉じ込められた電子の遅延加熱により、コアのイオン温度は、10n_cの場合の方が 100n_cの場合より高温に加熱されることがわかった。以上のことから、高速点火における加熱の物理過程では、高速電子の輸送を解明することが重要であることが明らかになった[6, 12, 13]。

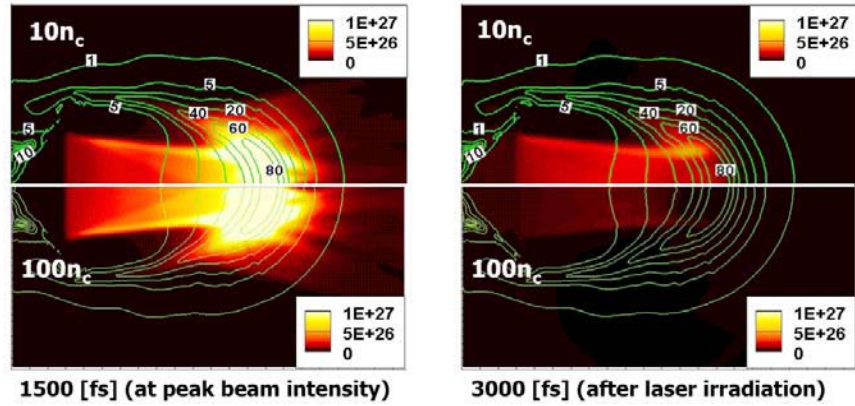


図 2.2.2-4：高速電子によるコア加熱率と電子密度

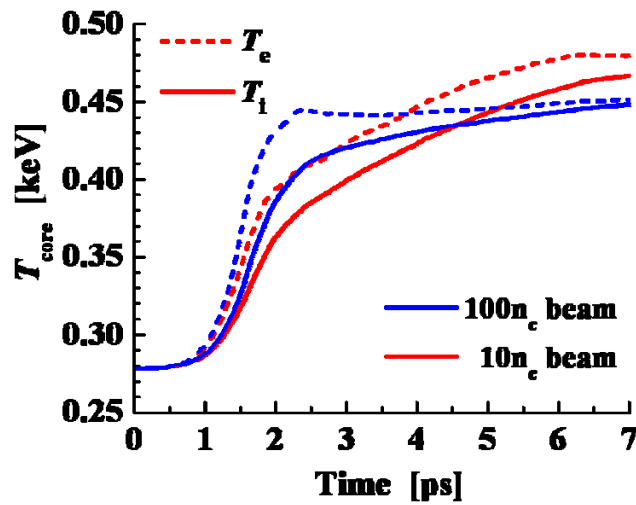


図 2.2.2-5：高密度コア部で平均したイオン温度の時間発展

コーンプラズマとコーン裏面プラズマの密度差による障壁を考慮することにより、コアのイオンは $0.47[\text{keV}]$ まで加熱されたが、実験で示された $0.86[\text{keV}]$ よりは、まだ低い。一方、高速点火実験を FI^3 統合シミュレーションで忠実に再現するために、加熱用レーザーのパルス長を実験と同程度の $750[\text{fs}]$ にしている。この結果、コーン内でスロッシングする比較的エネルギーの低い電子が、レーザー照射後も徐々に漏れ出してコアを加熱するため、 $\sim 6[\text{ps}]$ 程度までシミュレーションする必要があり、イオンのダイナミクスを無視できない。加熱用レーザーのメイン部は、実際にはフット部の照射によって生成されたプレプラズマと相互作用するが、このプレプラズマの密度プロファイルは、フット部の強度により大きく変わる。また、レーザーとプラズマの相互作用は、密度プロファイルにより大きな影響を受けるため、フット部の強度により生成される高速電子のエネルギー分布が変わることになる。更に、レーザーとプラズマが直接相互作用する領域においては、加熱用レーザーのポンドラモーティブ力によりプラズマの密度プロファイルが変化する。このため、レーザーの吸収過程そのものが大きな影響を受け、高速電子の生成は、イオンのダイナミクスにより、それを無視した場合と異なった振舞をする。そこで、異なったスケール長の密度プロファイルのプレプラズマを用いた一連の FI^3 統合シミュレーションにより、コア加熱

のプレプラズマのスケール長についての依存性を調べた。プレプラズマは平均電離度 50 の Au イオンとして扱っているが、加熱用レーザーの強度が $10^{20}[\text{W}/\text{cm}^2]$ と大きく、パルスの半値全幅も 750[fs] と十分長いため、ポンドラモーティブ力により押されて密度プロファイルが突っ立つ。この状態では、突っ立った場所においてレーザー圧力により全ての帰還電流電子が反射され、電子バンチの列も生成される。図 2.2.2-6 に固定イオンの場合とイオンのダイナミクスを考慮した場合について、電子位相空間と電子密度プロファイル（青線）およびレーザー電場（紫線）を示す。図 2.2.2-6 より、イオンのダイナミクスを考慮すると、レーザーとプラズマが直接相互作用する領域でプロファイルが突っ立ち、帰還電子が全反射されていることがよくわかる。フォッカープラランクコードに渡された高速電子エネルギーのスケール長依存性を図 2.2.2-7 に示す。スケール長が長くなると変換効率が良くなるため全エネルギーは増加するが、スケール長が 1.5[μm] で最大となり、それより長いスケール長では、やや低下する。しかし、1[MeV]以下の加熱に効率的なエネルギーを持つ高速電子は、1.5[μm]以上のスケール長で急激に少なくなり、コアにデポジットされるエネルギーも同様に減少することがわかった。

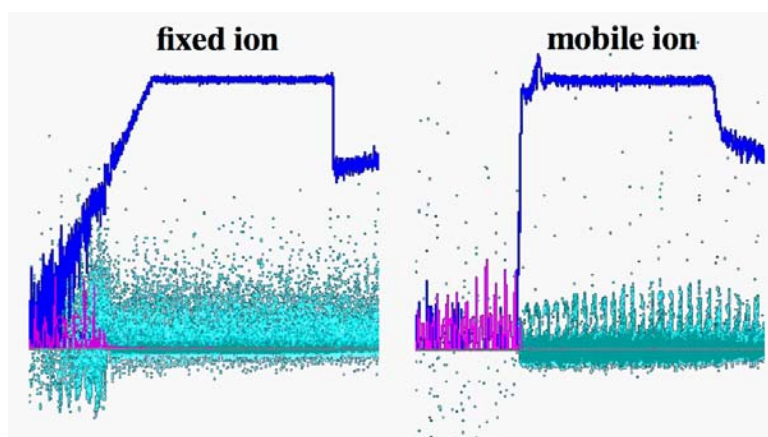


図 2.2.2-6：固定イオンの場合とイオンのダイナミクスを考慮した場合の電子位相空間と電子密度プロファイル（青線）およびレーザー電場（紫線）

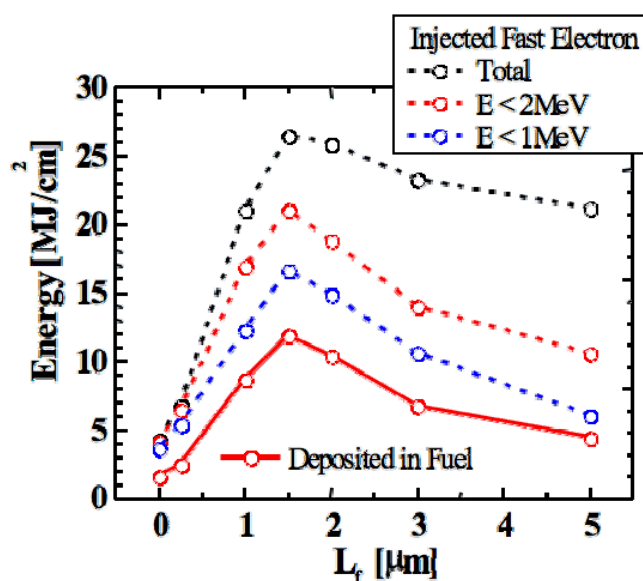


図 2.2.2-7：生成される高速電子エネルギーのスケール長依存性

スケール長がより短い場合は、コーン部に比較的低エネルギーの低い電子が閉じ込められやすく（スロッシング電子）、この電子がレーザー照射後も徐々に漏れ出してコアを加熱するので、加熱時間は長くなる。しかし、レーザーの吸収率そのものは小さくなり、発生する高速電子も少なく、コアの加熱効率は悪くなる。一方、スケール長がより長い場合は、レーザーの吸収率は大きくなるが、発生する電子のエネルギーが高いため、コア加熱への寄与は小さい。更に、密度プロファイルの突っ立ちが弱くなるためコア加熱に適したスロッシング電子が少なくなり、コアの加熱効率は悪くなる。このため、コア加熱に最適なスケール長が存在する。Fⁱ 統合シミュレーションにより評価した加熱されたコア温度のスケール長依存性を図 2.2.2-8 に示す。現行パラメータでは、プレプラズマのスケール長が 1.5[μm]のときに最適なコア加熱が得られ、コア部で 0.86[keV]と実験と同等な温度まで加熱が達成できた[14]。

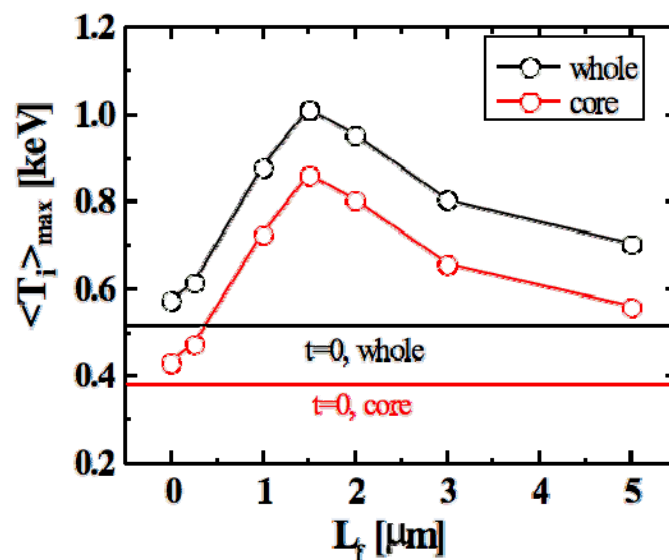


図 2.2.2-8：加熱されたコア温度のスケール長依存性

さて、2008 年に開始される高速点火実験 FIREX-I における爆縮の解析は、放射・流体コードによるシミュレーション研究が開始されている[15]。しかし、FIREX-I で用いられる加熱用レーザーのパルス長は 10[ps]程度に設計されているが、このようなロングパルスレーザーとプラズマの相互作用についての研究は皆無である。そこで、異なったスケール長の密度プロファイルのプレプラズマを用いた一連の粒子シミュレーションにより、ロングパルスにおける高速電子生成の様子を調べた。コーンプラズマは平均電離度 30、プレプラズマ付の最大密度 $500n_{cr}$ の Au イオンとして扱い、加熱用レーザーは強度 10^{20} [W/cm²]、立ち上がり／立ち下りの半値半幅 375[fs]、フラット部 10[ps]のパルスとした。パルス長が十分に長いため重い Au のプレプラズマであっても、ポンドラモーティブ力により完全にコーン部まで押し込まれ、密度プロファイルが突っ立つと共に最大密度も初期最大密度より大きくなる。同時にレーザー強度は一定であるにも関わらず、高速電子ビーム強度は低下する。これは、レーザーが密度勾配のまったくない超高密度プラズマと直接相互作用するためと考えられる。図 2.2.2-9 に高速電子ビーム強度とレーザー・プラズマ相互作用領域の電子密度の時間発展を示す。

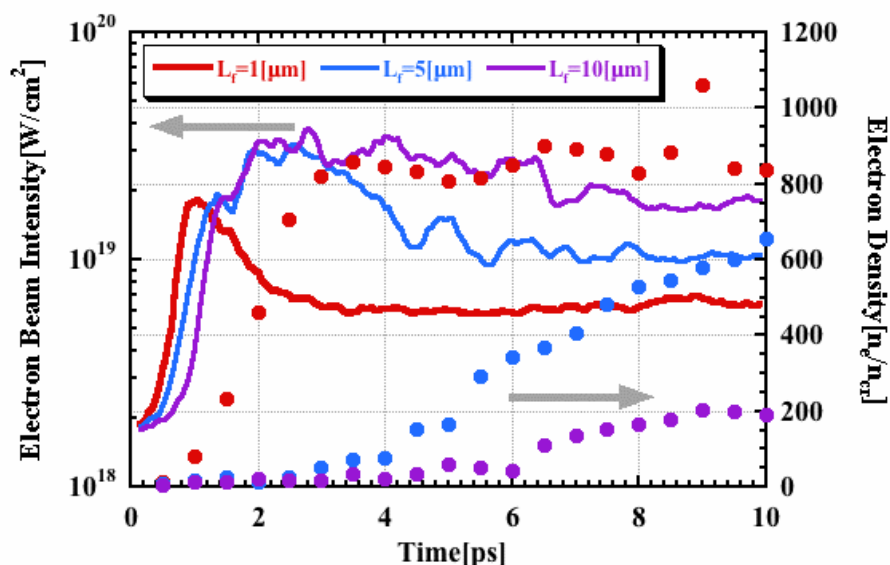


図 2.2.2-9：高速電子ビーム強度とレーザー・プラズマ相互作用領域の電子密度の時間発展

プレプラズマのスケール長が短い場合は、レーザー・プラズマ相互作用領域の電子密度は初期最大密度より大きくなり、高速電子ビーム強度の低下は著しい。スケール長が長い場合には、スケール長が短い場合ほど電子密度は高密度にはならず、高速電子ビーム強度の低下も顕著ではない。レーザーの強度が十分高いと、高速電子は、いわゆる振動ポンドラモーティブ力により生成されるが、この力の大きさは c/ω_{pe} に比例する[16]。このため、高速電子のビーム強度も、 c/ω_{pe} 、つまり、電子密度の $-(1/2)$ 乗に比例することになる。このスケール則を図 2.2.2-10 に示す。なお、電子密度が小さいところでスケールリングから外れているのは、レーザーの立ち上がり部である。プレプラズマのスケール長に依存しないで、高速電子ビーム強度は電子密度の $-(1/2)$ 乗にスケールされていることがよくわかる。

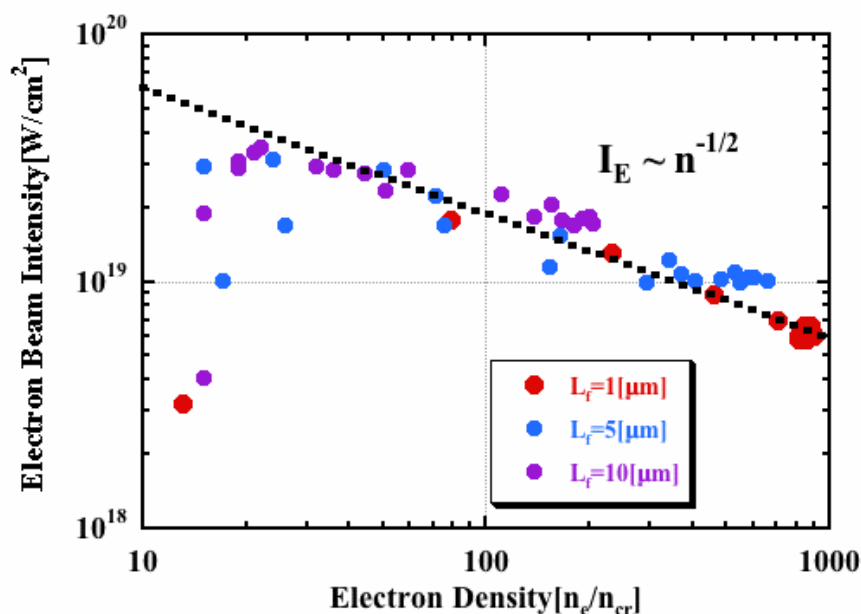


図 2.2.2-10：高速電子ビーム強度と電子密度のスケール則

更に、この相対論的粒子コードのシミュレーションで得られた高速電子のエネルギー分布を用いて統合シミュレーションを行ってコア加熱を評価し、コア温度のプレプラズマスケール長に対する依存性を調べた。図 2.2.2-11 にコア部における電子とイオン温度の時間発展を示す。図 2.2.2-8 に示したパラメータでは、プレプラズマのスケール長が $1.5[\mu\text{m}]$ と比較的短い場合が最適であったが、加熱用レーザーパルス長が $10[\text{ps}]$ と長い場合には、プレプラズマのスケール長が短いとポンドラモーティブ力により電子が掃き集められて相互作用領域の密度が増加して高速電子ビーム強度の低下に結びつき、コアが十分に加熱されないことがわかった[17]。この場合には、より長いプレプラズマが存在する方がコアは高い温度まで加熱されるため、この性質を積極的に利用することも考えられる。例えば、コーン内側にエアロジェルをコートする最適なターゲット設計の可能性が有る。この結果は、実験条件と同等な条件による統合シミュレーションの重要性を再び示しており、世界に先駆けて高速点火実験のポイントデザインに踏み出せた意義は非常に大きい。

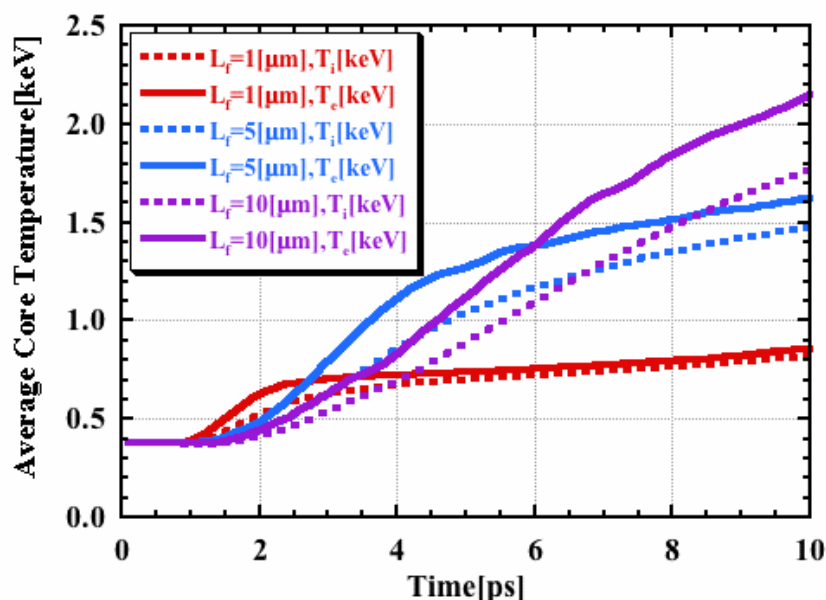


図 2.2.2-11：統合シミュレーションによる電子とイオン温度の時間発展

以上述べた統合シミュレーションに必要なコード間のデータ交換は、ルーチンワーク的かつより高度な統合シミュレーションを実現するためには、コード内にプログラムの一部として埋め込む必要が有る。このデータ交換を並列プログラミングのデファクトスタンダードである MPI で記述することは可能であるが、MPI が SPMD 特性であることを考えるとプログラミングに困難さが伴う。また、各コードは独立して開発や保守され、コード毎に適したアーキテクチャの計算機上で実行することを想定しているため、データ通信はサイト間に及ぶ。しかし、このような環境下で MPI を実装することは、計算機システムの運用上難しい。そこで、我々の必要とするコード間通信は単機能であることを考慮して、TCP/IP ベースの軽装な専用プロトコル Distributed Computing Collaboration Protocol (DCCP)を設計・開発・実装する[18, 19]。このプロトコルを TCP/IP の上位プロトコルとすることで、サイト内では通常の LAN が、サイト間ではインターネットが利用できるため、適用可能範囲は広い。手続き不要なシステムとしユーザにとって容易なプ

プログラミング・インターフェイスを提供するため、このプロトコルは、統合して動作する複数のコードを実行管理するためのアービトレータと各コード間での通信を実際に行うコミュニケータで実装する。DCCP を用いたコード間における実際の通信の様子を図 2.2.2-12 に示す。DCCP では、各コードはそれが属するコミュニケータと通信するだけで、コード間では直接通信しない。コミュニケータの情報およびそのコミュニケータに属するコードの情報は、アービトレータが一括管理しており、ユーザはどのコードがどの計算機で起動しているか等について特別な配慮をしなくても、送信側のコミュニケータが受信すべき相手側のコミュニケータをアービトレータに照会し、適切なコミュニケータ間で自動的にデータ通信が行われる。この結果、コミュニケータを介して、コード間の通信が実現できている。また、DCCP は、非同期通信をサポートしており、送受信を行うコードは、同時に起動していなくてもかまわない。データを受信すべきコードがまだ起動していない場合でも、送信されたデータはコミュニケータのハードディスク上にいったん保存され、送信側コードは正常に送信処理を終了する。その後、受信側のコードが起動すると、アービトレータはデータを保存していたコミュニケータにデータ送信を依頼し、データはハードディスクから復元されて、自動的にコミュニケータを介して受信側のコードに転送される。DCCP を利用するためにユーザが呼び出す FORTRAN サブルーチンは以下の 5 つであり、プログラミングは非常に容易である。

```
call DCCP_INITIALIZE ( CodeName,RunName,Cnd )
call DCCP_SEND ( DstCode,DstRun,N,Type,Data,Tag,Cnd )
call DCCP_UPLOAD ( Ndst,DstCodes,DstRuns,N,Type,Data,Tag,Expire,Cnd )
call DCCP_RECEIVE ( SrcCode,SrcRun,N,Type,Data,Tag,Timeout,Cnd )
call DCCP_FINALIZE ( Cnd )
```

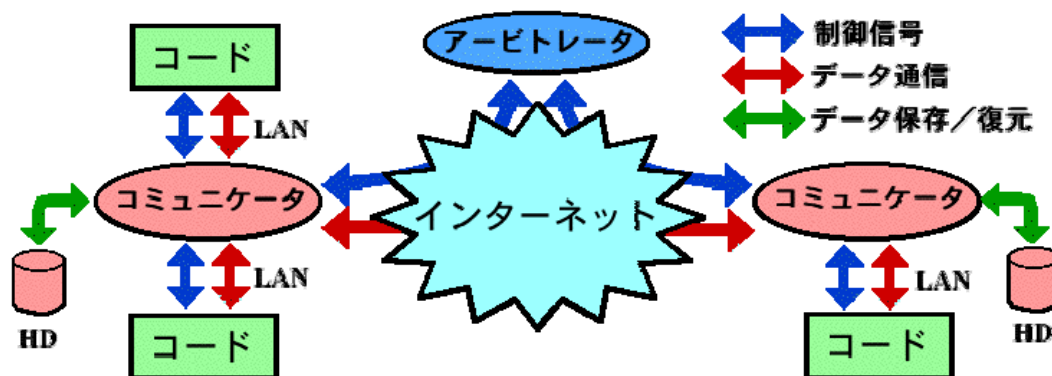


図 2.2.2-12 : DCCP によるコード間通信

なお、以上に述べた FI³に関する研究成果は、大阪大学、摂南大学、九州大学、兵庫県立大学、名古屋大学との密接な共同研究で行われており、その分担を表 2.2.2-1 に示す。表 2.2.2-1 から明らかなように、本研究所が果たしている役割は全体の 20%程度であり、不十分と言わざるを得ない。本プロジェクト遂行に携わっている本研究所の研究者は 1 名のみであり、人員体制の整備が望まれる。

表 2.2.2-1：レーザー核融合シミュレーションプロジェクトにおける分担

- 放射・流体コード
 - 大阪大学
- 相対論的粒子コード
 - 本研究所（1D）
 - 大阪大学（2D）
- フォッカープランクコード
 - 大阪大学
 - 九州大学
- ハイブリッドコード導入による統合の高度化
 - 摂南大学
- 衝突モデルの開発
 - 名古屋大学
 - 本研究所
 - 大阪大学
 - 摂南大学
- 双方向コード間通信
 - 本研究所
 - 兵庫県立大学

2.2.3 ロードマップ

本プロジェクトは、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの高速点火実験 FIREX に歩調を合わせて統合シミュレーション研究を進展させることを主目的としている。FIREX の進捗を睨んだ本プロジェクトのロードマップを図 2.2.2-13 に示す。なお、各項目における共同研究の分担は、表 2.2.2-1 を参照のこと。

主な研究項目として、まず、新衝突モデルの研究開発がある。現在の粒子コードでは、無衝突プラズマを仮定した手法を用いているため、いわゆる衝突項を無視している。しかし、高速点火シミュレーションでは、金コーンという極めて高密度なプラズマを扱わなければならない。衝突項の影響を考慮しなければならない。それを従来の二体衝突モデルで導入すると計算量が膨大であり、実験と同等な条件の大規模シミュレーションでは、計算時間の観点から現実的ではない。そこで、粒子数のオーダーに計算量を押さえられる経験則的なモデルを採用した新しい衝突項の計算手法を開発し、それを粒子コードに導入する。経験則的なパラメータは、比較的低密度において、フォッカープランクコードとシミュレーション結果を比較することにより修正・検証し、高エネルギー密度科学において必要とされる衝突項のシミュレーションモデルを 1 次元粒子コードで確立し、更に、2 次元粒子コードに適用範囲を広げられるよう研究開発を進める。

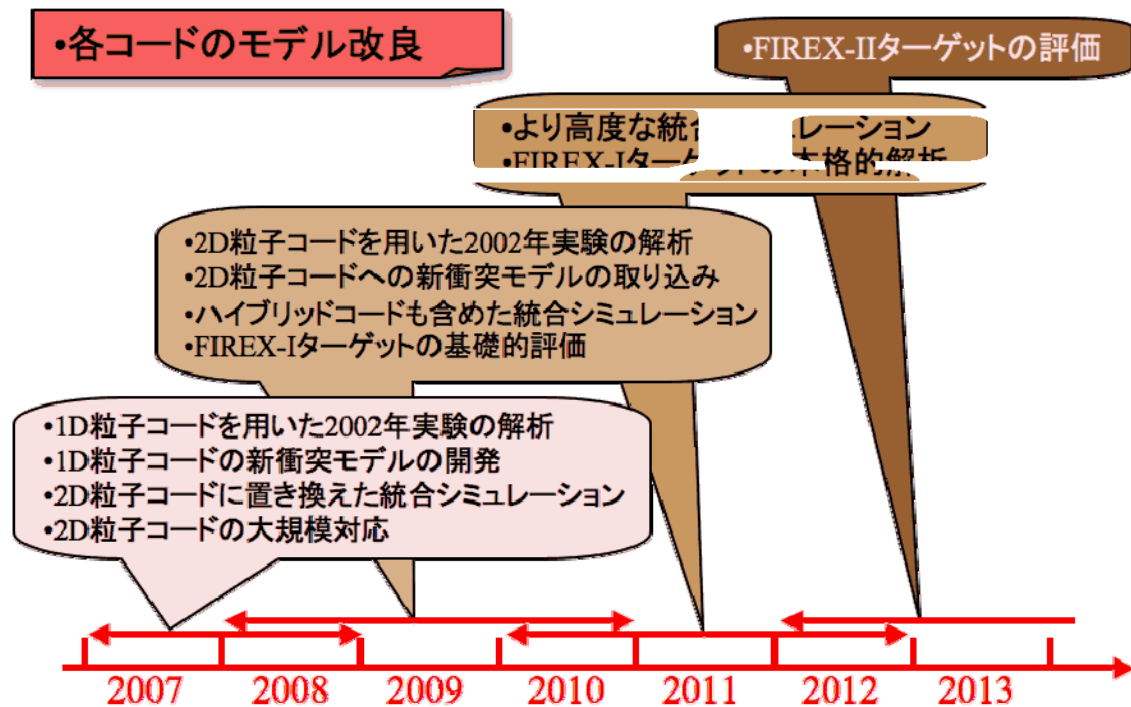


図 2. 2. 2-13 : レーザー核融合シミュレーションプロジェクトのロードマップ

現在の統合シミュレーションでは、加熱用レーザーと金コーンプラズマの相互作用を1次元粒子コードで計算しているが、次の研究項目として、この部分を2次元粒子コードに置き換えることがある。このためには、2次元レベルでコードを接続するための連結アルゴリズムを開発することが必要である。また、実験と同等な条件の2次元大規模シミュレーションが可能となるよう、2次元粒子コードの大規模化も必須である。

同様に現在の統合シミュレーションでは、放射・流体コード、相対論的電磁粒子コードおよびフォッカープランクコードの三つのコードを連結している。高速点火で実現されるコアプラズマは高密度であり、この部分の高速電子輸送がコア加熱を評価するために重要な因子になると考えられる。しかし、この部分を粒子コードで計算することは、計算量を考えると難しい。そこで、相対論的電磁粒子コードとフォッカープランクコードの間にハイブリッドコード[19, 20]を挟み、ハイブリッドコードによって高速電子輸送を計算し、四つのコードで統合シミュレーションを行うことも研究項目である。このときのコード結合ダイアグラムを図 2. 2. 2-14 に示す。また、現状では、相対論的電磁粒子コードとフォッカープランクコード間では片方向の結合しか行っておらず、高エネルギー電子の流れのみが二つのコード間で一致しているだけで、帰還電流については連続性を無視している。しかし、帰還電流のプロファイルが静電場を介して高エネルギー電子の運動に影響するため、より高精度な統合シミュレーションが不可欠となり、この効果は無視できない。そこで、フォッカープランクコードの帰還電流を相対論的電磁粒子コードの背景電子プロファイルに反映するシミュレーション技法を開発し、双方向の結合を目指す。また、このときコード間で双方向通信が必要であるので、この実装に必要な通信プロトコルも併せて開発する。

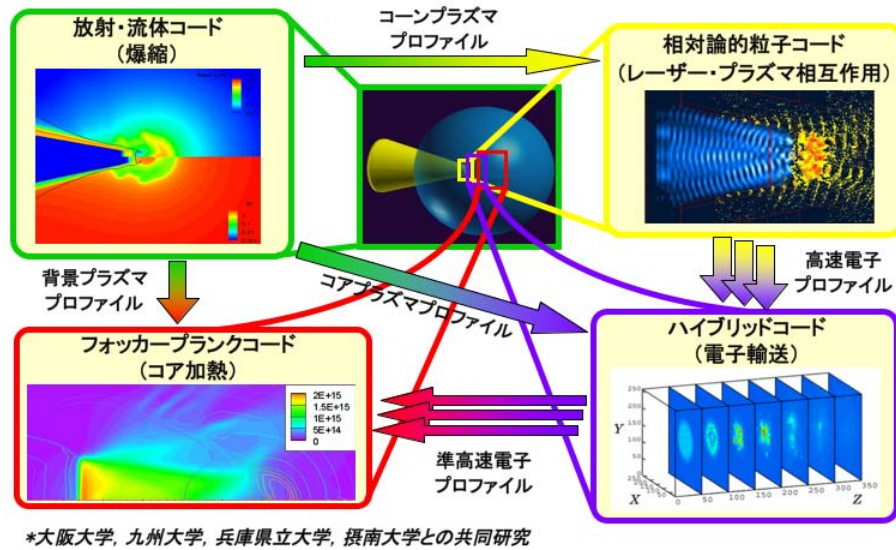


図 2. 2. 2-14 : ハイブリッドコードを含めた統合シミュレーションのコード結合ダイアグラム

参考文献

- [1]M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky, W. L. Kruer, S. C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, M. D. Perry, and R. J. Mason, Phys. Plasmas, 1 (1994) 1626.
- [2]三間罔興, 長友英夫, 坂上仁志, プラズマ・核融合学会誌, 79 (2003) 489.
- [3]三間罔興, 田中和夫, 宮永憲明, 児玉了祐, 長友英夫, 城崎知至, 北川米喜, 西村博明, 坂上仁志, 田口俊弘, プラズマ・核融合学会誌, 81 (2005) 42.
- [4]H. Sakagami and K. Mima, Laser and Particle Beams, 22 (2004) 41.
- [5]坂上仁志, 長友英夫, 城崎知至, 三間罔興, レーザー研究, 32 (2004) 324.
- [6]H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo and K. Mima, Laser and Particle Beams, 24 (2006) 191.
- [7] R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S. J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka, and M. Zepf, Nature, 412 (2001) 798.
- [8] R. Kodama, H. Shiraga, K. Shigemori, Y. Toyama, S. Fujioka, H. Azechi, H. Fujita, H. Habara, T. Hall, Y. Izawa, T. Jitsuno, Y. Kitagawa, K. M. Krushelnick, K. L. Lancaster, K. Mima, K. Nagai, M. Nakai, H. Nishimura, T. Norimatsu, P. A. Norreys, S. Sakabe, K. A. Tanaka, A. Youssef, M. Zepf, and T. Yamanaka, Nature, 418 (2002) 933.
- [9]H. Nagatomo, N. Ohnishi, K. Mima, K. Sawada, K. Nishihara, and H. Takabe : Proc. of 2nd Int. Conf. Inertial Fusion Sciences and Applications, Kyoto, 2001 (Elsevier, 2002) 140.
- [10]H. Sakagami, K. Mima, Proc. of 2nd Int. Conf. Inertial Fusion Sciences and Applications, Kyoto, 2001 (Elsevier, 2002) 380.
- [11]T. Johzaki, K. Mima, Y. Nakao, T. Yokota, and H. Sumita, Fusion Sci. Technol. 43 (2003) 428.
- [12] H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima, J. Phys. IV France, 133 (2006) 421.
- [13] T. Johzaki, H. Nagatomo, H. Sakagami, Y. Sentoku, T. Nakamura, K. Mima, Y. Nakao and T. Yokota,

J. Phys. IV France 133 (2006) 385.

[14] T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, K. Mima, Laser Part. Beams 25 (2007) 621.

[15] H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Nakamura, H. Sakagami, A. Sunahara and K. Mima, Phys. Plasmas, 14 (2007) 056303.

[16] S. C. Wilks and W. L. Kruer, IEEE J. Quantum Electronics, 33 (1997) 1954.

[17] H. Sakagami, T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, and K. Mima, 5th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Kobe, Japan, September 9-14 (2007) FPo27.

[18] T. Sakaguchi, H. Sakagami, M. Nii, and Y. Takahashi, Parallel and Distributed Computing: Applications and Technologies, LNCS 3320 (Springer-Verlag, Heidelberg, 2004) 90.

[19] 坂上仁志, 坂口智哉, 三間園興, プラズマ・核融合学会誌, 82 (2006) 137.

[20] T. Taguchi, T. M. Antonsen Jr., C. S. Liu and K. Mima, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5055.

[21] T. Taguchi, T. M. Antonsen Jr. and K. Mima, Comput. Phys. Commun., 164 (2004) 269.

2.3. 複雑性プラズマシミュレーションプロジェクト

2.3.1. 概略

核融合プラズマをはじめとする高温プラズマ中には、プラズマを構成する電子やイオンのスケールに依存したミクロな物理過程から、系全体に亘るグローバルなスケールの現象を支配するマクロな物理過程までの異なった時間・空間スケールの物理過程が混在し、それらがお互いに影響しあいながら3次元的に時々刻々変化するなど複雑な振る舞いを示す。このような複雑さにも関わらず、プラズマ中には、時として、地磁気ダイナモ過程のような自己組織化現象や太陽フレアのような間欠性エネルギー解放現象といった非常に興味深い物理現象が共通して現れることが知られている。複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトでは、自然界プラズマにおける爆発的なエネルギー解放現象や、複合物理系としてのプラズマと物質の間の相互作用等の研究テーマを当面の具体的な研究対象として、関連大学との共同研究や機構連携を基にした研究組織を立ち上げ、複雑性科学に共通する諸課題の解明に取り組んできている。

太陽の大気中で発生する巨大な爆発現象である太陽フレアでは、太陽の活動領域中に蓄えられた磁気エネルギーが短時間で解放される。また、太陽風によって運ばれるエネルギーは、地球磁気圏との相互作用の結果、磁気圏内部にいったん蓄えられる(図2.3.1-1)。この蓄積されたエネルギーが解放される過程とサブストーム(磁気圏嵐)と呼ばれる現象の発生が深く関係している。解放された高速の粒子が磁力線に沿って地球大気までやってくると、オーロラと呼ばれる発光現象を引き起こす。また、この一連の過程で、地磁気の乱れや磁気圏での激しい変動が発生する。このような太陽表面でのフレア等の爆発現象や地球磁気圏でのサブストームでは、磁気リコネクション(磁力線再結合)が大きな役割を演じていると考えられている。このような現象が発生するためにはリコネクションが発生する点の近傍に、磁気リコネクションの直接的な原因となるミクロスケールの物理に支配された電気抵抗が必要となる。一方、リコネクションの結果、図2.3.1-1のプラズモイドの例に代表されるような、グローバルスケールでの磁場閉じ込め配位の変化やプラズマ輸送が発生する。このように、磁気リコネクションに支配されたこれら複雑な現象の多くは、ミクロ階層の物理とマクロ階層の物理が直接結びついた階層横断現象となっている。そのため、これら複雑現象の全体を理解するには、両階層の物理を同時に矛盾無く解くことのできる「階層繰り込みシミュレーションモデル」の開発と、それを用いた大規模シミュレーションの実行が必要不可欠となる。

この「磁気リコネクションのための階層繰り込みシミュレーションモデル」の構築を目指した研究プロジェクトとして、MARISプロジェクト(Magnetic Reconnection Interlocked Simulation project)を立ち上げた。このプロジェクトは、主として、自然科学研究機構の新分野創成型連携プロジェクト「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究拠点形成」を研究推進の基盤とする。現在、シミュレーション空間領域をミクロ物理が重要となる磁気リコネクション点近傍とその外側という二つの領域に分割するシミュレーションモデルを考案し、その開発・改良に取り組んでいる。このモデルでは、リコネクション点近傍には粒子シミュレーション手法を、その外側にはマクロな磁気流体シミュレーション手法を用いてそれぞれの物理を記述し、

さらに、境界を通じてお互いの情報を交換しながら連動して系全体の挙動を解くことをめざす。この推進に当たっては、マイクロ階層からのアプローチ、マクロ階層からのアプローチ、および、両階層を結合するための結合モデルの開発の3方向からのアプローチを基本戦略として用いる。まず、マクロ階層からのアプローチとしては、磁気リコネクションの自然界の代表的な現象である地球磁気圏のサブストームへの適用を前提に、地球磁気圏のグローバルシミュレーションモデルの評価と、マクロ階層のアプローチの限界、粒子効果及び磁気リコネクション発生の条件について調査・検討を行ってきた。MHD を用いたグローバルシミュレーションでは、リアルタイムの太陽風観測データを上流境界条件に用いて、サブストームや磁気嵐が引き起こす擾乱のタイミングを再現できることを示した (2.3.2.1 章を参照)。また、マイクロ階層からのアプローチとしては、マクロ階層の情報を、マイクロ階層の境界条件として、マイクロ階層の物理に反映出来る開放系粒子シミュレーションコード (PASMO) を開発した。この開発により、マイクロ開放系における外部駆動型無衝突磁気リコネクションの物理、特に、無衝突磁気リコネクションの誘発機構に関して多くの研究成果を上げている (2.3.2.2 章を参照)。以上の2つのアプローチの成果を基に、MARIS プロジェクトの中心的課題である階層結合モデルの開発を推進している。最近、この階層結合モデル検証のため、1次元線形 Alfvén 波の伝播をシミュレーションし、2つの階層間を通じて、Alfvén 波がスムーズに伝播することを確認した (2.3.2.3 章を参照)。

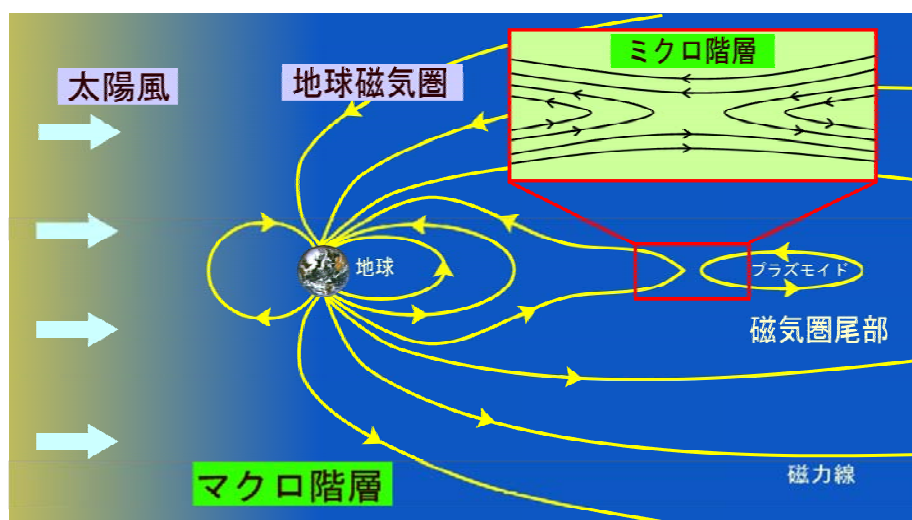


図 2.3.1-1：地球磁気圏尾部での磁気リコネクションの模式図。

磁場閉じ込め型核融合装置では、プラズマ中心部から離れた周辺領域でプラズマとダイバータ壁などとの相互作用が発生する。複雑性科学という観点からこの現象を見ると、固体とプラズマという異なる相（階層）が複雑に反応し新たな構造を持った相へ動的に相転移する現象と捉えることができる。この複雑な動的現象の中から原子分子レベルでの相互作用である共有結合などに着目して、水素原子と代表的な炭素材であるグラファイトとの複雑な相形成の様子を分子動力学シミュレーションにより調べてきた。

炭素材に水素プラズマを入射すると、炭素材は損耗し、炭化水素分子や水素分子が発生する。この現象のメカニズムの詳細は不明な点が多い。従来の研究の多くが、炭素材の損耗量や炭化水

素分子の発生量をマクロな視点から議論しているからである。しかし、実際に起こっている現象は原子分子スケールでの反応であり、ミクロな視点での研究が必要となる。そこで、我々は分子動力学シミュレーションを応用することで、原子の振る舞いのミクロスコピックレベルからの解明を目指した研究をスタートした。

まず、平成 16 年度から 17 年度にオリジナルな分子動力学シミュレーションコードを開発し、(a) プラズマ-炭素材反応の最基礎過程であると考えられる一粒子水素原子とグラフェン系での反応過程を調べ始めた。グラフェンとはグラファイト系炭素材の最小分子構造であり面構造をしている(図 2.3.1-2)。グラフェンに水素原子を 1 つだけ入射させると、入射エネルギーにより吸着・反射・貫通の三種の反応に分かれることがわかった。特に吸着時には、水素原子と共有結合した 1 つの炭素原子のみがグラフェンの面から水素原子のいる側へ自発的に突き出した安定構造をとる。我々はこの状態をオーバーハングと名付けた。

次に、平成 18 年度は、(b) 水素原子充満系におけるグラフェンの崩壊について調べた。ここでグラフェン崩壊とはグラフェン中の炭素間共有結合(C-C 結合)が切断されることを意味する。全て低運動エネルギー状態にあるグラフェンを水素原子の集団の中に浸した状態を初期状態とした。この初期状態から開始し、やがて水素原子間で新たに共有結合を作り水素分子を形成する。すると水素原子が分子になり安定化するため結合エネルギーが放出される。このエネルギーを水素原子が媒体となり、グラフェンに伝わり C-C 結合の切断を引き起こす。この C-C 結合の切断チャンネルを発見した。それは、C-C 結合している 2 つの炭素原子が共に一粒子ずつ水素を吸着し、かつ、この 2 つの炭素原子がグラフェン面から逆側にオーバーハングしている場合に、この C-C 結合が選択的に切断され易くなっているというものである。

平成 19 年度は、グラフェンが複数枚集まったグラファイト構造へと材料の階層を上げ、(c) グラファイトの水素原子照射シミュレーションを行った。この結果、入射水素原子のエネルギーによらず、グラファイト構造の破壊するプロセスで重要なのは、入射水素から炭素原子への運動量移管であることがわかった。また、グラファイトから炭素の鎖状分子という形で放出されることをシミュレーションにより明らかにした。

磁気閉じ込め核融合装置の周辺プラズマにおいては電位構造が、その性質に大きな役割を果たす。その役割を解明するために自己無撞着な電場を扱いうる、粒子吸収境界を持つ 3 次元粒子シミュレーションコードを開発し、基礎現象を解明した。基本アルゴリズムとしては Particle-in-Cell 法を採用し、壁などに吸収された粒子についてはフラグを立てて、計算から取り除くという取り扱いをしている。このコードを局所的な高密度領域であるブロブに伴う自己無撞着な電場生成と磁力線を横切る輸送現象の解明に適用した。非一様磁場中に初期に高密度領域を持つプラズマを配置し、その時間発展を調べた結果、磁場の不均一性のため電荷分離し、y 方向に電場が形成され、この電場と磁場による $E \times B$ ドリフトにより磁力線を横切ってプラズマが運動すること、さらに運動に伴って高密度プラズマ領域が変形することを確かめた。

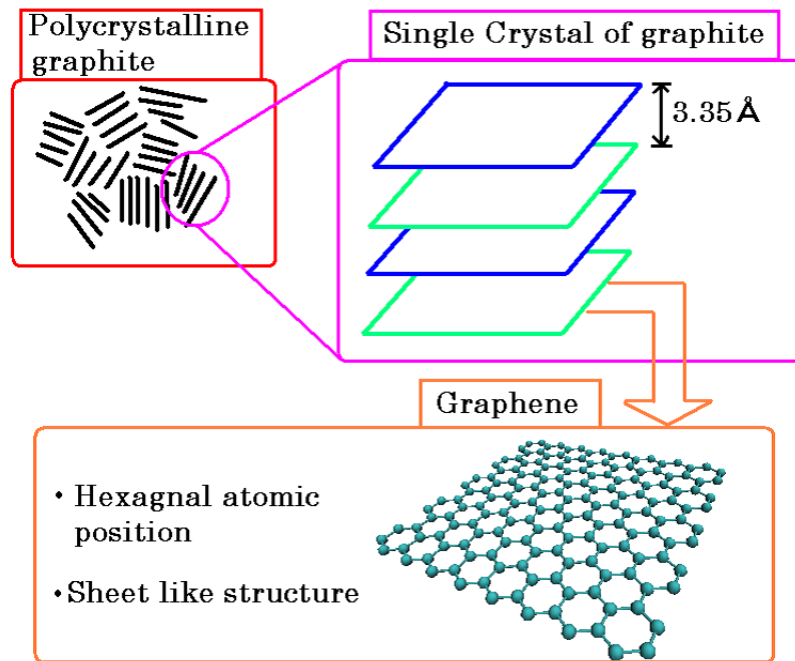


図 2. 3. 1-2. グラファイト系物質の階層構造

2.3.2. 磁気リコネクションの物理

磁気リコネクションは、核融合プラズマから宇宙プラズマまでの広い分野で観測される現象で、磁気エネルギーの高速解放現象を支配する基礎プラズマ過程でもある。その特徴は、磁気リコネクションの直接的引き金となるマイクロ階層の物理機構とその結果生み出されるグローバルなプラズマ輸送や磁場トポロジーの変化を支配するマクロ階層の物理が直接結びついた階層横断現象となっていることである。本プロジェクトでは、自然界プラズマにおける爆発的なエネルギー解放現象や核融合プラズマにおける鋸歯状振動等のリコネクション現象を当面の具体的な研究対象として、両階層の物理を同時に矛盾無く解くことのできる「階層繰り込みシミュレーション」等の手法開発を行うことにより、その基礎物理過程の解明をめざす。この研究推進に当たっては、マクロ階層からのアプローチ（2.3.2.1章）、マイクロ階層からのアプローチ（2.3.2.2章）、および、両階層を結合するための結合モデルの開発（2.3.2.3章）の3方向からのアプローチをその基本戦略として用いる。

2.3.2.1. 磁気流体シミュレーションによるマクロ階層の物理（田）

地球磁気圏は、太陽風の状態によりダイナミックに時々刻々変化する。これまで地上の地磁気や電流、また人工衛星による限られた観測データにより予測されていたが、ラグランジアン(L1)点周囲に軌道を持つ ACE 衛星による太陽風のリアルタイム観測データをシミュレーションの上流境界条件に用いることにより、太陽風のダイナミクスに応じた地球磁気圏の動的な変化をリアルタイムに再現することに成功した(図 2.3.2.1-1)。計算モデルは田中高史教授（九州大学）によ

り開発されたもので、フラックス部分に衝撃波捕捉スキームの一つである TVD 法を採用し、また計算グリッドは磁気圏尾部が細かく、プラズマシートから離れるに伴って粗い間隔の不等間隔グリッドで構成される、地球磁気圏のトポロジーに最適化されたメッシュを採用している。特に磁気圏尾部は磁気圏擾乱の発生に伴い磁気リコネクションや粒子加速等の非常に重要な現象が起こる領域であり、ここでの高精度計算は必須である。図 2.3.2.1-1 で、上図では左から太陽風が吹きつけており、上左図が磁力線（赤色は北極に入り、水色は南極から出る磁力線）、上右図はプラズマ圧のカラーコンター図を示している。右図で黒丸の中心にある水色の丸が地球の位置と大きさを表す。左下図は地球を北極から見た図で、実線のコンターは電離圏対流、カラーコンターは静電ポテンシャルを表しており、磁気圏活動が活発になると後者は大よそオーロラの位置する場所に強度が増す。

次に MHD シミュレーションモデルの評価のため、シミュレーションデータを用いて、地上の地磁気活動度の指標の一つである AE 指数[※]を求め、観測値と比較した。図 2.3.2.1-2 は、2005 年 6 月 15 日の地磁気の活動度を表しており、左が観測データのプロットで右が磁気圏のシミュレーション結果を用いて求めた値である。横軸は時刻(UT)を示しているが、シミュレーション結果の方は境界条件の設定場所の関係で、実際より 1 時間先行していることに注意すると、例えば左下図で 5 時ごろの急な増加はサブストームの開始を意味しているが、このふるまいが右下図の 4 時ごろに見られる。定量的な一致には至らないが、磁気リコネクションが重要な役割を担うサブストームの発生と発展のタイミングについては良く再現できることを示した。[1][2][3]（※AE 指数：オーロラ帯において経度方向に比較的等間隔に分布した観測所の地磁気データを用いて、電離圏電流の変動を指数化したもの。これにより、磁気圏からのエネルギー流入、サブストームの発達の様子等を知る事ができる。）

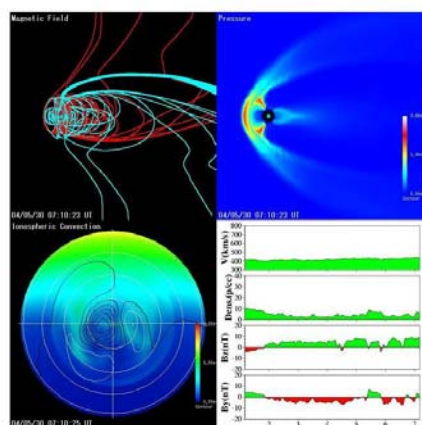


図 2.3.2.1-1. 地球磁気圏のリアルタイムシミュレーション。

磁気リコネクションは理想 MHD では起こらない。MHD シミュレーションでサブストームがある程度再現できているのは、電気抵抗をパラメータとして有限の値を与えているからであり、この結果磁気リコネクションを MHD の範疇で表すことが出来る（図 2.3.2.1-3）が、この値に物理的な根拠はマクロ物理では与えられない。実際にこの電気抵抗に依存して、サブストームの発生が左右されるのは、この MHD シミュレーションで分かっている。

その他に、MHD シミュレーションで再現できないサブストームの過程には、サブストームの

オンセットと地球磁場の急激な双極化、またオーロラのパルジの厚みの増加及び磁気リコネクション点の連続的な尾部への移動があげられる。これらを含み、サブストームの全体を説明するためには、粒子効果の取り込みが不可欠であることがマクロ物理での解析で改めて分かった（田中高史、九州大学）。

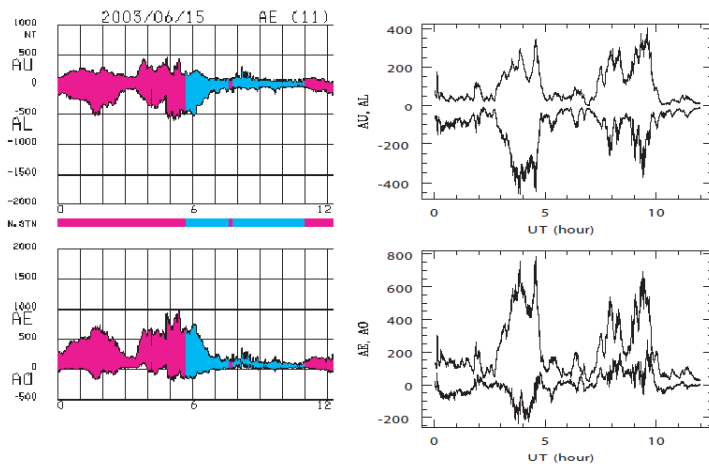


図 2.3.2.1-2. 地磁気活動度（AE 指数）の観測（左）とシミュレーション（右）の比較。

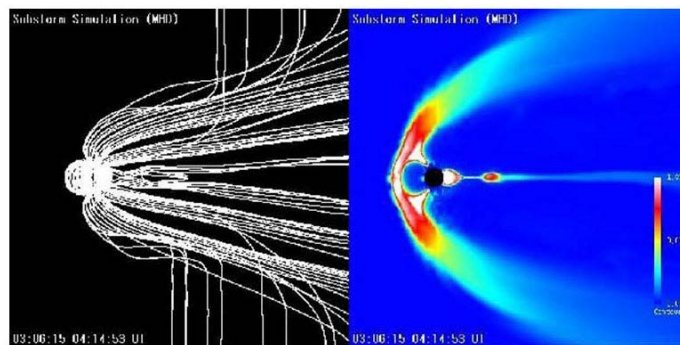


図 2.3.2.1-3 MHD シミュレーションによって再現された地球尾部における磁気リコネクション。

- [1] M.Den, T.Tanaka, S.Fujita, T.Obara, H.Shimazu, H.Amo, Y.Hayashi, E.Nakano, Y.Seo, K.Suehiro, H.Takahara, T.Takei:“Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code”, Space Weather, Vol.4 (2006) PAGE S06004-1-S06004-10.
- [2] H. Shimazu, T. Tanaka, M. Den, T. Obara: “Simulation of the entry of solar energetic particles into the magnetosphere”, Advances in Space Res., in press.
- [3] H. Shimazu, T. Tanaka, M. Den, T. Obara: “Simulation of the solar wind interaction with the magnetosphere and its application to real-time calculation”, 2004 Asia-Pacific Radio Science Conference Proceedings, (2004) pp.135-144.

2.3.2.2. 粒子シミュレーションによるミクロ階層の物理

マイクロ階層とマクロ階層の物理が複雑に絡み合った磁気リコネクション現象の解明のために、マイクロ階層からのアプローチとして、マクロ階層の情報を、マイクロ階層の境界条件として、マイクロ階層の物理に反映出来る開放系粒子シミュレーションコード (PASMO) を開発した。このコードは、マクロ階層の情報をある与えられた関数系で与えることにより、両階層間の相互作用を解くことなく、マイクロ開放系で発生するミクロスケールの物理に適応することが出来る。即ち、上流境界と下流境界の2つの境界を設けて、上流境界では、マクロ階層側から流入するプラズマ流速を、境界上で駆動電場を仮定することにより、EXB ドリフトとして表現する。また、下流境界では、リコネクションの結果生まれた高速プラズマがマイクロ系から自由に出て行くことのできる自由境界条件を課している[1,3-8]。

さらに、開発した大規模計算プログラムの分散メモリ型ベクトル計算機で実行性能を得るため、High Performance Fortran (HPF) を用いて、分散並列化された開放系3次元電磁粒子シミュレーションコードの開発も並行して行っている。前回の外部評価の段階で、ベクトル化率 99.0 %、プラズマシミュレータのピーク性能に対して15%程度の計算性能を得ることができた。また、ベクトル化指示行 listvec の使用により、メモリ使用量を97%減少させることに成功した[1]。このことにより、さらに大規模なシミュレーションを行う道を拓く事ができた。

平成16年からは、PASMO コードの精度をさらに高めるため、次のような開放系境界モデルの改良を行ってきた。

○ 粒子の上流境界条件の改良 (大谷, 堀内)

上流境界では、理想MHD条件が成立していると仮定する。このとき、イオンと電子はともに磁場凍りつき条件を満たし、境界に印加された電場によるE×Bドリフトによって系に入射される。また、粒子数密度は磁場強度に比例して変化し、イオンと電子の速度分布はshifted Maxwellianに従うものとする。

これらの条件を精度良く満たすため、次のようなアルゴリズムを考えた。

- ① 上流境界の第一セル ($0 < y < \Delta y$, $L_y - \Delta y < y < L_y$) に存在する全粒子を毎ステップ消去する。
- ② 前述の粒子数密度と速度分布を満たす粒子分布を quiet-start 法で求め、上流境界の第一セルに新たに配置する。このとき shifted Maxwellian は厳密に満たすようにする。

このアルゴリズムによる上流境界条件の採用によって、上流境界における磁場凍りつき条件を高精度で満たすことができるようになった。

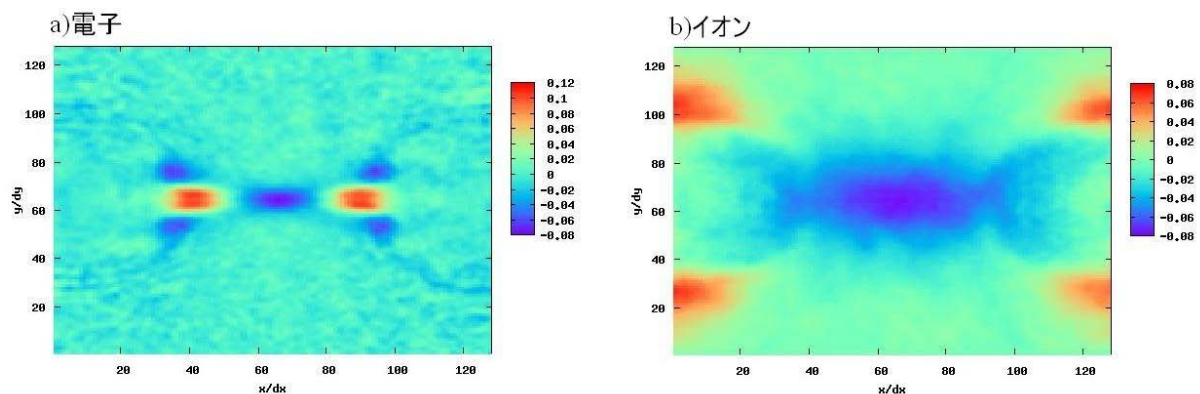


図 2.3.2.2-1 磁場凍結条件 $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ のカラー分布図。横軸が x 、縦軸が y である。a) が電子の、b) がイオンの凍結条件である。

図 2.3.2.2-1 は磁場凍結条件 $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ のカラー分布図を示す。 $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ の値が 0 のとき、磁場凍りつき条件が満たされていることを意味する。図からわかるように、上流境界で $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ の値が電子、イオンともに 0 になっていることがわかる。このことをさらにはっきり示すため、リコネクション点を含む y 軸に沿った $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ の空間分布を図 2.3.2.2-2 に示す。

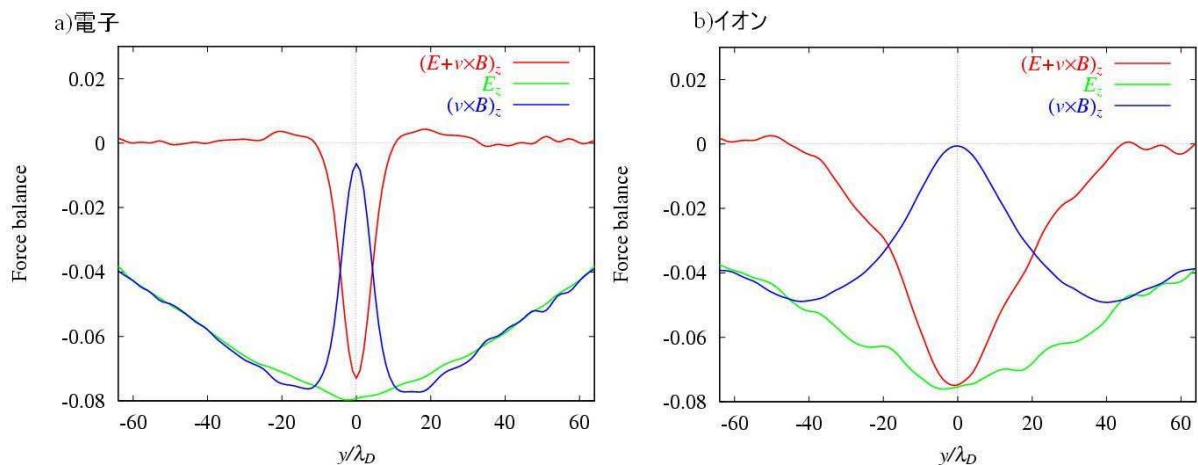


図 2.3.2.2-2. リコネクション点を含む y 軸に沿った $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ のプロファイル。赤線が $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ 、緑線が E_z 、青線が $-(\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ を示す。

上流境界において磁場の凍りつき条件、即ち、理想 MHD 条件が精度良く成立することは、ミクロとマクロをつなぐ階層繰り込みシミュレーションモデルを構築する上で必須条件となる。このモデルでは、上流境界で理想 MHD シミュレーションと直接接続することを考えている。つまり、磁場凍結条件を満たすマクロ領域とミクロ領域を接続することになる。従ってミクロ領域である粒子シミュレーションの上流境界で理想 MHD 条件が精度良く成立する必要がある。今回の上流境界条件の改良によってこのことが実現され、階層繰り込みシミュレーションモデルの実現に一步近づくことができた。

○ 粒子の下流境界条件の改良（大谷，堀内）

自由境界条件を課した下流境界では、粒子は境界から系外へ出て行くだけではなく、系内に入ってくることが考えられる。系外へ向かう粒子は境界で直接観測ができる一方、系内に入ってくる粒子の情報は何かもない。そこで、下流境界での重要な問題は、如何にして系内に入ってくる粒子の数や分布を決定するかである。

この問題を解決するため、PASMO では、境界の外側での物理状態は境界での状態と同じであるという仮定を設けた。この仮定を実現し、さらに、下流境界条件における非物理的なノイズの発生を抑えるため、次のようなアルゴリズムを考えた。

- ① 下流境界領域 A ($0 < x < \Delta x$, $Lx - \Delta x < x < Lx$) に存在する全粒子を毎ステップ消去する。
- ② 下流境界近傍領域 B に存在する粒子の情報(位置、速度)を、領域 A における粒子の分布として与え、新たに粒子を領域 A に配置する。これによって、領域 A と領域 B での粒子分布が一致する。

このアルゴリズムによる上流境界条件の採用によって、下流境界での粒子に関する物理量(密度、流体速度、圧力)の法線方向の導関数が 0 となる。また、これまで採用していたモデルに比べて、下流領域での非物理的ノイズを減らすことに成功した(図 2.3.2.2-1)。

次に、この下流境界モデルが適切に機能しているかを調べるため、次のような比較を行った。長いシミュレーションボックス(グリッド数: $Lx=1026$, $Ly=129$, $Lz=36$)と短いボックス(グリッド数: $Lx=258$, $Ly=129$, $Lz=36$)を設定し、それぞれで PASMO によるシミュレーションを実行する。長いボックスでのリコネクション点を含む中心領域(長さ $Lx=258$)の結果と短いボックスでの結果を比較する。もし下流境界モデルが適切に機能するならば、短いボックスでのシミュレーション結果が長いボックスでの結果と同じ、即ち、模擬しているはずである。

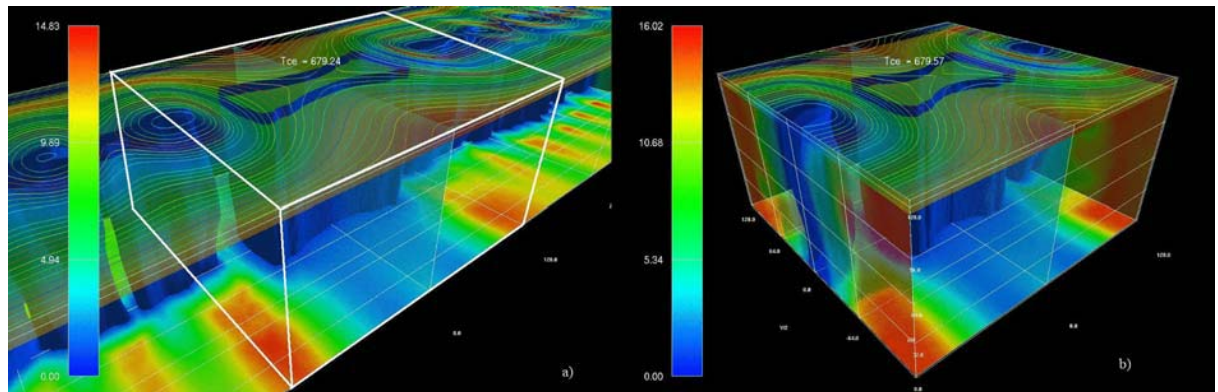


図 2.3.2.2-3 時刻 $t\omega_{ce}=680$ における磁場構造。a) が長いボックス、b) が短いボックスでの結果である。上面に磁場フラックスの等値線、青い面は $B_x^2 + B_y^2$ の等値面を示す。

図 2.3.2.2-3 は時刻 $t\omega_{ce}=680$ での両者の磁場構造を示す。また、図 2.3.2.2-4 にはボックス中心での平衡電流方向の電流密度(J_z)と電場(E_z)の時間変化を示す。それぞれの時間発展がほぼ一致していることがわかる。

次に定常状態となった際の物理量の比較を行う。図 2.3.2.2-5 は時刻 $t\omega_{ce}=806$ での磁場フラックスのプロファイルを示す。また、図 2.3.2.2-6 にはリコネクション点を含む X 軸に沿った $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ の分布図を示す。長いボックスの結果は短いボックスに対応する部分を拡大表示している。磁場構造も $E_z + (\mathbf{v} + \mathbf{B})_z$ の分布も長いボックスと短いボックスでの結果ではほぼ一致している。以上の結果から、下流境界モデルは適切に機能していることがわかる。以上のように、磁場凍結条件を高い精度で満たす上流境界モデルと、ノイズの発生しない自由境界条件を実現する下流境界モデルの開発に成功した。

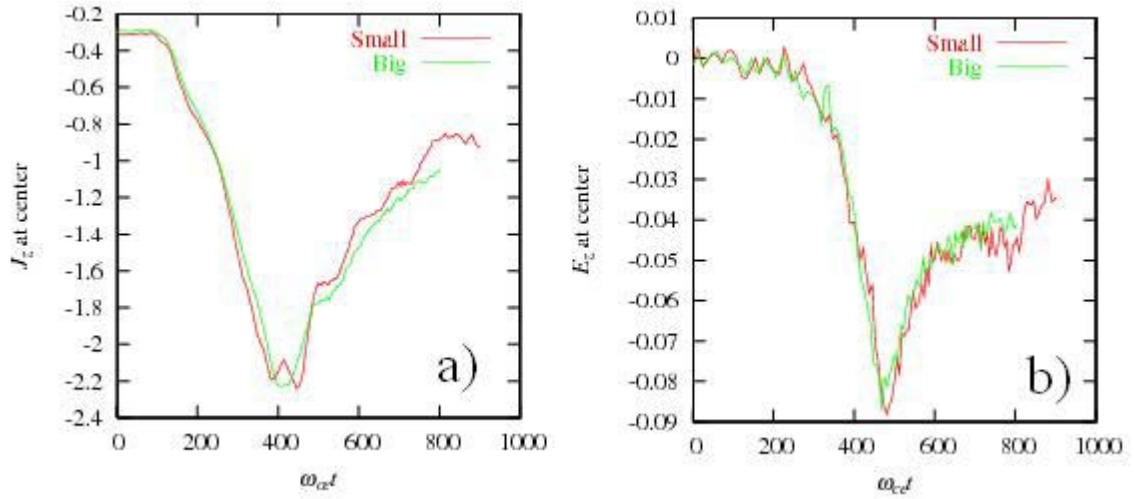


図 2.3.2.2-4 シミュレーションボックス中心における平衡電流方向の a) 電流密度 J_z と b) 電場 E_z の時間変化。

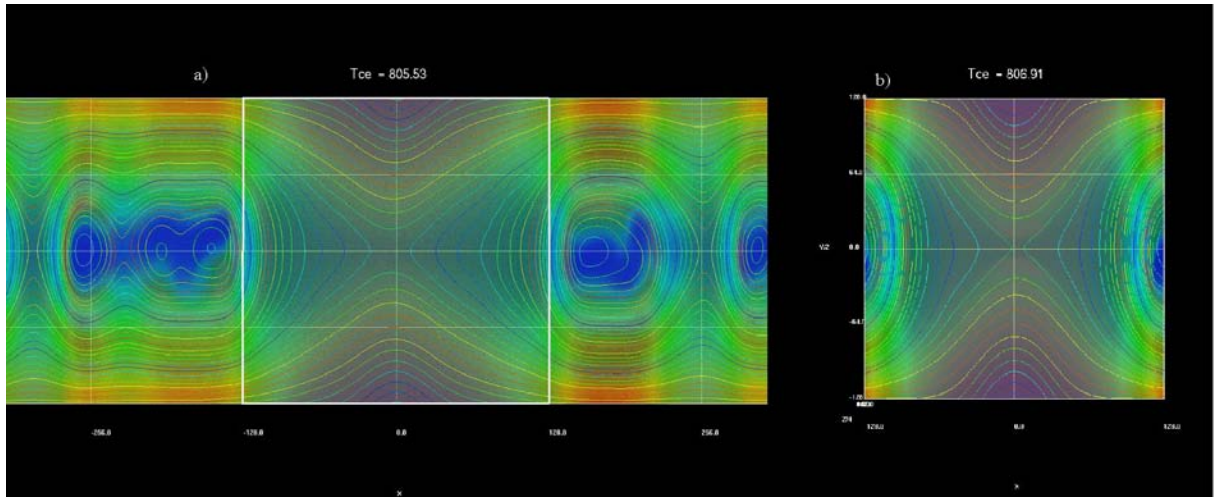


図 2.3.2.2-5. 定常状態での磁場構造。線が磁力線を色が磁場強度を示す。(a)が長いボックスの場合の結果。白線で囲まれた部分が短いボックスの結果 (b)に対応する。

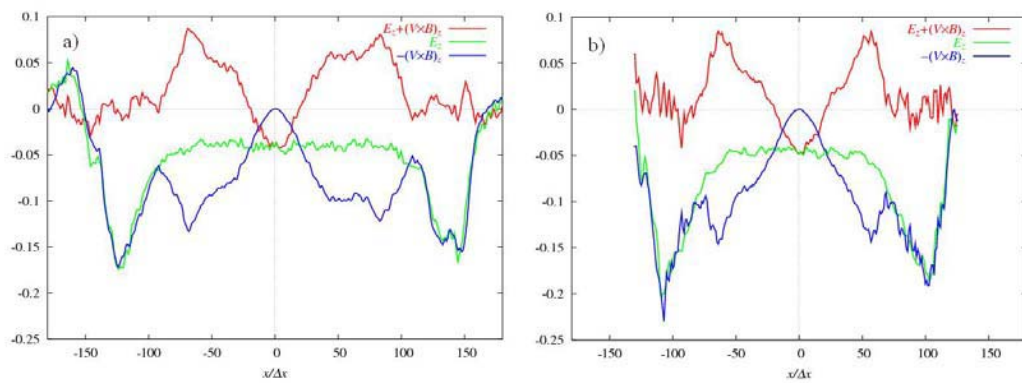


図 2.3.2.2-6. 定常状態における $E_z + (v + B)_z$ の x 軸方向の空間分布。赤線が $E_z + (v + B)_z$ 、緑線が E_z 、青線が $-(v + B)_z$ を示す。

○ 磁気リコネクションにおける異常抵抗発生機構(堀内、森高)

粒子間の衝突過程が無視できる高温希薄プラズマ中で磁気リコネクションを励起させるには、磁場凍結を破る何らかの運動論過程が必要となる。これまで提唱されてきた主なモデルとしては、1) 電流層で発生するプラズマ不安定に起因した異常抵抗モデル、および、2) 構成粒子の慣性や有限振幅の熱運動に起因する粒子運動論効果モデルの2つがある。前者の場合、リコネクション成分の磁場が存在するリコネクション面に垂直な方向に伝播する波と電流を担う粒子との相互作用が問題となる。この研究では、まずは、リコネクション面に垂直な面内での2次元電磁粒子シミュレーションにより波粒子相互作用の効果を評価した[2]。

図 2.3.2.2-7 は、外部駆動源が存在しない場合の2次元粒子シミュレーションの結果で、上図が磁場を、下図が電流の空間分布を示している。時間経過とともに、3つのプラズマ不安定性が成長する。特に、イオンサイクロトロン周波数程度の低周波・電磁モードであるドリフトキンク不安定性の成長により、電流層が大きく変形されるのが観測された。この不安定性の成長期における平衡電流方向の力の釣り合いを調べた結果、イオンおよび電子の場合の両者ともに、電流層の中央で平衡電流方向に直流電場が生成され、凍結条件が破れていること、この破れの原因が、主として、ローレンツ力に対する波の成分の寄与であることを明らかにした。即ち、ドリフトキンク不安定性の発生が、電流層の中央で異常抵抗の発生原因となっていることを示唆している。さらに、この不安定性に伴うエネルギー輸送過程の詳細や、電流の散逸率より異常抵抗値の評価も行っている。また、外部駆動源が存在する場合の、プラズマ不安定に起因した異常抵抗と後に述べる粒子得運動論効果の関係も3次元開放系シミュレーションにより明らかにしている[3]。

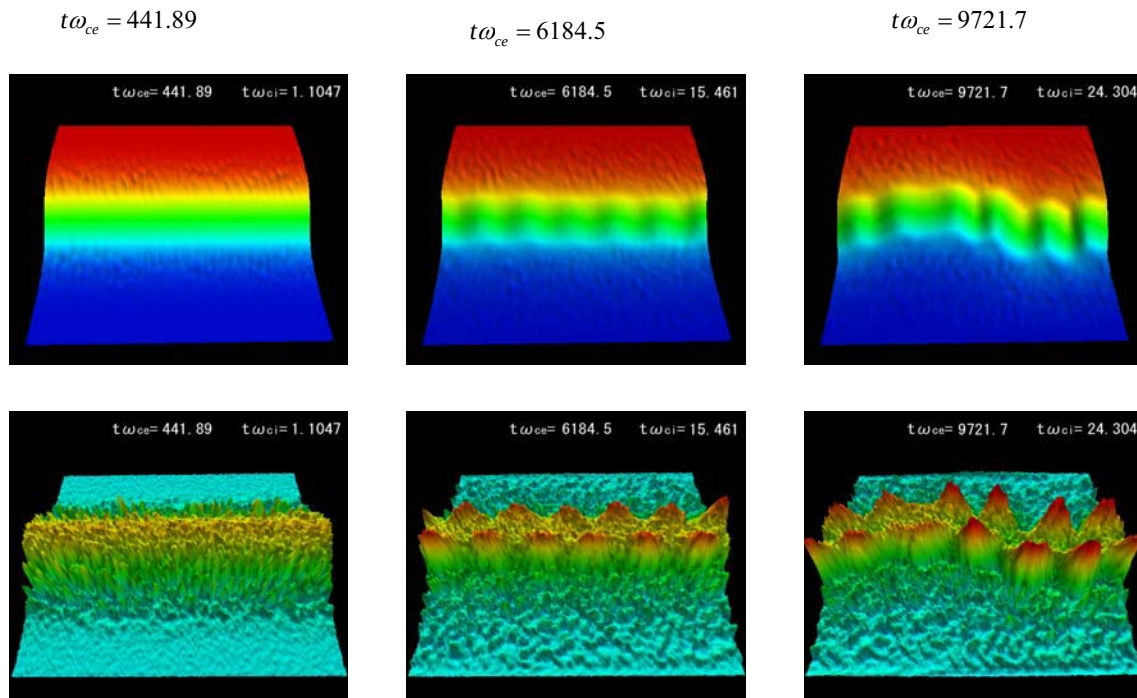


図 2.3.2.2-7. 電流層中央近傍における磁場および電流の空間分布の時間発展。

○ 磁気リコネクションにおける非マックスウェル分布の形成とその役割(堀内、大谷、石澤)

次に、無衝突プラズマ中で磁場凍結を破り磁気リコネクションを励起させる物理機構として、構成粒子の慣性や有限振幅の熱運動に起因する粒子運動論効果に注目して解析を行った。モデルでは、外部マクロ系との相互作用を境界条件として外部駆動源の存在を仮定することにより取り入れている。手法としては、我々のグループで開発した3次元開放系電磁粒子シミュレーションコード（PASMO）を用いた[1]。

これまでの一連の研究で、磁気中性線近傍での複雑な非ジャイレーション運動（meandering motion）に起因する圧力テンソル項が磁場凍結の破れにおいて重要な役割を行っていることを明らかにしてきた。図 2.3.2.2-8 に示しているように、上流境界では凍結条件が満たされ、シフト型マックスウェル分布を満たした速度分布のプラズマが流入する。イオンのメアンダーリング振幅の内側まで達すると、イオンの凍結条件が破れ、イオンと電子の運動にずれが生じる。その結果、イオンのメアンダーリング振幅で特徴づけられるイオン散逸領域内で、電荷分離と内向きの静電場が形成される。イオンはこの静電場により内向きに加速され、電流層の中央では、熱速度の数倍程度の大きな速度を持ったメアンダーリング運動が形成される。この一連の過程で、イオンの速度分布がマックスウェル分布から大きくずれ、位相空間に大きな「穴」を持つ分布へと変化する（左図）。この速度分布の変化に対応して、圧力テンソルの非対角項（右図の青線）が成長し、磁場凍結条件の破れをもたらしていることを明らかにした。電子についても規模としては比較的小さいが、同様に、分布関数に「穴」を持つ粒子分布が形成されることも確認している[4]。ここで、さらに注目すべきことは、慣性項（右図の緑線）がイオンスキン長以下で顕著となってくるが、圧力テンソル項が慣性項と逆符号を持って同程度に大きくなっているため、両者が相殺されてしまうことである。そのため、イオンスキン長とイオンメアンダーリング長の間では、ほぼ磁場凍結条件が満たされており、イオンメアンダーリング長以下の中心部で、初めて、磁場凍結が破れる。この結果は、磁場凍結を破り、無衝突磁気リコネクションを引き起こす物理機構に関する長年の論争に終止符を打つ大きな成果であるといえる[4-7]。

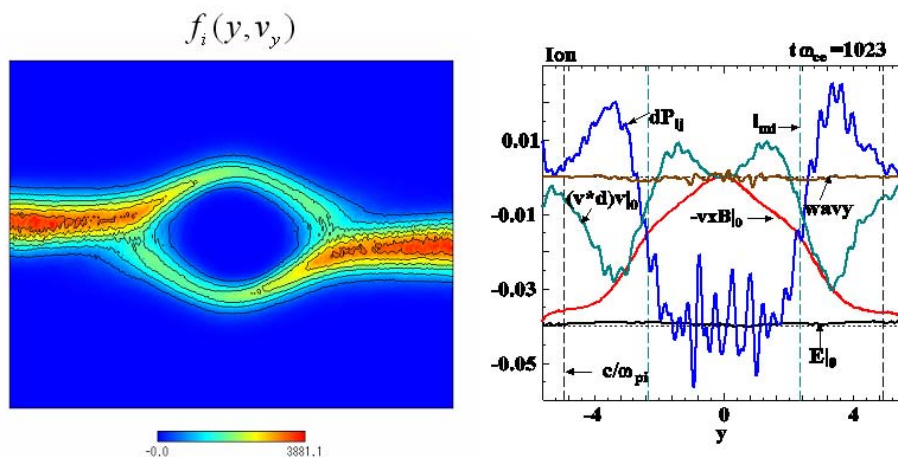


図 2.3.2.2-8 (y, v_y) 空間におけるイオン分布関数（左図）およびイオンの非理想項の空間分布（右図）。

無衝突プラズマ中で磁場凍結を破り磁気リコネクションを励起させる物理機構を考える場合、リコネクション電場（平衡電流）方向の力の釣り合いが問題となる。解析の結果、上記のと

ここで述べたように、圧力テンソルの非対角項が磁場凍結の破れを引き起こす主な原因の1つであることが明らかにされた。一方、この過程で大きな内向きの静電場が形成されるため、電流層を横切る方向の力学的平衡が初期のハリス平衡配位から大きくずれることも判った。特に、この変化はイオン散逸領域の内側に存在する電子散逸領域で顕著となる[4,8]。

○ 無衝突磁気リコネクションにおける電子散逸領域の力学構造(堀内、李、大谷)

図 2.3.2.2-9 は、電流層を横切る方向の力の釣り合い (左図)、電荷密度および速度分布 (右図) を表している。イオン散逸領域の内側では、イオンは凍結が破れている一方で、電子はしばらく凍結したままであるため、磁気圧は電子により強く働き、電流層中央付近の電子スキン長で特徴づけられる電子散逸領域に電子の過剰集積をもたらす。この電荷分離により内向きの静電場が発生する。電子散逸領域では磁気エネルギーが急激に散逸するために、その境界で磁気圧 (ローレンツ力) および静電場が最大となる。図から判るように、イオン散逸領域の内側では、熱圧力はこの2つの力に比べ小さく、力学平衡は主としてローレンツ力 (青線) と静電場力 (赤線) によって成り立っている。これは、圧力とローレンツ力の釣り合いで与えられる初期のハリス平衡解からの大きなずれが生じたことを意味する。

電子散逸領域に運び込まれた磁気エネルギーは急激に散逸し、最終的に電子の運動エネルギーへと変換される。そのため、図 2.3.2.2-9 の右図に示されているように、下流域での電子平均速度 (赤線) は電子散逸領域の上流境界での電子アルベン速度 (青線) に等しくなる。また、新しい力学平衡式を用いた電荷分離の評価や電子散逸領域の形状因子に関する新たな知見も見いだしている[8]。

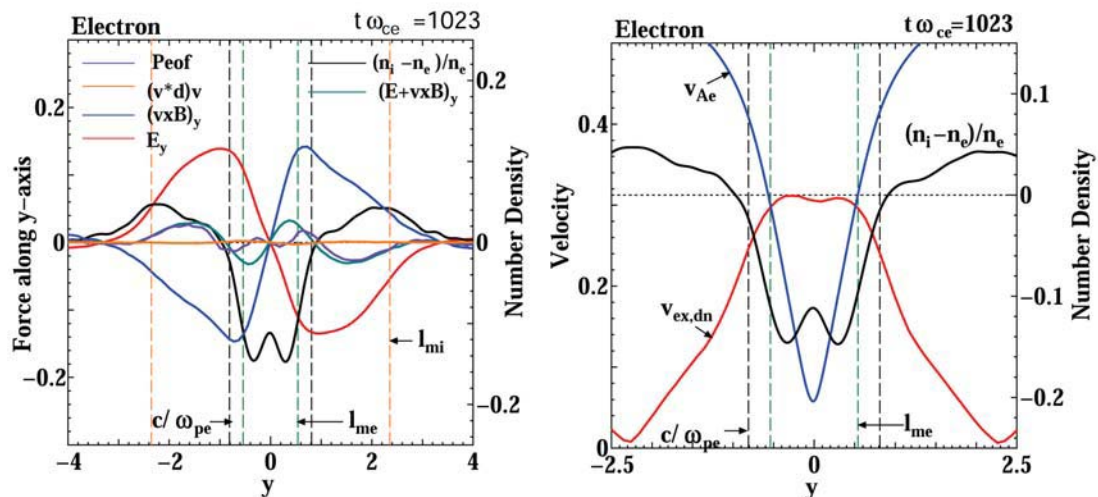


図 2.3.2.2-9. 電流層を横切る方向の力の釣り合い (左図)、電荷密度および速度分布 (右図)。

[1] H.Ohtani, S.Ishiguro, R.Horiuchi, Y.Hayashi and N.Horiuchi:

“Development of Electromagnetic Particle Simulation Code in an Open System”,

Lecture Notes in Computer Science in print.

- [2] T.Moritaka, R.Horiuchi, H.Ohtani :
 “Anomalous resistivity due to kink modes in a thin current sheet”,
 Physics of Plasmas, vol.14 no.10 (2007) pp.102109-1-102109-10
- [3] R.Horiuchi, H.Ohtani, A.Ishizawa
 “Towards cross-hierarchy simulation of collisionless driven reconnection in an open system”,
 Journal of Plasma Physics, vol. **72**, No. 6, (2006) pp.953-956.
- [4] R.Horiuchi, H.Ohtani :
 “Formation of non-Maxwellian distribution and its role in collisionless driven reconnection”,
 48th annual meeting of the division of plasma physics of APS, vol.51 no.7 (2006) pp.313-313
- [5] A.Ishizawa, R.Horiuchi:
 “Suppression of Hall-Term Effects by Gyroviscous Cancellation in Steady Collisionless Magnetic Reconnection”
 Physical Review Letters, VOL.95, (2005) pp. 045003-1-045003-4.
- [6] R.Horiuchi, H.Ohtani, A.Ishizawa
 “Structure formation and dynamical behavior of kinetic plasmas controlled by magnetic reconnection”,
 Computer Physics Communications, Vol. **164**, (2004) pp. 17-32.
- [7] A.Ishizawa, R.Horiuchi, H.Ohtani:
 “Two-scale structure of the current layer controlled by meandering motion during steady-state collisionless driven reconnection”,
 Physics of Plasmas, Vol. 11, No. 7 (2004) pp. 3579-3585.
- [8] Bin Li, R.Horiuchi, H.Ohtani
 ”Formation of Sweet-Parker-like electron dissipation region in a driven open system”,
 17th International Toki Conference (2007), submitted to Plasma and Fusion Research.

2.3.2.3. 階層繰り込みシミュレーションモデル

階層横断現象である磁気リコネクション現象の物理機構解明を目的とした MARIS (MAgnetic Reconnection Interlocked Simulation) プロジェクトの一環として、マクロ階層とミクロ階層を同時に解く、階層繰り込みシミュレーションモデルの構築に取り組んでいる。そのモデルでは、マクロ階層はMHDコードで、ミクロ階層は粒子(PIC)コードで記述する。その特徴としては、ミクロ階層での運動論的効果をマクロ階層のダイナミクスに反映し、一方、マクロ階層の時間発展

に従って境界を通じて流入するプラズマ情報をマイクロ階層に取り入れることができるという利点がある[1]。最近、開発した階層結合数値アルゴリズム検証のため、1次元線形 Alfvén 波の伝播をシミュレーションし、2つの階層間を通じて、Alfvén 波がスムーズに伝播することを確認した[2](宇佐見、大谷、堀内、田)。

このプロジェクトで用いる階層繰り込みシミュレーションモデルとして、図 2.3.2.3-1 のような領域分割型の MHD-PIC 結合モデルを考えている。細かいセルはマイクロ階層の粒子(PIC)モデル、粗いセルはマクロ階層の MHD モデル用のセルである。リコネクション点は、PIC モデルの内部に存在する。ミクロ的な現象の効果が重要となるリコネクション点近傍は PIC モデルで解く。一方、その PIC 領域の周辺は MHD モデルで解く。電気抵抗や粘性等は、リコネクション点近傍におけるミクロスケールでの物理により生成されたと考え、MHD 領域では、基礎方程式として理想 MHD 方程式を用いる。PIC 領域と MHD 領域の間には、有限の幅を持つインターフェイス領域を挿入する。インターフェイス領域は、PIC コード、MHD コードの両方によって計算される。すなわち PIC コード、MHD コードによって、それぞれ物理量を求め、両者の値を内挿した量をインターフェイス領域における物理量の値とする。こうすることによって、両領域をスムーズに接続できる。この手法は shake-hand 法と呼ばれている。(草野完也、地球シミュレータセンター)

図 2.3.2.3-2 は MHD-PIC 結合モデルにおける時間の流れを表したものである。MHD シミュレーションと PIC シミュレーションは、互いに異なる時間ステップを持つ、multi-time scale 法を採用した。図 2.3.2.3-2 中の大きな時間ステップは MHD モデル、小さな時間ステップは PIC モデルの時間ステップである。MHD モデルと PIC モデル間の情報のやりとりを $t_1 \sim t_2$ の間を例にとって説明する。PIC モデルは時刻 t_1 の MHD 情報および時刻 t_2 の MHD 情報を内挿して、毎ステップ受け取る。一方、時刻 t_1 に、MHD モデルは t_1 の周りで平均された PIC 情報を受け取る。 $t_1 \sim t_2$ の間の階層繰り込みシミュレーションの時間の流れは以下ようになる。

1. 時刻 t_1 において、MHD モデル、PIC モデルの値が求められている。
2. MHD モデルは時刻 t_1 の MHD 情報を PIC に送る。
3. PIC モデルを時刻 t_1 の少し先まで進める。
4. 時刻 t_1 周辺の PIC 情報を時間平均して、MHD モデルに送る。
5. MHD モデルを 1 ステップ計算し、時刻 t_2 まで進める。
6. 時刻 t_1 の MHD 情報と時刻 t_2 の MHD 情報を PIC モデルに送る。
7. 3 の時点で計算された時刻 t_1 の少し先までの PIC 情報を破棄する。
8. PIC モデルを何ステップか計算し、時刻 t_2 まで進める。

以上によって、両モデルの同時性を保ちながらシミュレーションを進めていく。

MHD モデルと PIC モデルが物理的に正しく接続できているか確認するため、1次元的に伝播する線形 Alfvén 波のシミュレーションを行った。図 2.3.2.3-3 はシミュレーションボックスの模式図である。y 座標の中央に PIC 領域をおき、両側を MHD 領域ではさむ形になっている。

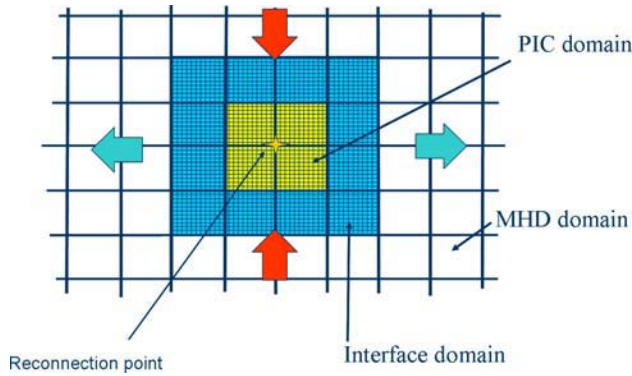


図 2.3.2.3-1: リコネクションの階層繰り込みモデルの模式図。リコネクション点近傍を PIC モデル、PIC モデルの周辺を MHD モデルで扱う。PIC 領域と MHD 領域をスムーズに繋ぐため、インターフェイス領域を挿入する。

MHD 領域と PIC 領域は前述のようにインターフェイス領域を通じて接続する。また、右側 MHD 領域の右端と左側 MHD 領域の左端を周期境界条件とした。このようなモデル中において、Alfvén 波を y 方向に伝播させた。図 2.3.2.3-4 に、様々な時刻における速度の x 成分 v_x のプロファイルを示す。中央の y 座標 64-90 が PIC 領域であり、両側は MHD 領域である。PIC 領域には小さなノイズが見られ、これは粒子の熱的揺らぎである。PIC 領域を通して、Alfvén 波がスムーズに伝播していることが分かる。

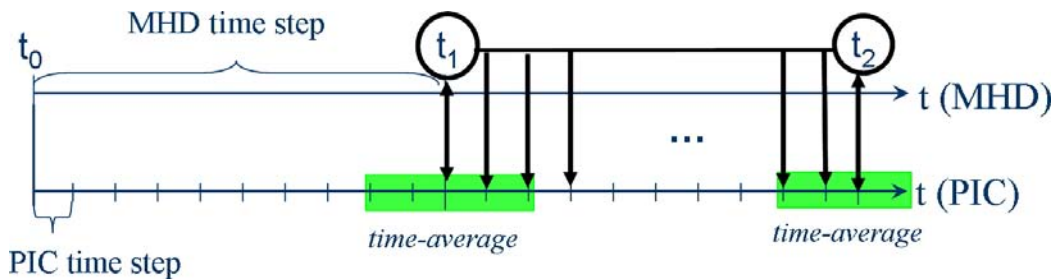


図 2.3.2.3-2: 階層繰り込みシミュレーションにおける、時間の流れを示した図。 $t_1 \sim t_2$ の間、PIC は時刻 t_1 の MHD 情報および時刻 t_2 の MHD 情報を内挿して受け取る。一方、時刻 t_1 に、MHD は t_1 の周りで平均された PIC 情報を受け取る。

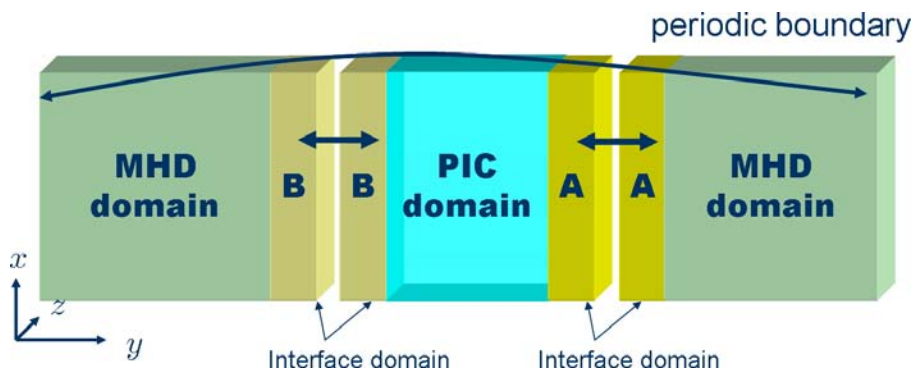


図 2.3.2.3-3: MHD モデルと PIC モデルの接続をテストするためのシミュレーションボックス。中央が PIC 領域であり、その両側が MHD 領域である。この中を y 方向に Alfvén 波が伝播する。

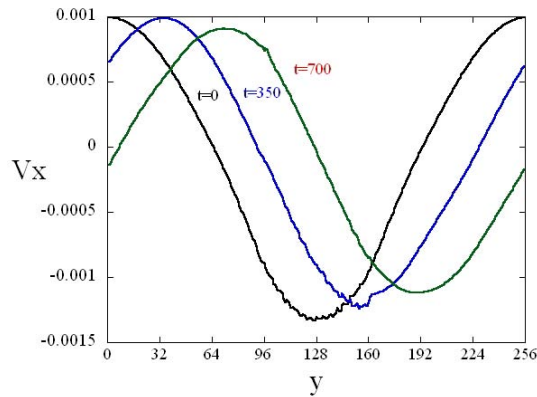


図2.3.2.3-4: MHD-PIC 接続モデルのテストのシミュレーション結果。様々な時刻における、速度の x 成分 v_x のプロファイルを表した。階層繰り込みモデル中を Alfvén 波がスムーズに伝播している

[1] R.Horiuchi, H.Ohtani, A.Ishizawa

“Towards cross-hierarchy simulation of collisionless driven reconnection in an open system”,
Journal of Plasma Physics, vol. **72**, No. 6, (2006) pp.953-956.

[2] S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, and M. Den:

”Development of Multi-hierarchy Simulation Model for Studies of Magnetic Reconnection”,
submitted to Comm. Comp. Phys.

2.3.3. プラズマ物質相互作用

プラズマ複雑性シミュレーションプロジェクトのサブプロジェクトであるプラズマ物質相互作用シミュレーションプロジェクトでは、プラズマ物質相互作用に関わる様々な事象に対して、適切なシミュレーション手法を開発・適用し、その解明を試みるとともに、ボトムアップアプローチにより、プラズマ物質相互作用を対象とした多階層プラズマシミュレーション手法の構築を目指す。プラズマ物質相互作用の関連する事象としては、核融合プラズマにおいては、壁とプラズマの相互作用、プラズマ内に入射された固体燃料とプラズマの相互作用、プラズマ中ダスト粒子とプラズマの相互作用など多岐にわたる。さらに、宇宙プラズマにおいてもこのダスト粒子とプラズマの相互作用に関連した事象が存在しており、興味深い研究課題であると注目されている。本プロジェクトでは、ミクロな基礎方程式に基づくシミュレーションとマクロなシミュレーションの間で情報交換を行いつつ全体系をシミュレーションする手法の開発を目指す。対象とする系の大きさは大きい方は数メートル単位を想定し、小さい方はナノメートルスケール、その中間域はマイクロメートルからセンチを想定し、それぞれ、マクロ、ミクロ、メソスケールとよぶことにする。マクロスケールは流体シミュレーション、ミクロスケールは分子動力学シミュレーション、メソスケールはPICシミュレーションを基礎シミュレーション手法と考える。プロジェクトはシミュレーション対象志向ではなく手法志向とし、研究対象は限定せず、核融合プラズマを始め、プラズマ材料科学、宇宙空間プラズマなど、幅広い対象に適応することを目指す。そのため、核融合科学研究所の共同研究や自然科学研究機構連携プロジェクトなどを活用し、幅広く連携して、

研究開発を進めていく。プロジェクトの前半は基盤コードの開発を主体とし、それぞれ適切な物理テーマを設定して開発したコードの妥当性などを検証しながら研究を進めていくこととする。その中で対象とする物理テーマは共同研究などを通じて広く求めていく。さらに、対象とする時空間スケールが異なるシミュレーションの連携のプロトタイプを作成してテストを行う。このようなプロセスで、開発を進めていき、最終的にマクロな系をメソおよびマイクロシミュレーションと連携して矛盾なく時間発展を解析できるシミュレーションへと発展させることを最終目標とする。

2.3.3.1. 炭素材と水素の化学反応の分子動力学（中村）

プラズマと物質の間の相互作用の複合物理系として、ダイバータ表面での現象を固体物質側から取り上げ、原子レベルからの基礎方程式を基盤とするシミュレーションの開発を行ってきた。ダイバータ材の耐久性の観点からのみならず、周辺プラズマの挙動解析にも、「プラズマ粒子がダイバータ表面の炭素間の結合を破壊し、炭素化合物を放出する」という一連の崩壊現象の情報が不可欠である。この放出物の研究は行われているものの、固体材料側からの系統立てた炭素化合物発生機構が未解明のため、周辺プラズマ解析では観測からの推測値が用いられている。しかし炭素化合物放出量の観測実験には限界があり、十分なデータが揃っているとは言い難い。

そこで、我々は、分子動力学シミュレーションによりダイバータ設計に必要な炭素材破壊情報および周辺プラズマ解析に必要なダイバータからの炭素化合物放出情報の提供を目指すに到った。これまでにプラズマ・ダイバータ系の分子動力学研究は D. A. Alman 等[J. Nucl. Mater Vol.313-316 (2003) 182]や、E. Salonen 等[PRB60, (1999) R14005]などが行われている。しかし、これらの研究で用いられているポテンシャル[Brenner 等, J. Phys. Condens. Matter Vol.14 (2002)783] には、共有結合がつなぎ替わる際にエネルギー保存が破れるなどの不完全な点がある。そこで、我々はこのポテンシャルを修正し、平成 16 年度よりオリジナルなコード開発を目指してきた。



図 2.3.3.1-1 LHD で使用されたダイバータ・タイル

具体的な研究目標としては、LHD のダイバータ(図 2.3.3.1-1)での炭素化合物放出現象のシミュレーションからの情報提供を目指している。しかし、LHD のダイバータは炭素の多結晶状態であ

り、空間サイズも数十 cm の大きさになる。この空間サイズでの複雑な現象を、いきなり基礎物理方程式から扱えるシミュレーション法は現状では存在しない。そこで、我々は、原子レベルの運動方程式で記述するという方針の下、数十 nm のスケールでの階層ターゲットとしてシミュレーションを行ってきた。

成果として、グラフェン構造(図 2.3.3.1-2(a))[1, 2, 3, 4]、次に、グラフェンが複数枚集まってできるグラファイト構造(図 2.3.3.1-2(b)) [5, 6]各々の水素照射下での時間発展のシミュレーションが可能になった。これら成果の概要は、後述する。

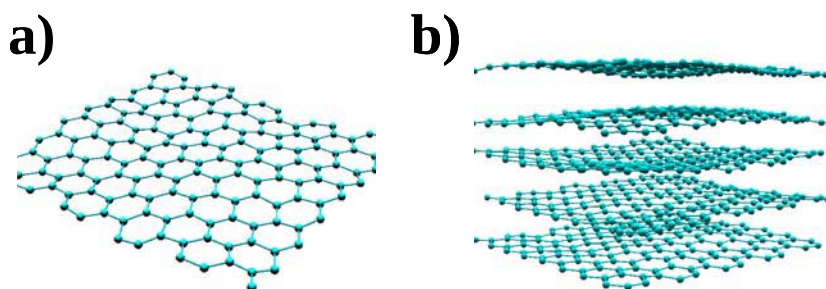


図 2.3.3.1-2. (a) グラフェンと (b) グラファイト構造

今後の課題としては、現時点での現実的なシミュレーションサイズと実際の実験室系との時間・空間サイズの隔たりを如何に克服するかという問題がある。現状で扱える階層での炭素構造体と水素の相互作用系でのシミュレーションの時空間でのサイズと、現実のダイバータ炭素材の時空間のサイズとの隔たりは、空間サイズでは 10^7 倍、シミュレーション時間では 10^{12} 倍にもなる。この隔たりを乗り越えて実空間での現象を取り扱うために、原子レベルからシミュレーションを構築するという基本方針のものとシミュレーション方法を改良・進化させながらも、一方では、本分子動力学シミュレーションより、マクロな階層でのシミュレーション技法であるプラズマ粒子シミュレーションへの連結を今後検討していく。

○ 単一水素原子-グラフェン間の反応(中村、伊藤)

水素と炭素材の反応の素過程を調べるため、グラファイトの基本構造であるグラフェンを用意し、それに水素を入射させた際(図 2.3.3.1-3)の相互作用の時間発展を分子動力学シミュレーションにより調べた。この課題で、独自に改良した Brenner のポテンシャルが有効に動作することが確認できた[1, 2, 3, 4]。

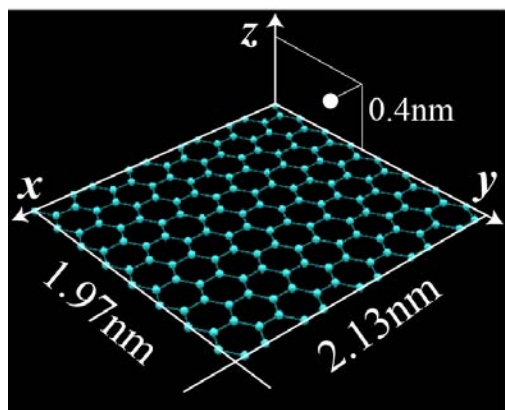


図 2.3.3.1-3. グラフェン
(ハチの巣状格子、水色)に水
素（白球）を入射する。 xy 方
向は周期境界条件を用いた。

具体的なシミュレーションでは、水素とグラフェン間の相互作用を散乱後の状態に応じて吸着・反射・貫通の三つに分類し、各々の反応率を図 2.3.3.1-4 のように得ることができた。

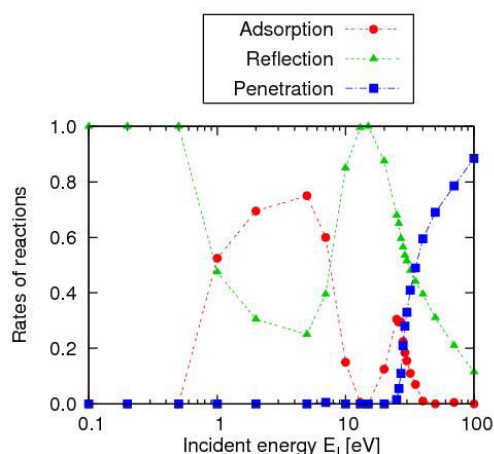


図 2.3.3.1-4. グラフェンの
水素原子に対する吸着率、
反射率、貫通率の入射水素
エネルギー依存性

入射水素原子の入射エネルギーごとに 200 回ずつシミュレーションを行い、水素原子がグラフェン中のある炭素原子と結合し一定時間以上振動を続けた場合は吸着反応、グラフェンとの相互作用の末に水素入射位置の方向へ飛んでいった場合を反射反応、入射水素と逆側の方向へ飛んでいった場合を貫通反応と分類し、この三種の反応が発生した割合をそれぞれ吸着率、反射率、貫通率と定めた。これら三つの反応率についての入射エネルギー依存性を得た(図 2.3.3.1-4)。この結果から入射エネルギー E_i によって起こりやすい反応が顕著に切り替わることがわかった。これらの反応を(1)反射反応: $E_i < 1$ eV, (2)吸着反応: 1 eV $< E_i < 7$ eV, (3)反射反応: 7 eV $< E_i < 30$ eV, (4)貫通反応: $E_i > 30$ eV の 4 つのエネルギー領域に分類し、反応のメカニズムを明らかにした。

○ 水素原子充满系におけるグラフェンの崩壊（中村、伊藤）

我々の開発した前述の分子動力学シミュレーションコードを用いて、グラフェンと水素の反応によるグラフェンの崩壊過程のダイナミクスを解明した[5]。

具体的なシミュレーションモデルとしては、グラフェンをブラウン運動する水素原子集団の中に浸し（図 2.3.3.1-5）、時間発展をシミュレートした。

結果として、グラフェン中の炭素間の sp^2 共有結合は、グラフェンの異なるサイドに水素が結合した場合にもっとも壊れやすくなることがわかった。一方、グラフェンの片側だけに水素が吸着してもなかなか炭素共有結合は壊されず、グラフェンの強度は保たれるということもわかった。

以上のように、グラフェン構造の崩壊チャンネルをシミュレーションにより解明した。

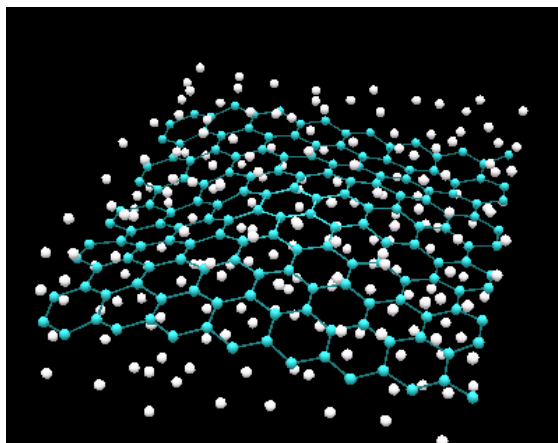


図 2.3.3.1-5. 炭素間共有結合の切断率の切断数依存性

○ グラファイトの水素原子照射(中村、伊藤)

グラフェンの集合体であるグラファイト(図 2.3.3.1-2)を考え、炭素構造の階層を一つマクロにしたシミュレーションを行った。現実の系に近づけ複数枚のグラフェンに水素フラックスを照射した際の反応を調べた(図 2.3.1-7)。水素原子が表面の炭素に運動量を与え、グラフェンを揺り動かす。やがて、表面と二枚目のグラフェンの層間距離が局所的に小さくなり、表面と二枚目のグラフェンが共有結合により新たに結ばれる。これがきっかけとなり表面と二枚目のグラフェンが壊れるという新たなグラファイト崩壊のメカニズムを見つけた。

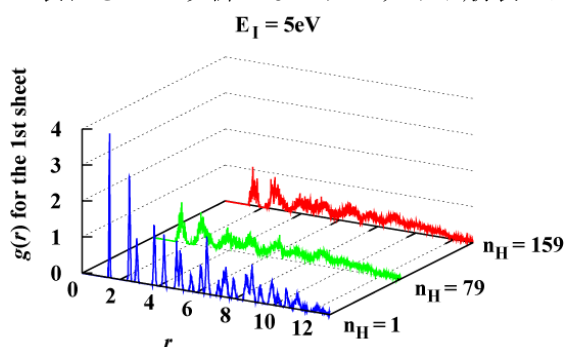


図 2.3.3.1-6 入射エネルギー5eV の水素原子を入射した際の、動径分布関数 $g(r)$ 。入射水素数 $n_H=1$ (青), 79(黄緑), 159(赤)の場合

このシミュレーションでは、定量的な解析のため構造解析によく用いられる動径方向の分布関数 $g(r)$ を秩序変数としてシミュレーション解析を行った(図 2.3.1-6)。ここで r は粒子間距離を表す。入射水素のエネルギーを 5eV にし、入射角度は炭素に垂直に固定し、位置をランダムに振って水素を一定間隔でひとつずつ打ち込む。入射水素数を 1 個、79 個、そして 159 個の場合の $g(r)$ を図 2.3.1-8 に示した。入射数が多くなるにつれ、 $g(r)$ のピーク値が小さくなっていく様子がわかる。ピークの存在は構造があることを示し、そのピーク値が小さくなることは、グラファイトの結晶構造が崩壊していくことを定量的に示した[6, 7]。

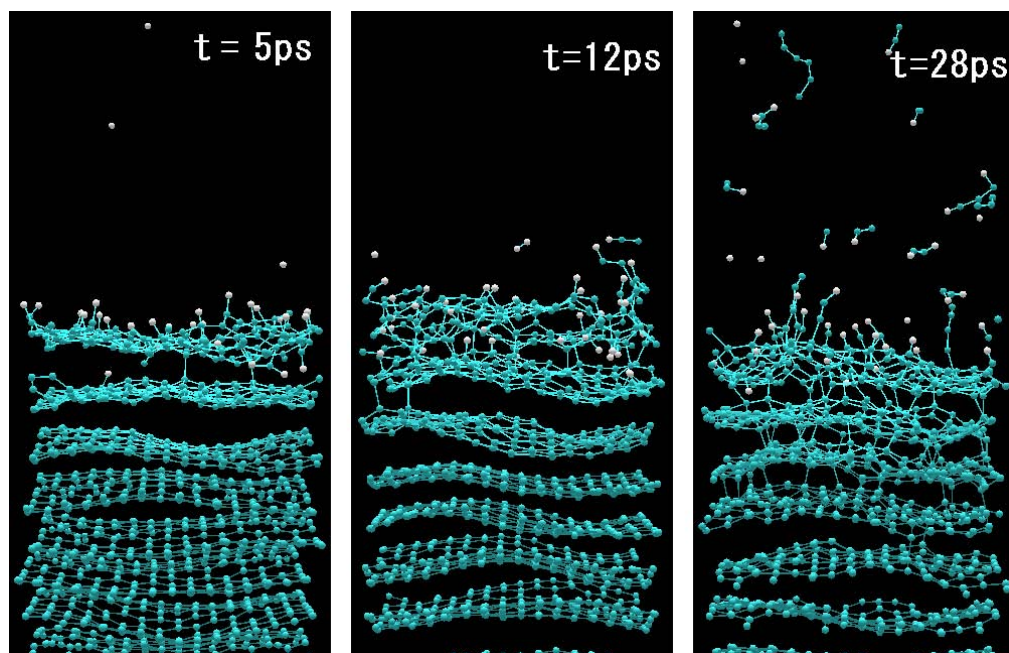


図 2.3.3.1-7. グラファイト（青色）に水素原子（白色）を照射した場合の表面の時間発展

[1] A. Ito and H. Nakamura:

“*MD simulation of collision between graphite and hydrogen on the diverter*”,
Journal of Plasma Physics Vol. 72 No.6 (2006) pp. 805-808.

[2] A. Ito, H. Nakamura and A. Takayama:

“*Chemical Reaction between Single Hydrogen Atom and Graphene*”,
Submitted to Journal of Nuclear Materials.

[3] H. Nakamura, A. Takayama, and A. Ito:

“*Molecular dynamics simulation of hydrogen isotope injection into graphene*”,
Contributions to Plasma Physics (accepted).

[4] A. Ito and H. Nakamura:

“*Molecular Dynamics Simulation of Plasma Surface Interaction*”,
20th ICNSP & US-Japan workshop, submitted to Communications in Computer Physics.

[5] A. Ito and H. Nakamura:

“*The Erosion of Graphene in Hydrogen Atom Gas*”,
Submitted to Japanese Journal of Applied Physics.

[6] H. Nakamura and A. Ito:

“Molecular Dynamics Simulation of Sputtering Process of Hydrogen and Graphene Sheets”,
Molecular Simulation Vol. 33 No.1&2 (2007) pp. 121-126.

[7] A. Ito and H. Nakamura:

“Molecular Dynamics Simulation of the Hydrogen Isotope Sputtering of Graphite”,
Thin Solid Films (accepted).

2.3.3.2. ブロブ輸送の 3 次元粒子シミュレーション (石黒)

周辺プラズマにおいて重要となる物理現象を解明するため、粒子吸収境界を持つ 3 次元静電粒子シミュレーションコードの開発を行い、典型的な物理現象である、ブロブの輸送のシミュレーションを行った。荷電粒子及び自己無撞着な電場は、通常の Particle-in-Cell 法を用い、壁などに吸収された粒子についてはフラグを立てて、計算から取り除くという取り扱いをしている。複数ノードからなるベクトル並列コンピュータであるプラズマシミュレータで効率的にシミュレーションが行えるように、ベクトル化、sxf90 の自動並列化機能を利用したノード内の並列化、および High Performance Fortran (HPF) を利用したノードをまたがる並列化を行っている。このコードを局所的な高密度領域であるブロブに伴う自己無撞着な電場生成と磁力線を横切る輸送現象の解明に適用した。

粒子反射壁を $x=0$ におき、 $x=L_x$, $z=0, L_z$ には粒子吸収壁おき、 y 方向は周期境界とした。外部磁場は z 方向を向いており、 x 座標が大きくなるに従ってその大きさは小さくなるように設定してある。この非一様磁場中に初期に高密度領域を持つプラズマを配置し、その時間発展を調べた。図 2.3.3.2-1 は x - z 面での電位分布図(a)、 z 方向の電位分布(b)、 x - y 平面での電位分布(c)及び y 方向の電位分布(d)である。磁場の不均一性のため電荷分離し、 y 方向に電場が形成されている。図 2.3.3.2-2 はイオンの密度分布の時間経過を示している。磁力線(紙面方向)を横切って、壁方向(左方向)に伝播している。その速度はおよそイオン音速の 10 分の 1 である。さらに、移動するに従って、変形し、中心付近にミクロな構造が現れる。

ブロブの輸送に関しては、モデル方程式によるシミュレーション例は多数あるが、3 次元粒子シミュレーションによる研究は他にはない。第一段階として、特別な仮定をおかず、単に初期に高密度領域を設定するのみで、自己無撞着に磁力線を横切る電場が形成され、その電場と外部磁場の効果により、高密度領域が磁場を横切って運動することを実証した。運動論的効果がこの運動、ブロブの変形や崩壊にどのように影響を及ぼしているかを調べていくことが次のステップとなる。

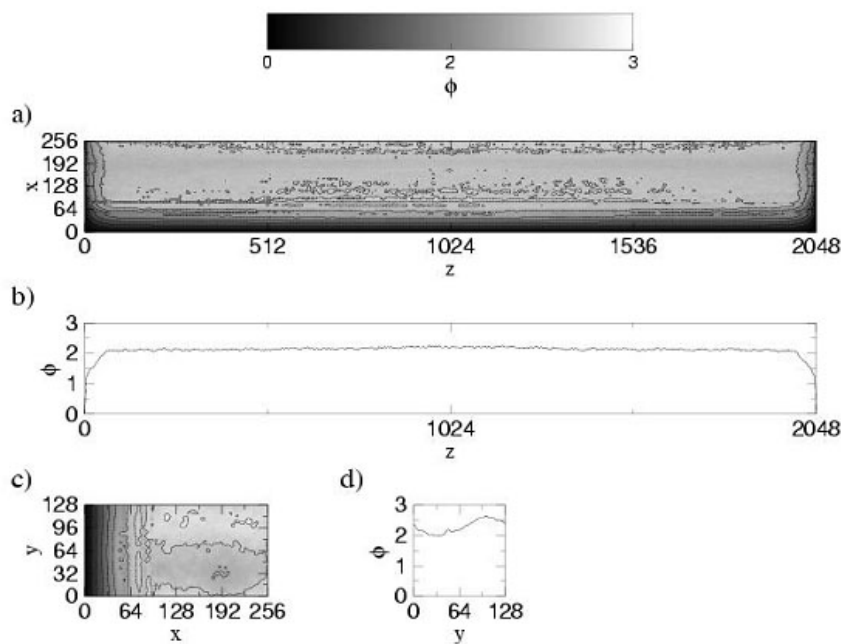


図 2.3.3.2-1 初期に、x-y に関して局所的に高密度領域を設け数プラズマ周期の時間が経過した後の電位分布。Y 方向に電位差が形成されている。この自己無撞着な電場と外部磁場による EXB ドリフトにより、高密度領域が-x 方向に運動する。

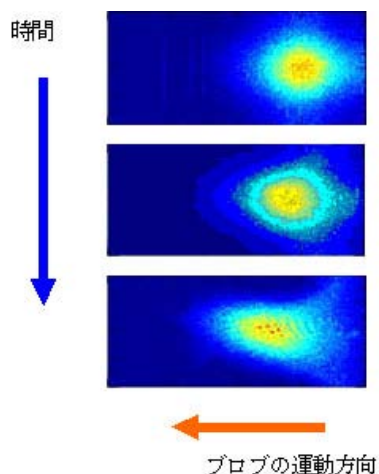


図 2.3.3.2-2 イオン密度分布の時間発展、高密度領域が左方向(壁方向)へ動いていることがわかる。速度はおよそイオン音速の 10 分の 1 である。

[1] S. Ishiguro and H. Hasegawa;

“Three-dimensional particle-in-cell simulation of scrape-off-layer plasmas,” Journal of Plasma Physics, vol. 72, Part 6 (2006) pp. 1233-1237.

2.3.4. ロードマップ

核融合プラズマでの様々な複雑現象を支配している基礎物理過程は、宇宙プラズマや応用プラズマ工学等の他の学問分野で対象となっている複雑現象の支配物理機構と多くの共通性を持っている。例えば、磁場閉じ込めプラズマでしばしば観測される鋸歯状振動は、太陽フレアや地球磁気圏での磁気サブストームを支配している磁気リコネクションと同じ機構であると考えられている。

る。また、閉じ込め装置の周辺領域で起こっているプラズマと物質との相互作用の成果は、宇宙プラズマにおけるダスト形成やプラズマプロセス等に応用可能であることが明らかにされてきた。さらに、これらの研究で開発を進めている「階層繰り込みシミュレーションモデル」をはじめとする多階層・複合物理シミュレーションモデルは、現代の学問が直面している重要課題である、ホリスティック（全体論的）視点による現象全体の総合理解にとって非常に重要な要素であると認識されるようになってきた。

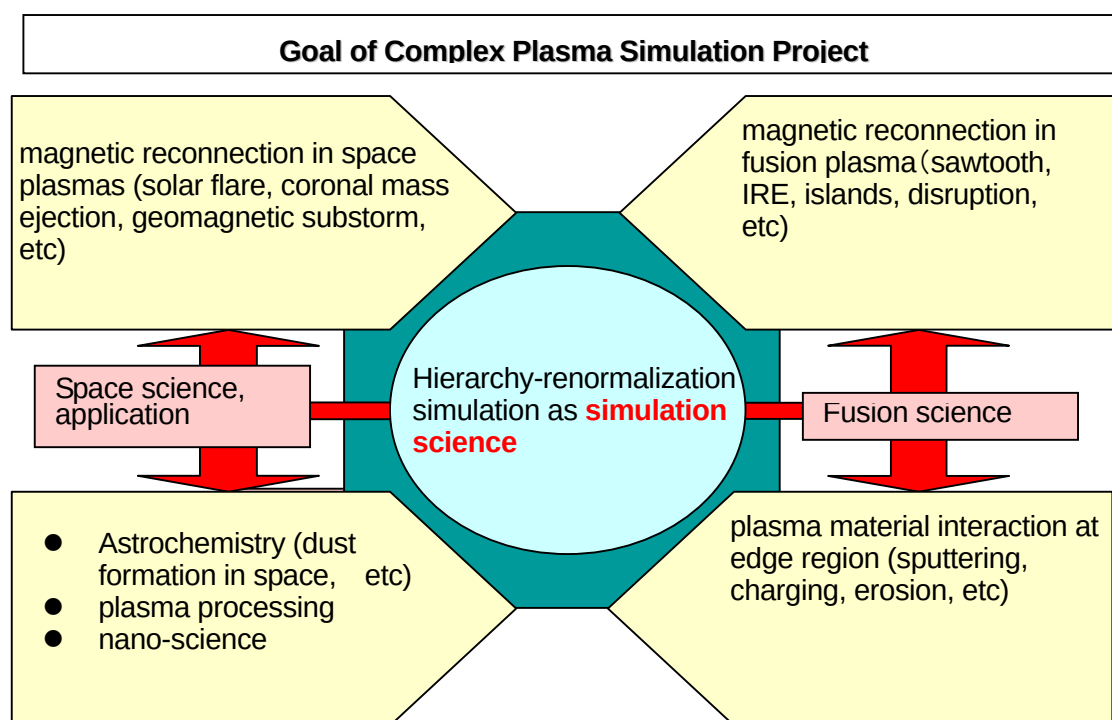


図 2. 3. 4-1 : 複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトの研究目標。

複雑性プラズマシミュレーションプロジェクトでは、1) シミュレーション科学として視点からの多階層・複合物理シミュレーション手法の開発、2) 磁気リコネクション現象およびプラズマ物質相互作用の基礎物理過程の解明、3) 核融合プラズマ、宇宙プラズマ、プロセスプラズマ等への応用、を順次進める（図 2. 3. 4-1）。

○ 磁気リコネクションの物理

自然界プラズマにおける爆発的なエネルギー解放現象である太陽フレアや地球磁気圏でのサブストーム（磁気圏嵐）を支配する磁気リコネクションの全貌解明を目標に、階層繰り込みシミュレーションモデルの構築とそれに用いた階層横断現象の解明を目指した研究プロジェクト「MARIS プロジェクト」を推進する。これまでの成果やコードの開発状況を踏まえ、マイクロ階層からのアプローチ（大谷、堀内）、マクロ階層からのアプローチ（田）、および、両階層を結合するための結合モデルの開発（宇佐見、大谷、堀内、田）の3方向からのアプローチを基本戦略とする。

● マクロ階層からのアプローチ（田）

磁気リコネクションの自然界の代表的な現象である地球磁気圏のサブストームへの適用を前提に、地球磁気圏のグローバルシミュレーションモデルの評価と、マクロ階層のアプローチの限界、粒子効果及び磁気リコネクション発生条件について調査・検討を行う。

サブストームのどの段階で粒子効果が重要になるかがこれまでの研究で大よそ明らかになって来たので、今後は磁気圏尾部での磁気リコネクション発生条件の際の、磁気圏内の条件、特に磁気圏と太陽風の磁場の状態について調べる必要がある。連続的な磁気リコネクションが可能になるためには、速いリコネクションが起きることも重要だが、リコネクションが1回起こった後も再度そのリコネクションが発生する条件を再生するメカニズムを明らかにする必要がある。技術的な点では、粒子効果を取り入れる準備として、粒子シミュレーションコードとの接続のために、局所的な MHD コードとの接続に向けてコード修正を行う。具体的な計画は下の通り。

第一段階（2008～2009）：

- ・ 局所的な MHD モデルをグローバルモデルに接続するための、シミュレーションモデルの修正。
- ・ 粒子効果が必須となる磁気リコネクション領域の時間空間上の領域の特定。

第二段階（2010～2012）：

- ・ 地球磁気圏尾部での磁気リコネクションの発生につながる地球磁気圏の磁場の形状の調査。
- ・ 局所 MHD とグローバルモデルとの接続の実行。

第三段階（2013～ ）：

- ・ 粒子効果を取り入れた、サブストーム現象のモデル化。

● ミクロ階層からのアプローチ（堀内、大谷）

階層繰り込みシミュレーションモデルの構築を目指して、ミクロ階層側の担当コードである開放系粒子シミュレーションコード（PASMO）の改良をマクロ階層側と連携して行う。それと並行して、ミクロ開放系における外部駆動型無衝突磁気リコネクションのミクロスケールの物理を解明する。

階層繰り込みシミュレーションモデルを磁気リコネクション現象に適応する場合、計算規模を今よりも少なくとも10倍程大きくする必要がある。平成19年～20年は、それに伴い、PASMOコードの大規模計算用に向けた改良を行う。これには、2つの課題がある。1つは、計算効率を向上させるための計算アルゴリズムの改良、他の1つは、物理サイズを大きくすることに伴う境界条件の整合性を取ることである。

物理課題としては、1）リコネクションのトリガー問題、即ち、圧力テンソルに代表される粒子運動論効果とプラズマ不安定性に伴う異常抵抗の関係を明らかにすること、および、2）磁場閉じ込めプラズマや地球磁気圏プラズマに応用する場合、3次元磁場構造、縦磁場、トロイディシティ等のリコネクションのミクロ物理機構への影響を調べる必要がある。平成19年～20年は、a）電流層でのドリフトキンク不安定の励起と、異常抵抗の成長に至る詳細な物理モデルの検証を行う。特に、「粒子質量比を現実値に近づけるとドリフトキンク不安定の成長率が減少する」

という理論予測とシミュレーション結果との比較を行う。b) 無衝突リコネクションの粒子質量比依存性を調べ、スキニング長やメアンダーリング軌道半径等の粒子運動論効果に特徴的な空間スケールと運動論的散逸過程やその空間構造との関係を調べる。c) 磁場拡散領域の3次元構造や縦磁場印加による磁気リコネクションへの影響の詳細を調べる。

平成21年度以降は、開発した連結コードを用いて、磁気リコネクションのマイクロ物理へのマクロ階層の物理の影響を評価する。また、磁場閉じ込めプラズマや地球磁気圏プラズマ等の具体的な問題への応用を始める。

● 連結モデルの改良（宇佐見、大谷、堀内、田）

平成19年度には、階層繰り込みシミュレーションモデルの接続テストとして、2次元、3次元の波の伝播をシミュレーションする。また、Alfvén波だけでなく、磁気音波などの粗密波がスムーズに伝播することを確かめる。

平成20年度には、磁気リコネクションの階層繰り込みシミュレーションの第一段階として、PICモデルの上流境界をMHDモデルと接続することに取り組む。MHD領域からプラズマをPIC領域へと流入させ、駆動型磁気リコネクションを起こすシミュレーションを考えている。

平成21年度以降は、さらに下流境界をMHDモデルと繋ぐことを考える。PICコードによって磁気リコネクションはシミュレーション研究されているが、下流境界において、イオン、電子が異なる振る舞いをし、速度分布がMaxwell分布を満たしていないという現象が観測されている。したがって、PICモデルの下流境界をどのようにMHDモデルと繋ぐかは今後の重要な課題である。磁気リコネクションの階層繰り込みシミュレーションモデルを完成させた後、最終目標として、我々のモデルを地球磁気圏や太陽フレアなどに適用したいと考えている。

○ 炭素材と水素の化学反応の分子動力学（中村）

2.3.3.1章のグラフェン1枚と水素原子の我々の結果および複数枚のグラファイト構造崩壊のシミュレーション結果をもとに、さらに、グラファイトのドメインが複数集まった多結晶構造の炭素構造に水素を入射した場合の崩壊プロセスを解明する。

平成19年度には、炭素に入射させる水素などの粒子の入射角度依存性やエネルギー分布などを変え、その依存性を調べる。平成20年度には、シミュレーションコードにグラフェン層間に分子間相互作用ポテンシャルを組み込み、グラフェンより一つマクロな階層にあたるグラファイト単結晶構造からの炭化水素などの生成機構解明を目指す。平成21年度以降は、単結晶グラファイトからさらに一つ階層を上げ多結晶グラファイト構造の水素原子照射シミュレーションを行う。また量子力学シミュレーションとの比較検討を始める。さらに、プラズマ粒子(PIC)シミュレーションとの連携の検討も並行して進めていく。

○ 多階層プラズマ物質相互作用シミュレーション（石黒、中村）

プラズマ物質相互作用の関わる様々な系、たとえば、プラズマによる物質創成、核融合プラズマの周辺領域などの振る舞いには、壁などの近傍での自己無撞着な電位構造の効果、中性粒子との相互作用、荷電粒子同士の衝突の効果などの効果、さらには原子レベルでの粒子と固体などの

相互作用の効果が重要となる。しかしながら、原子レベルのモデルやプラズマ粒子レベルのモデルで全体系を扱うことは多くの場合困難である。そこで、系全体に関してはマクロなモデルを採用し、必要に応じてミクロおよびメソスケールモデルと結合し、これらを自己無撞着に取り扱う多階層シミュレーションモデルを構築する必要がある。

平成 19 年度-20 年度

メソスケールのモデルを境界のあるプラズマに適用し、blob の輸送など自己無撞着な電場生成に関連した諸問題を解明する。

境界を通じての流体コードとの接続を考慮した粒子コードの開発をおこなう。

平成 21 年度以降

粒子コードと流体コードの結合を行う。さらに、壁近傍の粒子の振る舞いを分子動力学で取り扱うコードとの連携を検討する。

2.4. 仮想現実関連研究及びプロジェクト関連研究

2.4.1. 仮想現実関連研究

平成 16 年度～19 年も主に数値シミュレーション研究の可視化を中心として、研究を進めてきた。バーチャルリアリティ関連研究については、数値シミュレーションだけでなく一般的な 3 次元環境の構築・利用に関する研究も進めてきた。数値シミュレーションと関連した研究では、より使いやすく高度な利用が可能のように、ネットワークを利用した情報共有に主眼をおいた研究をすすめ、一般的な 3 次元環境の構築については、様々なコンテンツの表示や利用方法に関する研究を共同研究者とともにを行った。

一方で、これまで利用してきた大規模な没入型ディスプレイ環境だけでなく、いつでもどこでも数値シミュレーション結果を 3 次元で確認可能な裸眼立体視ディスプレイを利用した可視化研究にも取り組んだ。

1. ネットワーク利用のバーチャルリアリティ装置同士の接続（2.4.1.1.1 節） [1]
2. VR と数値シミュレーションの統合環境の構築（2.4.1.1.2 節） [2][3]
3. VR を使った設計支援環境の構築（2.4.1.1.3 節） [4][5]
4. 核融合シミュレーション結果の可視化例（2.4.1.1.4 節）
5. 裸眼立体視による 3 次元シミュレーションの可視化ライブラリ(2.4.1.2 節)[6][7][8][9]
6. 高いリアリティを持った LHD モデルの作成（2.4.1.3 節）
7. VR に関する共同研究（2.4.1.4 節） [10]
8. 今後の課題・計画（2.4.1.5 節）

2.4.1.1. 没入型ディスプレイの高度化に関する研究（田村）

2.4.1.1.1. ネットワーク利用のバーチャルリアリティ装置同士の接続

本研究は、計算機シミュレーション、バーチャルリアリティ（VR）、及び通信ネットワークの技術を有機的に結合し、それぞれの機能を最大限利活用し、従来発想し得なかった斬新・有用な材料・製品を創出する「広域仮想シミュレーション工場」の基盤を構築することを目的とし、平成 12 年から 16 年にかけて行ったものである。

異なった分野・領域で蓄積・開発された専門知識・ノウハウを高速ネットワーク接続された共有仮想空間内で相互に交換し、分野を越えた斬新な製品を提案・設計し、シミュレーションによって性能を検証・修正し、製品生産工程を提示しうる広域の仮想工場プロトタイプを主に分子シミュレーションを対象として研究開発することを目的とした。具体的には、共有仮想空間に自在に立体動画像を表現する操作性に優れたヒューマンインターフェイス、共有仮想工場の最適稼動のための通信技術の開発を行った。

情報共有を行う研究環境としては、核融合科学研究所の没入型ディスプレイ：Complexcope と

NTT サイバースペース研究所の没入型ディスプレイ : GAVA (NTT, 本田) の間をネットワークで接続した。また、高速ネットワークでの評価を行うため、ギガビットネットワークで構成された LAN 内での接続実験もあわせて行った。今回使用した没入型ディスプレイは CAVE 型のディスプレイであり、CompleXscope, GAVA とともに 4 面 (正面, 左右, 床) のスクリーンから構成されている。

3 次元環境の共有にあたっては、これまで開発を進めてきたソフトウェア VFIVE (地球シミュレータセンター, 陰山, 大野) にネットワーク通信機能を組み込むこととした。このソフトウェアを利用することで、VR 空間に表現されたシミュレーションデータに与えられた様々な操作を、遠隔接続されている他地点に瞬時に転送し、3 次元オブジェクトの共有を可能としている。また、ユーザーの音声データの転送も同時に行い、遠隔地間で対話しながら、数値シミュレーション結果について議論を行うことが可能な環境を構築した (NTT, 本田)。さらには、他地点のユーザーの位置データを送受信し、他地点のユーザーをビデオアバターとして空間内に描画することで、遠隔地のユーザーが着目している部分が即座に認識可能なシステムを構築した。これらの開発により、遠隔地間でのコラボレーションを可能とした。図 2.4.1.1.1-1 に空間共有の例を示す。図に示すように、共有された数値シミュレーション結果と遠隔地にいるユーザーが CG で表示されている。今回実験を進めた結果、数値シミュレーション結果共有の場合、写真等を使って臨場感を出すよりもむしろ、相手がどの部分に着目しているのかというシンプルな情報を共有することや音声で意思を伝えるといったことの方が重要であった。図 2.4.1.1.1-2 に今回通信速度評価に用いた映像を示す。3 種類の映像で評価した。

- 1) 遠隔地のユーザーの CG のみ
- 2) 50 本のラインと等高線
- 3) 50 本のラインと等高線・5000 点

これらの処理を行ったとき、遠隔地にあるサーバとの通信速度およびそのときの描画速度を調べた。表 1 に結果を示す。この結果を見ると通信速度は実験 3 の場合で 21.0 回/秒と自然に映像を見るには十分に高速であり、通信速度が描画速度に影響をあたえない程度に高速な通信環境を構築できた。

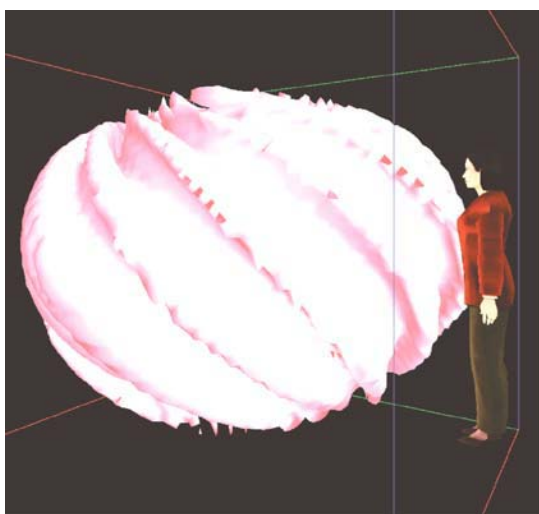
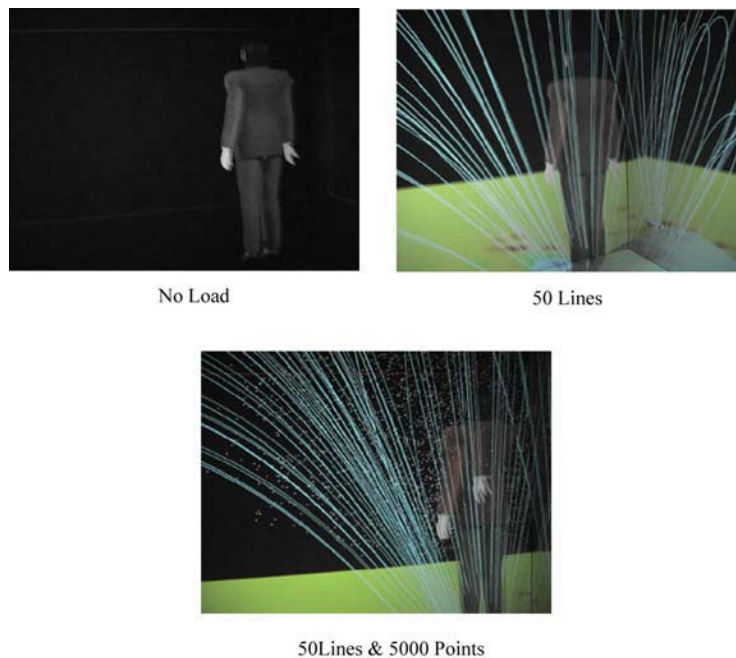


図 2.4.1.1.1-1 空間共有の例

表 2.4.1.1.1-1 通信速度評価結果

	1	2	3	
描画レート	86.5	86.2	78.1	
コマンド通信レート	22.8	22.0	21.0	回/秒



2.4.1.1.2. VRと数値シミュレーションの統合環境の構築

本研究では、数値シミュレーションとネットワーク・VR 技術を有機的に結合し、統合的な数値シミュレーション環境を構築することを目的とした。数値シミュレーションの可視化技術、特に没入型バーチャルリアリティシステムを用いた可視化で最も欠けていたものは、即時性と考えた。シミュレーション研究者が研究を進めていく場合、特に大規模な計算を行う場合には、計算を行うコンピュータと可視化を行うコンピュータは別であることが一般的である。すなわち研究者は数値シミュレーションによって得られた結果データの可視化とその結果から問題点を抽出し、再計算を行うという作業を別のコンピュータ、時には別の場所で行う必要がある。このため、シ

ミュレーションの実行と可視化の作業がスムーズにつながらないという問題が生じている。この問題を解決するために、可視化用コンピュータと計算用コンピュータをネットワークで接続し、3次元映像を見ながら直感的にシミュレーションのパラメータを変更し、変更された情報をもとに所望の結果が得られるまで何度も再計算・可視化可能なシステムの構築を目的とした。

本システムはシミュレーションを行う計算プロセス（計算用コンピュータ）と可視化を行う可視化プロセス（可視化用コンピュータ）、すべての情報を統括するサーバプロセスからなるサーバクライアント型のシステムになっている。計算プロセスに関しては、1つのクライアントプロセスからの接続のみを考慮している。一方可視化プロセスに関しては、複数のクライアントからの接続を考慮している（図2.4.1.1.2-1）。可視化側プロセスでは、計算側からデータが送られてくるのを待ち、データが到着次第、即座に可視化し、没入型ディスプレイに表示する。ユーザーはプロセス間で共有されているパラメータを自由に変更することが可能である。ユーザーがシミュレーションの途中経過に満足しない場合、パラメータをVRシステム内でインタラクティブに変更する。変更されたパラメータは計算用コンピュータに直ちに送信され、再計算を行い、結果を順次可視化側コンピュータに送り返す。このシステムによりシームレスなシミュレーション・可視化環境を実現している。

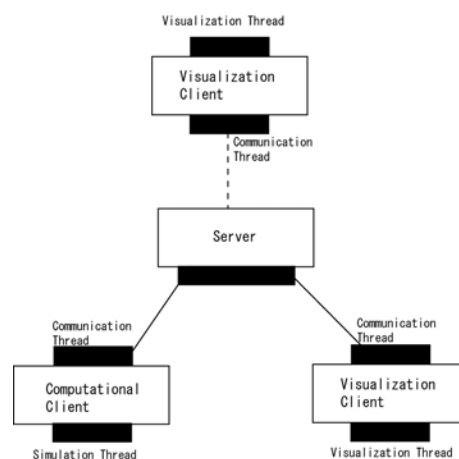


図 2.4.1.1.2-1 通信プロセス構成図

計算用コンピュータから可視化用コンピュータに送られるシミュレーション結果データの送受信間隔は、計算プロセスにおける出力間隔に依存する。つまり、シミュレーションコードに依存する。当然ながら、出力間隔が短くなればなるほど、また転送データ量が多くなればなるほどネットワークによる遅延が大きくなる。データ転送によるオーバーヘッドが大きくなるとローカルのコンピュータで計算・可視化を行う方が有利であるが、一方で可視化プロセスに与える影響が大きくなり、描画速度が遅くなるという弊害がある。今回使用したシミュレーションコードは実時間約1秒間隔で結果を出力させ、一度に送信するデータの瞬間最大値が280kByte程度であったため、遅延は起こらず、むしろ計算と可視化を分けた利点が大きかった。

本研究では、数値シミュレーションと3次元可視化を有機的に結合させるため、VRシステム空間から数値シミュレーションを行うことが可能な統合システムを構築した。本システムにより、可視化しながら様々な計算を行うことが可能となった。

2.4.1.1.3. VRを使った設計支援環境の構築

近年 3 次元 CAD を利用した設計が一般的なものになり，大規模 VR 装置を利用した設計の試みも様々な分野で行われている．設計に VR システムを使う主たる目的は，2 次元で表現されている物体を 3 次元空間に拡張し，より自然に物体形状を理解しようとするにある．しかし，高度な設計での利用を考えた場合，3 次元で観察できるのみでは実用的でなく，それぞれの部品の整合性等を十分に検討可能な環境である必要がある．具体的には，それぞれの部品同士が干渉していないか，新しい部品を設置する際に，以前からある部品と整合性が取れているか否かなどである．近年の 3 次元 CAD では，干渉を判定する機能があるものもあり，設計時のミスを低減する効果を上げているが，本研究では，VR 装置で立体視を行った状態での利用を考えているため，このような機能を利用することはできない．また，自然な操作を実現するために，リアルタイムで衝突判定を行う必要もある．そこで，本研究では没入型 VR 装置に衝突・干渉判定機能を組み込み，リアルタイムで干渉判定可能なシステムを構築した．

衝突・干渉に関する研究は昔から頻繁に行われてきた．特にゲーム制作に代表されるようなリアルタイムで衝突の判定が必要な分野での研究が盛んに進められてきた．また，近年のコンピュータ高速化にともない，複雑な形状同士の干渉の判定が可能となってきた．しかし，これらの研究では凸多面体同士の干渉を扱ったものであり，凹形状の干渉を考慮していない，もしくは非凸形状のオブジェクトを凸形状オブジェクトに分割し，干渉計算を行ったものであり，厳密な解が得られないという問題がある．今回このような問題を解決可能な干渉計算エンジンを有したシステムを構築した．大規模データを処理する場合に一般的な干渉計算エンジンに利用される形状データをボクセル形状で表現し，領域分割しながら判定するという方法でなく，ポリゴンベースの形状同士の干渉計算を行うこととした．ポリゴンベースで干渉計算を行うことで，高精度・高速な処理が行えると期待できる．また，非凸面での干渉計算も可能であるという特長もある．この衝突干渉エンジンを利用し，以下のシステムを構築した．

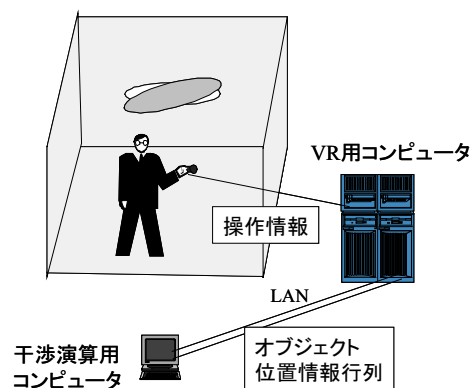


図 2.4.1.1.3-1 システム構成

図 2.4.1.1.3-1 にシステム構成を示す。システムは VR 装置と VR 用コンピュータおよび衝突判定用コンピュータからなり、コンピュータ同士はネットワークで接続されているものとする。形状データはあらかじめ 3 次元 CAD で作成された物を利用する。このデータを読み込み、後の処理を高速に行うための前処理を行う。具体的には重複している頂点を削除し、閉じていないオブジェクトを閉じる処理を行う。ここで、閉じていないオブジェクトとは全てのポリゴンの各辺がちょうど 2 つのポリゴンによって共有されていない場合やポリゴン同士が交差している状態をいう。そのような状態でない場合にオブジェクトは閉じているとする。これらの前処理を行った後、干渉計算パラメータ、例えば干渉が始まったと見なす距離の大きさ等を元データのサイズに従って決め、VR および干渉計算それぞれのコンピュータ用のコードを自動的に書き出す。

次に、データの受け渡しについて述べる。それぞれのコンピュータにはあらかじめ上記の形状データが保存されているものとする。この形状データは操作可能なオブジェクト（操作オブジェクト）と操作することができない静的なオブジェクト（静止オブジェクト）にあらかじめ区別されている。ただし、この属性は操作途中で変更することが可能である。VR 装置で操作者が操作オブジェクトを移動させると、その移動および回転情報がモデルビュー行列の形で干渉判定計算用コンピュータに送られる。干渉判定計算用コンピュータでは、送られてきた行列を元に、干渉の有無を計算する。干渉が起こっている場合、干渉深度ベクトルの逆行列すなわち現在の干渉を解消する行列を VR 用コンピュータに送り返し、VR 用コンピュータでは現在のシーンにこの行列を適用し、生じている干渉を解消する。この処理をリアルタイムで行うことにより、違和感なく干渉を確認しながら部品を操作することが可能となる。

次に核融合炉設計への応用例を示す。核融合炉は追加される部品や装置が非常に多く、部品同士の整合性を取ることが重要となる。新たな部品（機器）を導入する際には、光造形等で作成した 3 次元モデルを使って整合性を確認する作業などを行っているが、モデル作成に時間がかかり、頻繁に形状を変化させ検討するということが難しいという問題がある。そこで、部品の組み付け検討に本システムを適用したシステムのイメージを図 2.4.1.1.3-2 に示す。図中の緑色の物体が操作対象オブジェクトを示す。

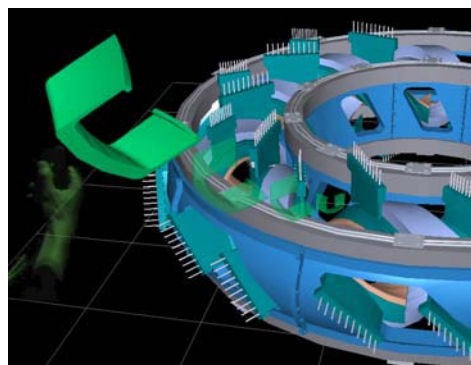


図 2.4.1.1.3-2 部品組み付け作業への応用例

このモデルで、干渉計算速度の評価を行った。評価結果を図 2.4.1.1.3-3 に示す。横軸にポリゴン数、縦軸は計算速度を示す。グラフに示されているのは、実際に干渉が起こっている場合の計算速度であり、干渉が起こっていない場合のデータは含まれていない。また、評価に使用したモデルの総ポリゴン数は 385,806、総頂点数は 96,942 であった。これらの値は固定し、操作オブジェクト、静止オブジェクトのポリゴン数を変更し、評価を行った。

全体のポリゴン数を固定することで、描画側の大幅な遅延による干渉計算への影響を排除することが可能となると考えられる。このグラフを見ると、操作対象オブジェクトのサイズに依存せず、どのような場合でも平均して 60Hz 程度の頻度で干渉計算が行われていることがわかり、十分な計算速度が得られていることがわかる。一方で最悪の状態では数 Hz～10 数 Hz 程度にまで計算速度が落ち込む場合も観測されている。しかし、このような速度が観測されたのは最も長いもので 0.5 秒間という非常に短い時間であり、実際操作をしている時に遅延は全く感じなかった。また、このような速度が観測されるのも 10 回から 20 回程度の干渉の試行に一度程度の割合であり、ほとんどの時間帯では平均値付近の計算速度を保っていることが確認できた。

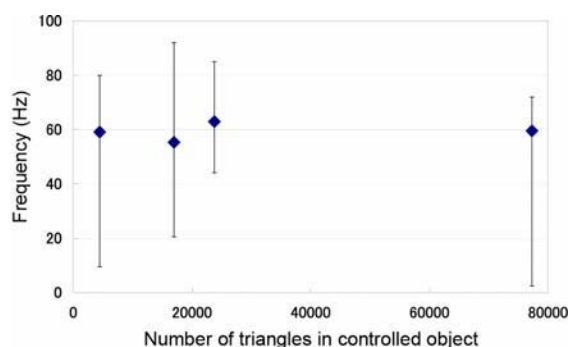


図 2.4.1.1.3-3 評価結果

本研究では、バーチャルリアリティ空間において、リアルタイムで干渉を判定・解消し、実際に設計に役立てることが可能なシステムを提案した。また、実際に本システムを利用した例について示した。本システムを利用することで、部品の設計評価が早くなり、設計工程の効率化につながると考えられる。

2.4.1.1.4. 核融合シミュレーション結果の可視化例

LHD 中の MHD 不安定性のシミュレーション研究(Sect.2.1.2.1「高精度 MHD コード、共通 MHD コード」参照)で得られたシミュレーションデータを、ComplexXcope システム上で、AVS for CAVE を用いて可視化している。AVS for CAVE は、シミュレーションで得られたデータを円滑に可視化するために、旧理論・シミュレーション研究センターが株式会社ケイ・ジー・ティーとの共同で開発したソフトウェアである。これは、3 次元可視化ソフトウェア AVS を ComplexXcope 上で立体的に可視化し、操作ボタン” WANDA” でズームイン・ズームアウト等の基本的な操作を可能にするものである。

下の2枚の図は、AVS for CAVE で表示した図形を、WAND でズームイン／ズームアウト、平行移動、回転操作などを加えているところである。

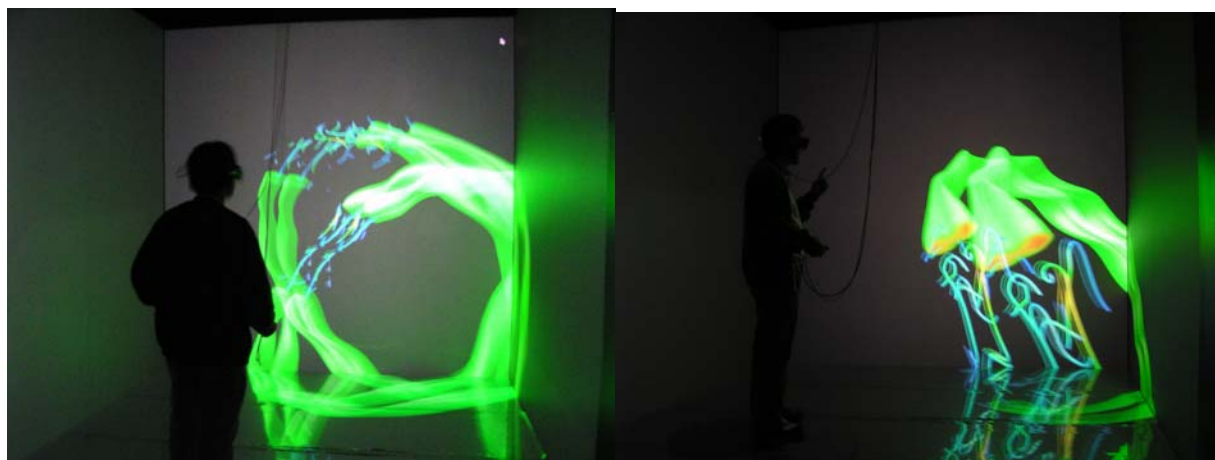


図 2.4.1.1.4-1

(左) オブジェクトの回転、ズームイン・ズームアウト操作、角度、距離など最適な位置を探す
(右) 固定した位置で角度（頭の位置）を変えつつ可視化状況を見る写真では離れた位置に流線や圧力の等値面が描かれているが、WAND を持ったオペレータからは、すぐ目の前に浮かんで見えている

2.4.1.2. 裸眼立体視による3次元シミュレーションの可視化ライブラリ（田）

3次元数値シミュレーションの大きな課題の一つは、結果の解析やコード開発、またプレゼンテーションに必須となっている可視化が挙げられる。3次元データの可視化は、平面内に留まる2次元でなくて、3次元で行う方がデータ取捨がないため望ましく、さらには奥行き（視差の深さ）を感じられる立体視が理想的である。核融合研に既にあるCAVEは没入感があり、視点を選ばずにどこでも無理なく立体視が可能という優れた可視化システムである。一方で、装置が大規模であり、またオペレーションに高速計算機を要するなど、シミュレーション結果の解析やコード開発に適していると言い難い。そこでノートPCでも立体視が可能で、また眼鏡などの装置が不要な、裸眼立体視による3次元可視化ライブラリを開発した。

これまで、地球磁気圏のリアルタイム3次元シミュレーター(図2.4.1.2-2)の可視化システムとしてこのモデルの座標系に特化したグリッド構造のみ対応していたため汎用性がなかったが、これをXYZ、円柱(図2.4.1.2-3)、トーラス、ヘリカル座標系(図2.4.1.2-1)へと拡張し、またこれまでになかった機能（磁力線の視点を任意に設定、自動動画作成など）を追加した。このライブラリは、フリーソフトウェアのみで構築されているので、共同研究者など希望者への自由配布が可能である。

立体視は、左右の目用に異なる画像が必要だが、裸眼立体視はこの複数画の分離を見る人が付ける装置ではなく、ディスプレイ側で行う。従って通常のノート型PCではなく専用のPCが必要

であるが、価格は通常の PC と大きな差はない。但し立体感覚を得られる視点が限られていることと、没入感があまり深くないことが短所となる。しかし当初の目的である解析などでシステムの動作が比較的軽いことと、ライブラリ自体がフリーソフトウェアであることは、研究の支援で大きな長所と言える。

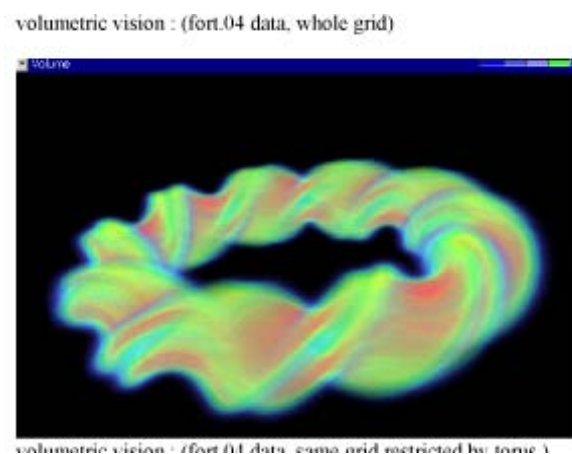


図 2.4.1.2-1 ヘリカル座標系を用いた MHD シミュレーション

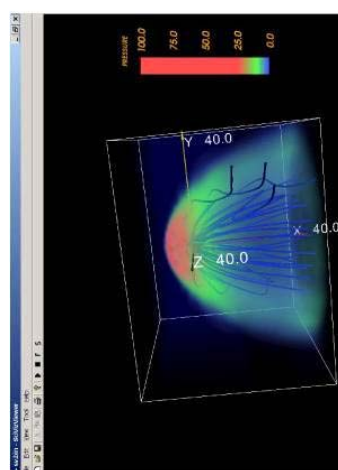


図 2.4.1.2-2 変形球座標系を用いた地球磁気圏の MHD シミュレーション

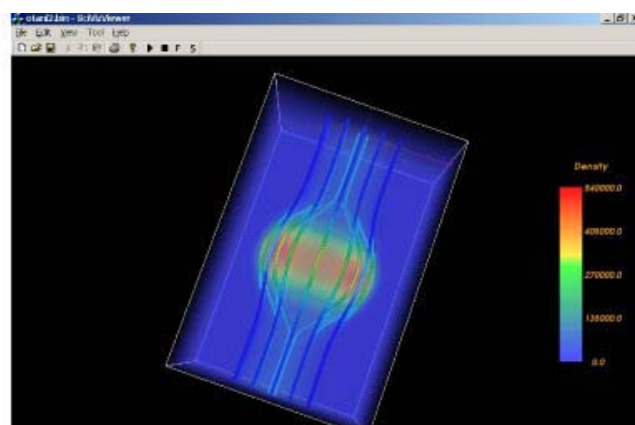


図 2.4.1.2-3 円柱座標系を用いた電磁粒子シミュレーション

共同研究者

桑原匠史 (Advanced. Comp.), 田中高史 (九州大学), 堀内利得, 三浦英昭, 大谷寛明

2.4.1.3. 没入型VR装置におけるよりリアリティのあるLHDモデルの作成 (田村)

これまで核融合研の没入型 VR 装置で表現される立体像は, 基本的に数値シミュレーションデータの可視化を目的としていたため, 写実的というよりはいかにもコンピュータグラフィックスというような三次元像を提示したものであった. 本研究課題では, 数値シミュレーション結果というよりは, LHD 装置自体をより写実的に再現し, より深い没入感・臨場感を持って観察できるモデルの構築を行う. 詳細データは研究所所有の 3 次元 CAD (Pro Engineering) のデータを用いた. 詳細なデータは莫大な記憶領域とポリゴン数が必要となり, 全てのデータを常に描画していると現在のコンピュータの能力ではリアルタイムでスムーズな映像を見ることはできない. そこで, 観測者から見えているところ見えていないところを適切に判断し, 描画領域を最適化し, リアルタイムでの表現を行った. また, 反射率の高い材質からなる LHD 内部構造の可視化にあたっては, 周辺物の映り込みも考慮したモデリングを行った. モデリングは Pro Engineering のデータを Deep Exploration にて 3D max 形式に変換し, 変換後のデータを Virtools で読み込み, 3 次元環境に適應するようオーサリングした. 本システムで作成した LHD 内部構造の可視化した例を図に示す.



図 2.4.1.5-1 LHD 内部構造の写実的な可視化

2.4.1.4. 他研究機関・大学との共同研究 (田村)

○ 立命館大学 (仲田)

より詳細で美しい CG 像作成のために近年陰関数を用いた表現方法が注目されているが, 非常に計算時間が長く, リアルタイムで描画することは非常に難しいが, リアルタイムで描画可能なアルゴリズムの研究を進めており, 最終的には没入型 VR 装置内での陰関数表現によるリアルタイム描画を目指し, 理論共同研究の枠組みの中で共同研究を進めている.

陰関数曲面は、形状表面の点群データからその補間曲面を自動的に生成する際に有効な形状表現方法であり、計測データに基づくモデリングに適した手法である。高精度の形状表現が求められる場合、3次元スキャナにより取得する形状表面の点群は数十万点程度の大規模なデータを想定する必要があるが、一方、点群データから構成される曲面モデルは少ないデータ量で表現されることが望ましい。この生成曲面の精度とデータ量はトレードオフの関係にあるため、利用目的に応じて適切な許容誤差を設定する必要がある。そこで、様々な形状パラメータを変化させデータ削減量と像との関係を定量的に調べた。

○生理学研究所（柿木）

人間の顔を3次元スキャナにより空間および色情報を持った情報として取得し、それを没入型バーチャルリアリティ装置内で投影した。人の顔を見たときに心理変化を観察するために使用。（3.2.4に詳述）

○京都工芸繊維大学（藤原）

高分子シミュレーション結果の3次元可視化に没入型VR装置を用いて可視化を行った。

○埼玉工業大学（井門）

AVS for CAVEをとおして、埼玉工業大学の没入型ディスプレイで作成されたデータを核融合研でも可視化可能にした。

○埼玉大学（深堀，長谷川）

埼玉新都心の景観および大学の景観を没入型ディスプレイで観察可能な環境を構築した。

○独立行政法人情報通信研究機構

無衝突プラズマの代表的な現象である惑星間空間衝撃波は、同時に宇宙天気の良い重要な現象の一つでもある。衝撃波予測の為のシミュレーションシステムを改良し、より高精度化を目指す。またシミュレーション結果を評価し、予報の解析のため情報を得るために、計算格子に対応した3次元可視化手法の研究を行っている。

2.4.1.5. 今後の課題および計画

1997年にCompleXcopeを導入以来、様々な機能の付加、システムの改善・構築を行い、また同時に様々なソフトウェア、ヒューマンコンピュータインターフェイスの開発を進めてきた。本年で丸10年という節目を迎えたが、この10年間にVR可視化され蓄積された様々なコンテンツ、およびCompleXcopeでは見ることはできないが、これまで長年にわたって蓄積された様々な3次元データが存在する。これらの3次元データは残念ながらデータ同士の互換性が乏しく、同時に見ることができないデータがほとんどである。現状、同時に3次元モデルを見るためには、それぞれのスクリーンショットを撮影し、2次元イメージを組み合わせて初めて見ることがで

きるといった状況である。これは3次元データ形式が2次元データ形式と比較して多岐にわたっている上、VR可視化手法が非常に多く提案されており、全く集約されていないことが原因である。この状況はシミュレーション科学研究部に限ったことではなく、バーチャルリアリティ装置を使っている世界中全ての機関に当てはまる問題であるといえる。そこで、今後はこれら様々なデータ形式を持つ3次元データを同時に観察することが可能なプラットフォーム（ミドルウェア）の開発が必要となってくる。例えば、CADで作られた形状データと数値シミュレーション結果を同一の3次元空間（特にVR空間）ですぐに観察するといったことは現状難しいが、それらのデータのマージにできるだけ負担がかからない処理が可能なシステムの検討を進めていく。

(参考文献)

- [1] Y. Tamura, A. Kageyama, H. Nakamura, N. Mizuguchi and T. Sato: “Collaborative virtual reality space for analyzing numerical simulation results” *Journal of Plasma Physics* Vol. 72 Issue 06 (2006) pp. 1065-1068.
- [2] Hiroaki NAKAMURA and Yuichi TAMURA: “Phase Diagram for Self-assembly of Amphiphilic Molecule C12E6 by Dissipative Particle Dynamics Simulation” *Computer Physics Communication* Vol. 169 (2005) pp. 139-143.
- [3] 田村祐一, 中村浩章, 大野暢亮: “没入型 VR 装置と数値シミュレーションの統合環境の構築” *電気学会論文誌 C* Vol. 126-C No.3 (2006) pp. 401-402.
- [4] N. Mizuguchi, Y. Tamura and A. Sagara: “Development of Reactor Design Aid Tool Using Virtual Reality Technology” *Fusion Engineering and Design* Vol. 81 Issues 23-24 (2006) pp. 2755-2759.
- [5] 田村祐一 松本壮樹 植木平八 水口直紀: “没入型バーチャルリアリティシステムにおける干涉判定機能を有した設計支援環境の構築” *電子情報通信学会論文誌 D* Vol. J90-D No.10 (2007) pp. 2927-2931.
- [6] M.Den, T.Kuwabara, T.Ogawa, T.Tanaka, I.Goncharenko and H.Amo: "A Glassless Stereo-type Visualization System for 3D MHD Real-Time Earth's Magnetosphere Simulator", *Journal of Plasma Physics*, Vol.72, Issue06 (2006) pp. 837-840.
- [7] M.Den, T.Kuwabara, T.Ogawa, T.Tanaka, I.Goncharenko, H.Amo: "A 3D Visualization System for Real-Time Space Weather Simulator with a Glassless Stereoscope", *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, Vol.53, No.1 (2006) pp. 151-157.
- [8] 田光江, 桑原匠史, 小川智也, 田中高史, I.Goncharenko, 天羽宏嘉: “裸眼立体視によるリアルタイム宇宙天気シミュレーターの3次元可視化システム”, *情報通信研究機構季報*, Vol.52, No.1 (2006) pp. 135-140.
- [9] Shroeder, W. et al.: *The Visualization Toolkit*, 3rd Edition. Publ. Pearson Education Inc., 2002.
- [10] S.Fujiwara, T.Itoh, M.Hashimoto and Y.Tamura: “Molecular dynamics simulation of micelle formation in amphiphilic solution” *Molecular Simulation* Vol. 33 Nos. 1-2 (2007) pp. 115-119.

2.4.2. プロジェクト関連研究

2.4.2.1. アルゴン換気シミュレーション（三浦）

核融合科学研究所では、重水素を用いた実験を行うことを計画し、重水素実験準備室が中心となって安全評価などを行っている。放射線にかかわる課題の一つとして、大気成分に含まれるアルゴンが中性子線を受けて放射化することが挙げられた。このアルゴン放射化の対策の一つとして、LHD 本体棟に、アルゴンを含まない人工空気を流入させ、この人工空気を以って本体棟内の空気を置換することが提案された。平成 18 年度、シミュレーション科学研究部（当時は理論・シミュレーション研究センター）では、LHD 研究への協力の一環として、本体棟内の空気流入・置換シミュレーションを実施する事にした。

商用コードによる先行シミュレーション

上記のシミュレーションを行うためには、LHD 本体棟の形状・ダクトによる流入・流出条件などを設定でき、乱流モデルと組み合わせて実環境レベルのレイノルズ数のシミュレーション可能な非圧縮性流体コードが必要である。本案件が重水素実験準備室より打診された段階で、旧理論・シミュレーション研究センターには適切なシミュレーションコードがなかった。全く新規にシミュレーションコードを作成するには数ヶ月の開発期間を要すると見込まれたため、コードが完成するまでの期間、商用コードを用いて先行シミュレーションを行う事になった。商用コードとして FLUENT (フルーエント・アジアパシフィック株式会社製) を選定し、大気中のアルゴンをパッシブスカラーとして扱う $k-\epsilon$ 乱流モデルシミュレーションを開始した。図 2.4.2.1-1 は、FLUENT を用いて行った先行シミュレーションによる本体棟内アルゴン総量（初期値を 1 に規格化）の推移である。計算は安定している一方、計算速度の低下（誤差の蓄積によるポアソンソルバーの反復回数の増加などに起因する）が発生したため、時間刻みの設定変更などの対策を講じた。この計算は現在も続行中である。

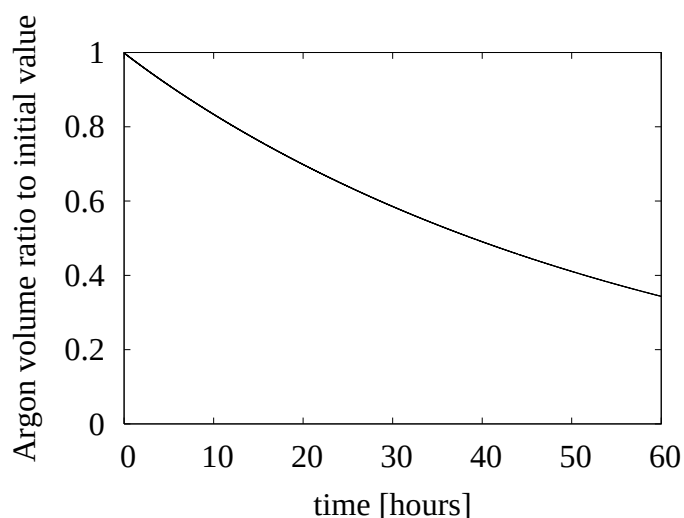


図 2.4.2.1-1 : FLUENT による LHD 本体棟内アルゴン量のシミュレーション。本体棟内のアルゴン総量の初期値を 1 とする規格化を行った。格子点数約 50 万点、計算時間は約 12 ヶ月。

非圧縮性乱流・k-ε コードの開発

LHD 本体棟内のシミュレーションを行うには、ダクトの位置などを比較的自由に設定できる事、円形ダクトや内部構造物に合わせて座標系が比較的自由に設定できることなど、物理研究のシミュレーションとは異なる要求が生じる。この要求に合わせるため、Navier-Stokes 方程式、連続の式、k-ε モデル方程式、パッシブスカラーの方程式

$$U_i = \langle u_i \rangle, \quad \tilde{u}_i = u_i - U_i; U_i = \langle u_i \rangle, \quad \tilde{p} = p - P$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \right],$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = S - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{C_{\varepsilon 1} S - C_{\varepsilon 2} \varepsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right],$$

$$S = 2\nu_T S_{ij} S_{ij}, \quad \nu_T = f_\mu C_\mu k^2 / \varepsilon,$$

$$f_\mu = \exp \left[\frac{-3.4}{(1 + R_T / 50)^2} \right]; \quad R_T = k^2 / \varepsilon,$$

Standard model: $C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3$

(Jones and Launder 1972, Launder & Sharma 1974)

を、一般座標で記述し、これを、陽解法の場合には Runge-Kutta-Gill 法、陰解法の場合には Crank-Nicolson 法と 2 次精度 Adams-Bashforth 法の組み合わせで解く事にした。商用コードよりも十分迅速に計算を行う事が求められるため、核融合科学研究所の LHD 数値解析システムでの計算を想定し、ベクトル化などの配慮を行いつつプログラムを作成した。

平成 19 年 10 月末の段階で、最も簡単な直交非一様座標におけるシミュレーションコードが完成し、現在試験的な計算を実行している。図 2.4.2.1-2 に、この計算の実行例を示す。今後、完成度を高めるための調整をする一方で、完全に任意の形状に対応するための拡張を行う。

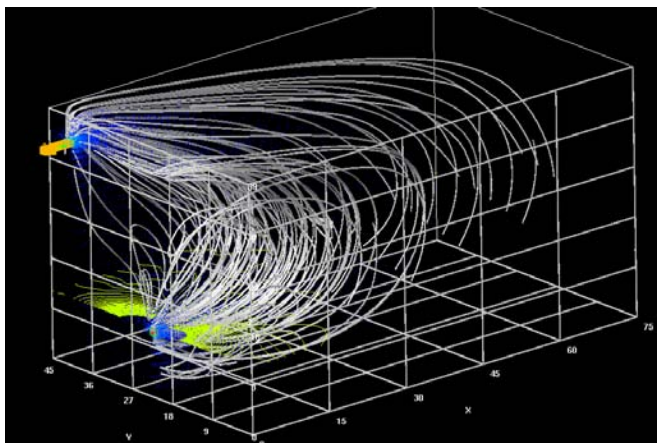


図 2.4.2.1-2: 新規開発の k-ε 乱流シミュレーションコードによる LHD 本体棟内換気シミュレーション。白い線は流線、緑色は圧力の流入ダクト水平面での等高線である。図左上の橙色の矢印は、本体棟から外側への排気流を示す。

2.4.2.2. 乱流研究（三浦）

プラズマの流体现象を理解する一助として、中性流体乱流の研究及び Hall MHD 乱流の研究を行っている。以下、主な研究内容をテーマごとに述べる。

圧縮性乱流シミュレーション研究

圧縮性は、LHD 中の MHD シミュレーションでも重要なキーワードであるが、流れ、特に圧縮性に対する役割は十分に理解されていないのが実情である。本研究では、圧縮性及び非圧縮性の一様等方性乱流の直接数値シミュレーション（格子点数：最大 1024^3 ）を実行し、夫々の乱流場の管状渦構造（図 2.4.2.2-1）を同定した。圧縮性の影響で渦構造の成長が抑制される事（これは渦伸張効果の低減という形で実現される）、管状渦構造に現れる渦波の波長、振幅、伝播状況を調べたところ、圧縮性乱流には、非圧縮性成分の他に、音波由来の渦波が発生し、この渦波はマッハ数には依存しない特性長を持つ事が明らかになった。[1, 2]

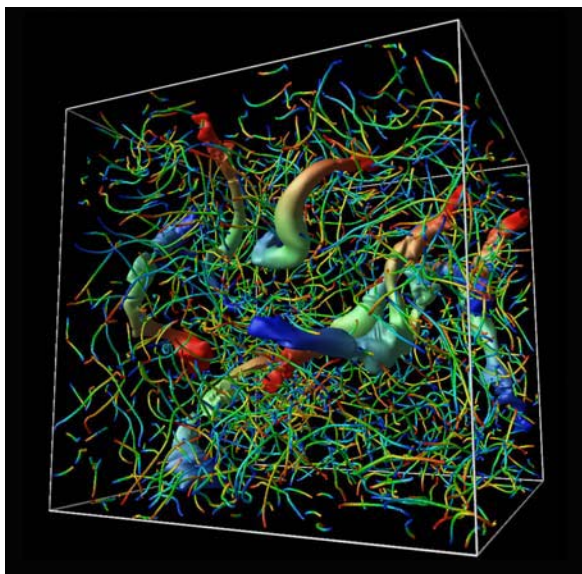


図 2.4.2.2-1：一様等方乱流中の管状渦構造。渦の旋回運動による圧力低下を捉え、旋回中心軸（細線）、旋回領域（色付の太い管状構造）を同定・可視化した。格子点数 512^3 のデータの中から 256^3 の領域を切り出して表示した。論文[1,2]では、この渦軸上の渦波を追跡し、音波様の分散関係に従う波動の存在を発見した。

[1] H. Miura, “Excitations of acoustic waves in compressible isotropic turbulence”, J. Turbulence Vol.5 (2004) pp.1-22 (Electric Journal)

[2] H. Miura, “Coupled evolutions of acoustic and vortex waves in compressible isotropic turbulence”, in Advances in Turbulence X (Proc. 10th European Turbulence Conference, Trondheim, Norway, 2004) pp.115-118.

非発散正規直交ベクトル・ウェーブレットによる組織構造の解析

非線形シミュレーションの解析を行う場合の常套手段として、フーリエモード分解によるスケール毎の時間発展、モードカップリングなどがある。ところが、フーリエ展開では空間を一様に

扱うために、局所構造のモードカップリングへの影響などの解析に不向きである。これを解決するために、ウェーブレット解析を行う事にした。基礎方程式からスケール間のエネルギー伝達方程式を構成し、エネルギー伝達項をウェーブレット分解する事により、あるスケールから他のスケールへのエネルギー伝達を、局所構造と合わせて理解する事ができる。(図 2.4.2.2-2) 構造とスケール間エネルギー伝達の構造を明らかにするため、Kelvin-Helmholtz 不安定性によって巻き上がる渦のブレード構造についてのウェーブレット解析を行い、この手法による解析が現象を適切に説明できることを示した。[3, 4]

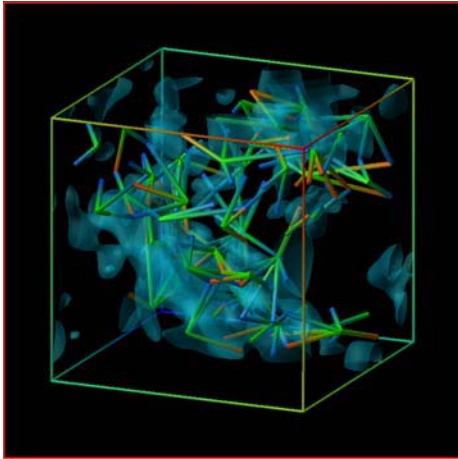


図 2.4.2.2-2: ウェーブレットによるエネルギー伝達構造解析。ウェーブレット係数の振幅が大きい部分を等値面として、ウェーブレット間のエネルギー伝達が多いサイトを、線（赤→青の方向にエネルギーが輸送される）で表示した。

[3] K. Araki and H. Miura, "Orthogonal Divergence-free Wavelet Analysis of Nonlinear Energy Transfer Process in Rolling-Up Vortices", Proceedings of International Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence (Nagoya, Japan, November 11-14, 2006) 2007, ISBN-13: 978-1402064715.

[4] K. Araki and H. Miura, "Orthonormal divergence-free wavelet analysis of cascading/backscattering process around coherent structures", in Advances in Turbulence XI (2007, Proc. 11th European Turbulence Conference, Porto, Portugal, 2007) p.768.

Ha11 MHD 乱流の研究

プラズマの運動に対する二流体効果の研究の一環として、Ha11 MHD 等方乱流の直接数値シミュレーション研究を平成 19 年度より開始した。Ha11 項によるエネルギースペクトルの変化、フーリエ分解によるエネルギー伝達構造の変化などを調べている。現在のところ、エネルギー伝達関数による低波数部から中波数部へのエネルギー輸送が Ha11 効果によって強化される事、これによって磁気エネルギースペクトルの低波数部は抑制され、高波数部は一流体 MHD 方程式乱流に比べて大きな振幅になることがわかっている。[5] 明らかにすべき物理課題として、エネルギー伝達関数による磁場揺動高波数成分へのエネルギー輸送とこれに伴う粘性散逸の促進機構の解明、ダイナモ現象への影響、高波数部の変化に伴う大規模構造への影響などが挙げられる。

また、この研究は Sec. 2.1.2.1 「高精度 MHD コード、共通コード」で述べたシミュレーションコードの二流体化、LES 用 SGS モデルの研究の基礎研究という側面を有する。等方乱流シミュレーションでは空間スケールをシャープフィルターによって分離し易い。このため、特に LES の研

究の基礎として最も適切である。また、スケール間の相互作用の解析には前項のウェーブレット解析が利用出来る。このように、これまでの乱流研究で蓄積してきたシミュレーション用ライブラリーや技術、共同研究者の協力を生かすことができるため、迅速に研究を進めたいと考えている。プラズマシミュレーターを活用した大規模乱流シミュレーションによって上記課題の解決を図るとともに、SGS モデルの構築の基礎とする予定である。

[5] D. Hori and H. Miura, “Spectral Properties of Hall MHD Turbulence”, to appear in Proc. 17th International Toki Conference and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop (Toki, Japan, 2007).

2.4.2.3. 多階層シミュレーションのための粗視化投影法-MAPIN (Skoric, 石黒)

微視的および粗視的時空間スケールが強く関連した物理現象のシミュレーションは大きな困難を伴う。最近、“Equation-Free” MAcro (Coarse) Projective INtegration (MAPIN) 法が様々な多階層問題に適用されてきている。それは、微視的モデルでの短時間のシミュレーションから粗視化した系の振る舞いを表現するモデルである。この方法のプラズマ現象への適用は Shay らによって行われた。そこでは、PIC コードを基にイオン音波の伝播および波の突っ立ちを解析している。マクロ変数である3つのモーメントを微視的空間へ“lift”としてPICシミュレーションをスタートする。PICコードにより短時間進め、その結果を粗視的空間に“restrict”する。この間の結果を大きな時間ステップで外挿して粗視的空間での結果を導くに行った過程を繰り返す。しかしながら、運動論的効果が時間経過と共にPICのみでのモデルと結果の不一致が現れた。

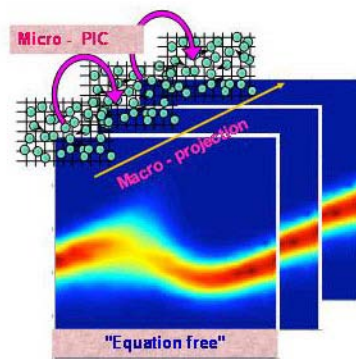


図 2.4.2.3.-1 粗視化投影法の概念図。

核融合科学研究所では、新しい方法として、“primal MAPIN” 法を提案した。ミクロシミュレータとしてはPICシミュレーションコードを採用している。イオンはそのまま大きな時間ステップで軌道を追跡し、静電ポテンシャルは電子プラズマ振動の周期で平均化して、外挿する。また、電子の分布関数は累積分布関数を評価して、時間的な外挿を行っている。さらに、電子の分布関数を2次元の累積分布関数を用いて評価する方法へと拡張を行った。物理条件は固定して、シミュレーションスキームに関連するパラメータを変更してシミュレーションを行った結果、時間発展に関して改善する結果を得た。図 2.4.2.3-2 はPICと粗視化投影法の結果の比較である。

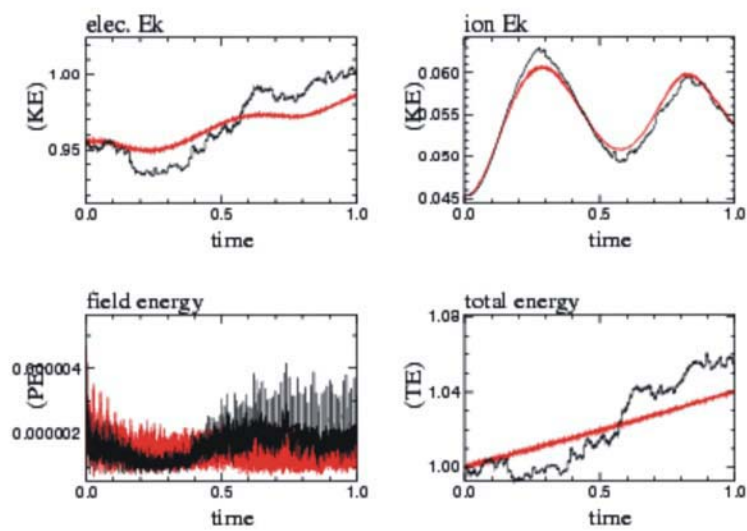


図 2.4.2.3-2 PIC(灰色)、MAPIN による、イオンおよび電子の運動エネルギー、電場のエネルギーおよび全エネルギーの時間発展。

3. 共同研究及び連携研究における活動報告

第 1.3 節の研究部の構成でも示されていたように、シミュレーション科学研究部の各プロジェクト研究は広範な共同研究を基盤として進められており、第 2 章に述べられた研究活動報告はそのような共同研究による成果に他ならない。本章では、シミュレーション科学研究部が特に共同研究、連携研究に対してどのように取り組んでいるかという視点から、平成 16 年度から 19 年度にかけての研究活動についてまとめる。本章の記述は基本的には全て共同研究に関わるものになるため、これまでの記述方式には従わずに、特に青色を用いて記述していない。第 3.1 節において、シミュレーション科学研究部が推進してきた共同研究、すなわち大学共同利用機関としての核融合科学研究所の共同研究について概観し、第 3.2 節では核融合科学研究所のシミュレーション科学の共同研究を支援するための体制について述べる。第 3.3 節では、核融合科学あるいはプラズマ物理学の分野を超えて他の学問領域にまでまたがった学際的な共同研究、特に自然科学研究機構の連携研究について述べる。最後に第 3.4 節において、国際的な共同研究に対するシミュレーション科学研究部の取り組みを、ITER 関連の連携研究、JIFT 及び国際共同研究拠点形成の枠組みにおける活動について報告する。

3.1. シミュレーション科学の共同研究

シミュレーション科学の共同研究の中心となるものは、プラズマ・シミュレータと LHD 数値解析システムに関わる共同研究である。プラズマ・シミュレータは 1.4 テラフロップスの総合演算速度を持つスーパーコンピュータであり、シミュレーション科学部の最大の研究資源である。プラズマ・シミュレータの共同研究採択件数は、平成 16 年度が 15 件、17 年度が 17 件、18 年度が 43 件、19 年度が 39 件となっている。平成 18 年度で採択件数が急激に増加しているのは、プラズマ・シミュレータを使用する所内研究者の共同研究の申請の方式が、平成 18 年度以前は一つの大きな課題に一括して行っていたのに対して、平成 18 年度以後は研究課題のそれぞれについて共同研究の申請を行うように改善されたためである。平成 19 年度において、所外研究者が代表者となっている課題は 18 件である。これらの共同研究の研究成果については、すでに第 2 章において報告した。LHD 数値解析システムは 0.5 テラフロップスの総合演算速度を持ち、LHD 実験のデータ解析研究において必要となる物理モデル計算を主たる用途とするが、プラズマ・シミュレータと比較しても約 1/3 の総合性能を持っており、シミュレーション科学の研究資源としても有効である。LHD 数値解析システムの共同研究採択件数は、平成 16 年度が 51 件、17 年度が 48 件、18 年度が 57 件、19 年度が 60 件となっていて、その内所外研究者が研究代表者または研究協力者となっているものは、それぞれの年度において、34 件、33 件、34 件、34 件である。

これらの件数は核融合科学研究所の大型計算機という資源を用いた共同研究であるが、シミュレーション科学の共同研究の特徴の一つは、核融合科学研究所の共同研究の枠組みに閉じることなく、本研究所を含む日本のあるいは世界の広い研究分野と対等に関わって推進する共同研究も数多く存在することである。その一つの現れが機構連携の枠組みにおける学際的な共同研究であり、また国際的には ITER 連携活動に関わる共同研究である。

3.2. 共同研究支援体制

シミュレーション科学の共同研究を遂行する上の主たる研究資源である、二種の大型計算機を安定した状態で共同研究に提供するために、シミュレーション科学研究部では研究のための組織とは別に作業班を組織して共同研究の支援を行っている。ここでは、大型計算機そのものの運用をサポートするための計算機作業班と、研究者が計算機にアクセスするために必要となるネットワークの整備を行うことを目的としたネットワーク作業班の活動について報告する。また、共同研究活動を促進する目的で開催されてきた、各種の研究会、シンポジウムについてもこの節で報告する。最後に平成 19 年 9 月に開かれた、シミュレーション科学研究部の設置記念シンポジウムにおいて報告された、国際的な協力活動推進の側面を述べる。

3.2.1. 作業班活動

3.2.1.1. 計算機作業班

シミュレーション科学研究部は、プラズマシミュレータと LHD 数値解析システムの二つの大型計算機システムを運用し、共同研究に提供している。プラズマシミュレータを用いたシミュレーション研究は、個別現象を解析する従来の要素還元的単一階層シミュレーションから現象の全体像を把握する多階層シミュレーションへと新しく展開させ、シミュレーション科学の確立を目指した研究、核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明とその体系化、それを支える基礎研究としての複雑性科学の探求を行うことを主な目的としている。

LHD 数値解析システムは、LHD プラズマを中心に、関連する核融合プラズマや基礎プラズマの数値解析、中小規模のシミュレーション、装置設計やデータ処理などに関する共同研究を支援することを目的として運用されている。平成 18 年 1 月よりこの LHD 数値解析システムはリプレイスを実施して SX-8 (NEC 製) を演算サーバとしたシステムになり、ベクトル並列計算が可能になっている。

平成 18 年 1 月 12 日に、第 10 回シミュレーションサイエンス・シンポジウム及び平成 17 年度核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」報告会合同研究会会期中に、LHD 数値解析システム説明会を実施した（合同研究会参加者 63 名）。またこれ以降はプラズマシミュレータ、LHD 数値解析システム合同で、平成 18 年度は 5 月 24 日から 26 日まで、平成 19 年度は 9 月 10 日から 13 日まで両システム利用者を対象にした利用者講習会を開催した。参加者は所内外から、平成 18 年度 24 名、平成 19 年度 36 名であった。内容はプラズマシミュレータ及び LHD 数値解析システムの利用説明、Fortran90 におけるベクトル化・共有並列による高速化、並列言語 High Performance Fortran (HPF) プログラミング入門、並列言語 Message Passing Interface (MPI) プログラミング入門の講習が行われた。また、AVS/Express 講習会を同時開催し、基本的な使用方法に加え、発展的な使用方法の講義を行った。

LHD 数値解析システムについては、キュー構成検討会議を平成 18 年 4 月 12 日、同年 12 月 13

日に実施し、利用者の要望に応じてキュー編成の構築を行った。またプラズマシミュレータについては平成 19 年に、プラズマシミュレータの性能を十二分に活用できるように、多ノードジョブを優先させる運用方式を定めた。同時に、単ノードジョブは LHD 数値解析システムの利用を推進することにより、プラズマシミュレータと LHD 数値解析システムの役割りを明確にした。さらに利用形態にメリハリを付けることを目的に、学生を除く所内利用者をグループ分けし、グループ間で実行順位の優先度を変える運用を平成 19 年 9 月 27 日より開始した。

その他日常業務として、両システムとも利用案内の Web ページを開設して、システムに関するお知らせの掲示、利用手引きの公開、利用者からこれまで送られてきた質問及びそれに対する回答をまとめた Q&A 集の公開、Fortran90・並列化言語及びライブラリ講習会及び利用者講習会の資料の取りまとめ及び公開を行っている。また、利用者からの質問・プログラムコーディングの相談への対応やシステムエンジニアへの連絡、利用者からの要望によるフリーソフトウェア（計算機ベンダーのサポート対象外のソフト）のインストール、ハード・ソフトの障害等不具合の対応等を行って、それぞれのシステムの利用が円滑に行われるように活動している。

プラズマシミュレータ及び LHD 数値解析システムの平成 16 年～19 年（注 1）までの平均 CPU 稼働率等利用状況を下に示す。

プラズマ・シミュレータ

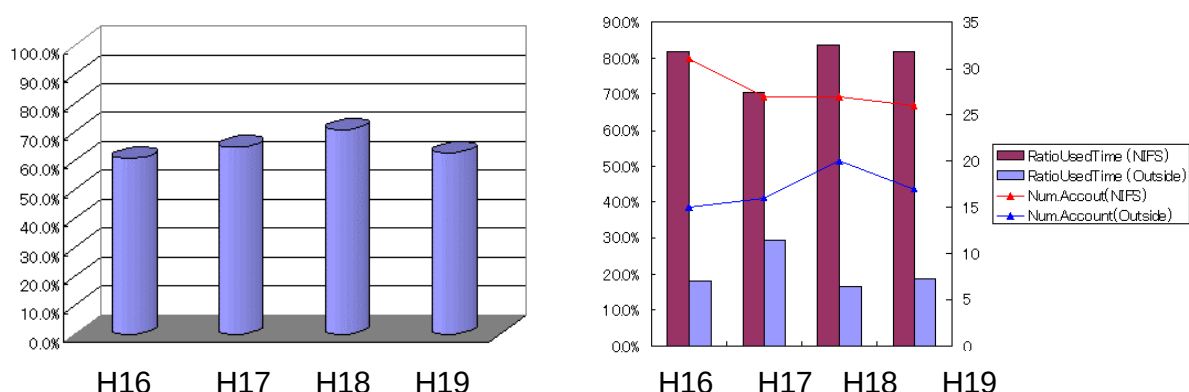


図 3.2.1.1-1 (左図) CPU 稼働率。(右図) 所内(赤)と所外(青)ユーザー数 (右目盛り、折れ線グラフ)と、所内(小豆色)と所外(紫)の使用時間比率(左目盛り、棒グラフ)。

LHD 数値解析システム

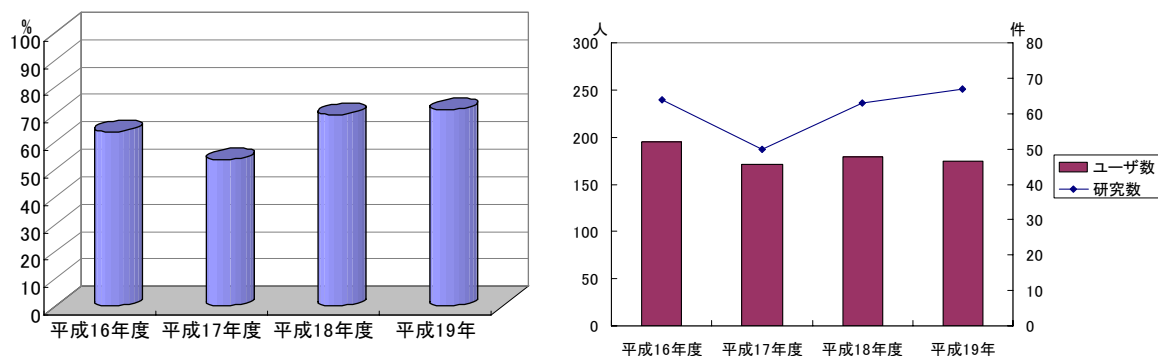


図 3.2.1.1-2 (左図) CPU 稼働率 (右図) ユーザ数(左目盛り)と共同研究数(右目盛り)

注 1：平成 19 年は 4 月から 10 月まで。

注 2：LHD 数値解析システムは平成 18 年 1 月に SX-5 から SX-8 へ更新。

3.2.1.2. ベンチマーク活動

大規模な計算機システムの性能を評価する尺度としてはLINPACKを用いたTOP500が有名であるが、LINPACK は CPU の純粋な演算能力を計測することに偏向しており、総合的な計算機の実効性能は評価できない。このため、LINPACK による性能と実際のシミュレーションコードを実行したときに得られる性能とは、一般に大きくかけ離れている。このような LINPACK による評価の弊害を避けるため、HPC Challenge (ICL, US)、SSP ベンチマーク (NERSC, US)、Teraflop Workbench (HLRS, DE) 等の新しい指標を作成する種々の試みがある。しかし、これらはプラズマ・核融合分野を重点的には扱っておらず、この分野における典型的な指標としては不十分である。そこで我が国におけるプラズマ・核融合科学シミュレーションにおいて、総合的に計算機の性能を評価できるベンチマークスイート Performance Analysis Suite for PLasma-fUision Simulation (PAS+, パスプラス)の整備を目指した。そして網羅的な性能評価を実現するために、本研究所だけではなく広く大学・研究機関等で利用されているこの分野における実用的なシミュレーションコードのうち、MPI を用いて分散メモリ向けに並列化されたもの、OpenMP または自動並列化により共有メモリ向けに並列化されたもの、及び MPI+OpenMP または自動並列化により分散・共有メモリ向けにハイブリッド並列化されたものを対象とした。現在までに整備したベンチマークコードの一覧を表 3.1.2-1 に示す。



表 3.1.2-1 : PAS+のベンチマークコード一覧

分野	共有並列	分散並列	ハイブリッド
流体MHD		i m p a c t - 3 d	g k v l
粒子	e s p i c 3 d	c y l - r l	
モンテカルロ		d c o m	f o r t e c 3 d
MD		m d 3	
平衡計算			h i n t 2
F F T		n s f f t 3 d	

各コードの概要を以下に示す。

- cyl-r1
 - 山口大学大学院理工学研究科 内藤裕志
 - 円筒モデル半径方向1次元の PIC コード。粒子の運動と静電場の式を連立させてプラズマのシミュレーションを行っている。円筒表面では電位ゼロを仮定し、円筒表面での粒子の境界条件は完全反射。応用例として、負イオン計測に関連した光脱離電子のシミュレーションがある。
- dcom
 - 京都大学工学研究科原子核工学専攻 村上定義
 - 磁気面座標(Boozer 座標)において荷電粒子軌道を追跡し、新古典粒子拡散係数を算出する。
- espic3d
 - 核融合科学研究所シミュレーション科学研究部 石黒静児
 - 3次元静電プラズマ PIC シミュレーションコード周期境界条件、z 方向に外部磁場、パラメータ変更によって3成分以上のプラズマシミュレーションにも対応している。
- Fortec3d
 - 核融合科学研究所理論・データ解析研究系 佐竹真介
 - モンテカルロ法をもちいたクーロン衝突項の計算、ルンゲ・クッタ法による荷電粒子軌道計算、Mersenne-twister 法を用いた乱数発生が特徴である。
- gkv1
 - 核融合科学研究所シミュレーション科学研究部 渡邊智彦
 - 粒子速度分布関数の時間発展を5次元位相空間において追跡する。実空間および速度空間の微分には差分近似を適用(四次中心差分または五次風上差分)。時間積分は四次

Runge-Kutta-Gill 法を用いている。

- hint2

- 核融合科学研究所理論・データ解析研究系 鈴木康浩
- まず、計算グリッド点からスタートした磁力線上の平均圧力をもとめる。磁力線方程式の積分は 8 段 6 次ルンゲ・クッタ法、任意の点の磁場ベクトル、圧力は 4 次精度補間により求められる。次に散逸 MHD 方程式の時間発展を計算する。空間微分は 4 次精度の中心差分公式で近似し、時間積分は 4 次精度のルンゲ・クッタ法で解く。磁場ベクトル、速度ベクトル、圧力は回転ヘリカル座標系とよばれる非直交一般座標系上で表される。

- impact-3d

- 核融合科学研究所シミュレーション科学研究部 坂上仁志
- カーテシアン系における 3 次元圧縮性非粘性流体方程式を TVD 法により解いており、レーザー核融合の爆縮過程における流体運動の計算に使われている。

- md3

- 核融合科学研究所連携研究推進センター 田中基彦
- 帯電した粒子系（イオン、電子）について分子動力学法を用いて時間発展を求めている。クーロン力とレナード・ジョーンズ力（コア間斥力）を使用しており、直接粒子間力を計算しているため 2 体衝突効果が正しく取り入れられている。

- nsfft3d

- 名古屋工業大学大学院ながれ領域 後藤俊幸
- 3 次元 FFT の逆変換、変換を複数回行なう。

PAS+で整備されたベンチマークコード群やその結果は、特別な事情がない限り入手を希望する者に対してインターネット上で公開し、この分野の研究者の自サイト計算機の性能評価にも利用できるようにする予定である。以下に PAS+ のバージョン履歴を示す。

v1.7(2007/10/12)

- ・核融合研の SX8 および大阪大学 CMC の SX8R の結果を収録

v1.6(2007/09/25)

- ・サンプル出力結果用ディレクトリの再構成
- ・結果処理用コマンドの追加
- ・cyl-r1 における軽微なプログラムのバグ修正
- ・espic3d における Makefile とパラメータの修正
- ・hint2 における Makefile の修正
- ・ログファイルの追加

v1.5(2007/09/03)

- ・nsfft3d の実行パラメータを変更
- ・impact-3d、nsfft3d の制限事項を明記

- ・ hint2 の cal_press. f90 におけるべき乗に関する軽微なソース修正

v1.4(2007/08/27)

- ・ hint2 における軽微なプログラム、スクリプトのバグ修正
- ・ 全コードに共通な評価情報出力プログラムを実装するためのプログラム Makefile の修正
- ・ 実行パラメータを config.env に記述できるように修正

v1.3(2007/08/21)

- ・ 実行時にスレッド数やプロセス数を指定して、それに合致したものだけを実行できるように Makefile やスクリプトを改良

v1.2(2007/08/14)

- ・ hint2 の実行可能プロセス数を変更

v1.1(2007/07/24)

- ・ gkv1 の実行可能プロセス数を変更

v1.0(2007/07/18)

- ・ 公開

3.2.1.3. ネットワーク作業班

ネットワーク作業班は核融合科学研究所の情報ネットワークに関する業務を担当している。情報ネットワークは研究活動に必要不可欠なものであり、これを安定して運用すること、さらに、遠隔地からの攻撃に対し適切に防御することは非常に重要である。研究所の情報ネットワークは研究基盤クラスタ（外部接続機構を含む）、LHD 実験クラスタ、シミュレーションクラスタからなり、ネットワーク作業班は研究基盤クラスタとシミュレーションクラスタを管理しており、300人の所員、1000台以上の端末に対し次のサービスを提供している。

- ・ 利用者に 100Mbps、または 1Gbps の帯域を各建物の情報コンセントより提供。
- ・ 所員の PC に対し、ワクチンソフトウェアの提供。
- ・ 情報ネットワークシステムの管理・運用
 - 代表電子メールサーバ、VPN(SSL-VPN)サーバ、DNS サーバ、DHCP サーバ
 - ネットワーク機器（ルータ、ハブ、ファイヤーウォールなど）
- ・ 所内の情報・ネットワークシステムに対する助言活動
- ・ 所外のネットワーク組織（国立情報学研究所、岐阜県）との協力活動

なお、平成 16 年度より予め PC の情報（MAC アドレス）を登録しないと、DHCP サービスが利用できないシステムを構築したが、特に頻繁に訪れる研究者にとって不便であるという外部からの指摘があり、翌平成 17 年度より事前登録なしで利用できる「外部ネットワーク」を敷設し運用を行っている。この外部ネットワークは主に所内の会議室に設置され、場所によっては無線 LAN の使用も可能となっている（所内において無線 LAN はセキュリティの観点より禁止されている）。

以下に旧計算機・情報ネットワークセンター時代を含む平成 16 年度以降の業務内容を列挙する。

なお、業務の実施にあたり技術部の協力を得ている。

- 対外接続・対外機関との調整
 - 国立情報学研究所が運営する学術ネットワーク「SuperSINET」のノード機関（H13 年度設置）、ならびに、SuperSINET を利用した共同研究用ネットワーク SNET の拡充（H16 年度から 18 年度）
 - 岐阜県が運営する岐阜情報スーパーハイウェイの活用。所外ネットワークの利用（H17 年度）
- 研究基盤ネットワーク（キャンパス LAN）の運用
 - ギガビットネットワークへの移行作業（H17 年度完了）
 - L3 スイッチ、コアスイッチ、末端の L2 スイッチ（約 60 台）の管理
 - IP アドレスの管理、DNS サーバの維持管理
- アプリケーションサーバの運用管理
 - 代表メールサーバの管理。メールアドレス、メーリングリストの管理
 - 勤務時間外配送抑制システムの試行ならびに運用（H18, 19 年度）
 - スпам対策用専用機器の導入（H18 年度）
- セキュリティ対策
 - セキュリティポリシーに基づく各種ガイドラインの策定（H16 年度）
 - PC 用ワクチンの配布、ならびに所内用定義ファイル配布サーバの開発（H16 年度）
 - NIFS-DHCP MAC アドレス登録システムの開発、運用、ならびにネットワーク検疫室の開設（H16 年度）。DHCP サービスを受けるためには、事前に MAC アドレスの登録を必要とし、その登録の際に講習会を受講した MAC アドレス登録者によるセキュリティチェックを義務付けた。
 - 所外ネットワークの整備（H17 年度、18 年度）。
 - 無線 LAN アクセスポイントの設置。所外ネットワーク使用前に接続条件を示す確認サーバを導入して整備を行った（H18 年度）
 - VPN サービスの管理。SSL-VPN サービスの導入（H18 年度）。SSL-VPN では、所員もトークンによるワンタイムパスワードの使用を義務付けた。

3.2.2. 研究会、シンポジウム

シミュレーション科学研究部では、その前身となるシミュレーション研究センターの時代から、シミュレーション科学研究の組織化と、広くプラズマ研究分野においてシミュレーション研究を推進することを目指して、多くの研究会やシンポジウムを開催している。ここでは平成 16 年度から 19 年度にかけて開催されたシンポジウム等について報告する。

○ シミュレーションサイエンスシンポジウム

シミュレーションサイエンスシンポジウムは 1998 年 2 月に宮崎で最初に開催されて以来、ほぼ毎年度開催されてきた。その目的は、計算機シミュレーションというアプローチを機軸にした新

しい方法論を開拓するための議論の場を設け、プラズマ、天体、流体、物質科学、生命科学等々、様々な研究分野の最近のシミュレーション研究による成果の紹介および(1) 各分野における中心的な命題とそのモデリングにおける課題、(2) シミュレーション手法上の問題、(3) シミュレーション研究に不可欠な解析・可視化・表現法上の課題や、(4) 計算機技術を含めた最近の進展などについての情報交換を通じて、シミュレーションという共通言語を介した分野横断的な理解の輪を広げ、多分野の研究者の学際的な交流をはかり、こうした土壌から「シミュレーション・サイエンス」という分野を発展させることにある。

○ 第9回シミュレーション・サイエンス・シンポジウムおよび平成16年度核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」合同研究会

2005年1月11日から13日まで、核融合科学研究所にて、第9回シミュレーション・サイエンス・シンポジウムおよび平成16年度核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」合同研究会が開催された。この年度の研究会では、様々な分野におけるシミュレーションの成果の紹介に加えて、「次世代のコンピュータシミュレーションの展望」についての討論会が行われた。講演は中国の北京応用物理および計算数学研究所のZhu Shao-Ping氏の“Computer simulation of laser produced plasma in China”，情報通信研究機構の田光江氏の「リアルタイム宇宙天気シミュレータについて」、地球シミュレータセンターの渡邊國彦氏の「ESを用いた最新のシミュレーション研究と次世代シミュレータ」の3つの招待講演および6件の一般講演、31件の報告会講演が行われた。

○ 第10回シミュレーション・サイエンス・シンポジウムおよび平成17年度核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」報告会

2006年1月11日(水)、12日(木)、核融合科学研究所にて、第10回シミュレーション・サイエンス・シンポジウム及び平成17年度核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」報告会を合同で開催した。

東北大学の山口教授による「計算機シミュレーションによる生体機能の解明と循環器病医学への応用」、地球シミュレータセンターの草野氏による「連結階層シミュレーションの現状と展望」、などの招待講演を含め17件の口頭発表および34件のポスター発表がおこなわれた。

○ 「プラズマ・核融合研究におけるHigh Performance Computing ワークショップ」および「大型シミュレーション研究会」合同研究会

プラズマ・核融合分野の理論・シミュレーション研究を取り巻く環境が大きな変革の時期を迎えるなか、当該分野におけるHigh Performance Computingの最近の動向と将来展望を議論し、今後のシミュレーション研究の方向性や、そのために求められる計算機環境などに関する意見交換を行う、という趣旨のもと、平成19年1月23日(火)から24日(水)の日程で、核融合科学研究所において、標記の合同研究会を開催致した。

全国の大学・研究機関より30名、核融合科学研究所内から31名の参加があった。基調講演が佐藤哲也地球シミュレータセンター長により行われ、徳田伸二原子力機構・理論グループリーダー

ーをはじめとした計12名の講演があった。ポスター発表においては26件の研究発表がなされた。研究会の最後に「プラズマ・核融合研究に求められるシミュレーション環境について」と題したパネル討論会を開催し、コメンテーターとして5名の方々が意見を述べるとともに、参加者でディスカッションを行った。

3.2.3. シミュレーション科学研究部設置記念シンポジウム・式典

核融合科学研究所は、2007年4月1日にシミュレーション科学研究部を設置し、同研究部の設置を記念して同年9月6日（木）、7日（金）に土岐市産業文化振興センター・セラトピア土岐において、記念シンポジウム、式典、記念講演会およびパネルディスカッションを開催した。シミュレーション科学にたずさわる国内外の研究者と、岐阜県、土岐市、瑞浪市、多治見市の地元自治体や自然科学研究機構などから85名の参加があり、所内からの69名を加えて合計参加者数は154名であった。

7日午後の記念式典は本島修所長の式辞にはじまり、志村令郎自然科学研究機構長の挨拶（代読）の後、松尾泰樹文部科学省研究開発局研究開発戦略官、茅幸二理化学研究所和光研究所長中央研究所長、大野信彦土岐市長が祝辞を述べた。式典の最後に須藤滋シミュレーション科学研究部研究総主幹が設置趣旨説明を行った。

これに先立つ6日と7日午前に開催した記念シンポジウムは、J. W. Van Dam 博士（テキサス大学核融合理論研究所長）と A. Becoulet 博士（フランス原子力庁）による基調講演で幕を開けた。Van Dam 博士は“Simulation Science for Burning Plasmas”と題して、燃焼プラズマをわかりやすく解説するとともに、燃焼プラズマシミュレーションの重要な課題を挙げ、JIFT を中心とするシミュレーション科学分野での日米協力の状況を説明した。Becoulet 博士は“Current Status and Future Prospects of Fusion Simulation Activity in Europe”という講演題目で、ITER に向けたヨーロッパの統合モデリングプロジェクトについて報告した。記念シンポジウムでは、シミュレーション科学研究部の3つのシミュレーションプロジェクト、「LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト」、「レーザー核融合シミュレーションプロジェクト」、「複雑性プラズマシミュレーションプロジェクト」がそれぞれ紹介され、加えて6件の招待講演が行われた。常松俊秀博士（日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所長）は、「核融合エネルギー研究におけるシミュレーション」と題して、シミュレーションへの期待について動画を交えながら説明した。姫野龍太郎博士（理化学研究所情報基盤センター長）は「次世代スーパーコンピュータ開発プロジェクトと COE 構想」という講演で、次世代スーパーコンピュータのターゲットアプリケーションやそれを運用する先端計算科学技術センター（仮称）構想などを紹介した。C. Z. Cheng 博士（成功大学プラズマ・宇宙科学センター長）は“Simulation of Multi-Scale Coupling Processes in Fusion and Space Plasmas”と題して、アルヴェン固有モードの高速粒子-MHD 連結シミュレーションと太陽コロナ質量放出現象に関する異常電気抵抗を導入した MHD シミュレーションを報告した。岸本泰明博士（京都大学大学院エネルギー科学研究科教授）の講演「大学における核融合及び関連シミュレーション研究」では、非線形性・非局所性が主要な役割を果たす多階層・複合系としての核融合プラズマに関する理論・シミュレーション研究の進展が紹介された。岡崎進博士（岡崎共通研究施設計算科学研

究センター長）は「分子科学と計算機シミュレーション」と題して、分子科学分野における多様な計算モデルを解説し、連携研究の取り組みおよび次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発について紹介した。富阪幸治博士（国立天文台理論研究部主任）の講演「天文学と計算機シミュレーション」では、最近のシミュレーション研究の進展が紹介されるとともに、基本的には観測とデータ解析が中心の天文学において、シミュレーションではパラメタや環境を変えてみるという「実験」が可能なのでシミュレーションが特別に重要であること、大きなダイナミックレンジの困難を克服する必要があること、重力が本質的であることが説明された。

7日午後の記念式典終了後、W. M. Tang 博士（プリンストンプラズマ物理研究所副所長）と佐藤哲也博士（海洋研究開発機構地球シミュレータセンター長）による記念講演および「シミュレーション科学研究に期待するもの」と題してパネルディスカッションが行われた。記念講演と並行して核融合科学研究所で開催した特別見学会では、地元自治体からの参加者などがバーチャルリアリティシステムと大型ヘリカル装置を見学した。

Tang 博士の記念講演“Current and Future Prospects of Simulation Science in the US”では、先進的な計算は計算科学、応用数学、物理科学の間の学際的な研究連携を可能にすること、米国で現在進められている Fusion Simulation Project (FSP)などの統合モデリングプロジェクトは核融合システムの現実的なシミュレーションを目指していること、若い才能を魅了・教育・保持するために学際的計算科学教育が不可欠であることが述べられた。佐藤博士の記念講演「シミュレーション文化について」では、地球シミュレータを用いた丸ごとシミュレーションによる未来予測の例が報告され、そこでマイクロ階層に導入されているパラメタ近似を越えるための連結階層シミュレーションが紹介された。

パネルディスカッションでは、三間罔興博士（大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長）、茅幸二博士（理化学研究所和光研究所長中央研究所長）、中村宏樹博士（分子科学研究所長）、J. W. Van Dam 博士、須藤滋博士、中島徳嘉博士がシミュレーション科学研究に関する各自の意見を述べ、議論が行われた。まとめとして、次世代スーパーコンピュータの研究対象として、情報工学(IT)、生物工学(BT)、ナノ工学(NT)に加えエネルギー工学(ET)が重要であること、及び多階層シミュレーションをバイオ・ナノシミュレーションと核融合シミュレーションにまたがる横断的新研究分野とする必要性が指摘された。また、シミュレーション研究の持つ分野を問わない普遍性、モデルに対する柔軟性、観測量に関する任意性を、分野間連携、国際協力等で最大限に生かし、未来（実験結果、自然現象）を予測し得るシミュレーション科学の実現が期待された。



図 3.2.3 パネルディスカッションの様子。右から三間園興大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長、茅幸二理化学研究所和光研究所長中央研究所長、中村宏樹分子科学研究所長、中島徳嘉教授、須藤滋シミュレーション科学研究部研究総主幹、J. W. Van Dam テキサス大学核融合理論研究所長、岡村昇一教授。

3.3. 学際的共同研究

シミュレーション科学の手法は、プラズマ・核融合関係の研究領域のみで有効であるという限られたものではなく、プラズマ以外の研究分野においても発展の著しい研究分野である。異なる研究領域の研究者が議論することにより、シミュレーション研究をさらに発展させることも可能となる。本研究部の特色の一つとしてこのような方向性を持った学際的な共同研究が積極的に進められており、その典型的な例として自然科学研究機構の連携研究の枠組みでいくつかの学際的共同研究が行われたので、その内容について報告する。またプラズマ物理以外の研究領域における民間との共同研究についても報告する。

3.3.1. 自然科学研究機構連携研究

3.3.1.1. 自然界における階層と全体

自然科学研究機構は、生物科学、基礎生理学、分子科学、核融合科学、および天文科学という自然科学の最先端の研究をリードする5つの国立研究所で構成されている。その発足当初より、その特徴を生かした新しい研究連携プログラムの推進が熱望されていた。学際的で新しい自然科学の研究分野の開拓をめざした、「新分野創成型連携プロジェクト」もその1つである。「自然界における階層と全体」は、この新分野創成型連携プロジェクトの1つとして、機構連携室の主導で、平成17年度より発足した。平成18年度よりは、生物系を中心とする「階層と全体（1）」、およびプラズマ系を中心とした「階層と全体（2）」の2つの研究グループを形成して、活動を続けている。核融合科学研究所の研究グループは、主として、後者のグループに所属している。

自然界には様々なレベルの階層が存在し、そこで発生する現象は、階層間相互作用を通じてダイナミカルな力学発展をしているため、きわめて複雑である。これらの現象の理解には、個別階層の物理に加え、現象を総合的に見るホリスティック（全体）な視点が重要となる。この新しい学問の視点から、機構連携を通じて新しい学際領域を切り開くことを目的として、ミクロからマクロまでの階層の物理が複雑に絡み合って現出するシステム全体の挙動を、計算機シミュレーションを駆使して理解しようとする「ホリスティックシミュレーション研究」のための研究拠点の形成を目指した活動を行っている。

後者の研究グループでは、非線形・非平衡・開放系の典型であるプラズマ系や重力多体系において見られる典型的な2つの階層横断現象、1) 天体プラズマ、惑星間空間プラズマ、地球磁気圏プラズマ、実験室プラズマなどの多分野の研究に共通する階層横断現象としての磁気リ

コネクション現象、および、2) 重力多体系における階層構造とその形成過程のダイナミックス、を具体的な研究対象として取り上げ、個別共同研究、ワークショップ、全体研究会等の様々な研究アプローチを駆使して、その物理機構の解明を目指した研究を進めてきた。

成果の概要は以下のとおりである。

(1) プラズマ系における階層横断現象としての磁気リコネクション現象

- A) 磁気リコネクションを引き起こすマイクロ物理機構として、プラズマの構成粒子であるイオンや電子の運動論効果、およびプラズマ不安定性の発生に伴う異常抵抗の役割に関する知見を得た。
- B) 特に、開放系粒子シミュレーションより、磁気リコネクションの基本的な誘発機構はマイクロ物理によって支配されているが、そのダイナミカルな性質はマイクロ階層だけでなく、それを取り巻くマクロ階層との相互作用によって決まる、ことが見いだされた。
- C) 磁気リコネクション現象を対象とし、マイクロ階層とマクロ階層をつなぐための様々な問題点の検討を行った。まず、その第一歩として、両階層を連結するための数値アルゴリズムを開発し、マクロスケールの波であるアルベン波の1次元伝播に応用しその有効性の検証を行った。その結果、限定した範囲であるが、滑らかに、マクロとマイクロの階層間をアルベン波が伝搬することを実証できた。
- D) 太陽観測衛星「ひので」の観測データを基に、太陽系における磁気リコネクションに関係した階層に跨るプラズマ現象として、太陽フレア、コロナ質量放出現象、地磁気サブストーム等に関する衛星観測の現状を、連結階層シミュレーションモデル構築の観点から分析した。
- E) 磁気リコネクションのミクロスケールのダイナミックスに関連して、地上リコネクション実験との比較を行った。

(2) 重力多体系における階層構造とその形成過程のダイナミックス

- A) 重力多体系における階層構造の形成、特に銀河形成のシミュレーションによる研究のための並列計算コードの開発を行った。この開発では、GRAPE-5の16ノードまでの並列クラスタ上で、strong scalingでも十分な並列加速率を実現するN体+SPHコードを開発した。これにより従来は現実的な計算時間では不可能であった、1000万程度の粒子を使うN体+SPH計算による銀河形成シミュレーションが可能になった。
- B) 科学技術計算向け超並列計算機 GRAPE-DR の、重力多体系以外の多体計算への応用可能性の研究を行った。GRAPE-DRの応用可能性の研究では、従来専用計算機向きではないと考えてきたプラズマシミュレーションのPICコードを現在開発中のGRAPE-DRで行う可能性について予備的な検討を行なった。空間差分が一次の低精度の計算コードでは、データ量に対して計算量が少ないために GRAPE-DR では効率が低いが、今後必要になってくると考えられている高次の空間差分を使う計算コードでは、GRAPE-DRでの計算効率が実用的な程度まで高くなり得ることがわかった。

また、2008年2月には、このプロジェクトの企画として、「自然科学における階層と全体」国際シンポジウムを開催する予定である。これは、これまで3年間の成果を集大成し、今度のプロジェクトの方向性を見出すためのものである。

3.3.1.2. 自然界と実験室のプラズマ研究の交流研究拠点形成

物質の第4の状態といわれるプラズマは、実験室から宇宙空間にわたり広い領域に存在し、プラズマ諸現象の解明はそれぞれを対象とする学問領域において重要課題となっている。プラズマ研究の黎明期には、宇宙科学の研究者が核融合プラズマの研究に携わるなど、対象とする領域による垣根は存在しなかった。しかしながら、個々の分野での研究が発展するにつれて「宇宙プラズマの研究」あるいは「核融合プラズマの研究」といったように専門分化が進んできた。例えば、学会活動などにおいては、プラズマ・核融合学会、物理学会、天文学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、応用物理学会、電気学会など、それぞれの所属学会に分かれて活動している。このため相互交流により、分野間で共通する課題を認識し、協力して発展を図るとともに、新しい分野を開拓することを目的とした学会活動、研究会、国際ワークショップなどが過去20年以上にわたり行われてきた。しかしながら、このような交流は断続的あるいは局所的なものにとどまっており、この要因の一つとして、分野間の交流を担う定常的な機関が存在しなかったことがあげられる。自然科学研究機構の創設はそのような状況を打破し、新しい学際領域を創設する絶好の機会と考えられる。本プロジェクトは核融合科学研究所、国立天文台のプラズマ関連研究者が分野間連携の触媒となって定常的な交流を図り、新しい学際領域を開拓することを目的として自然科学研究機構の平成17年度「分野間連携による学際的研究拠点形成プロジェクト」、および平成18年度「新分野創成型連携プロジェクト」として実施された。

成果の概要は以下のとおりである。

1. 様々な分野のプラズマ研究者の相互交流を図り、連携の道を探ることを目的として、平成18年2月6日、7日の両日、メルパルク名古屋において「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会を開催した。核融合プラズマ実験・シミュレーション、太陽物理、天文シミュレーション、惑星間空間シミュレーション、プラズマ基礎実験、磁気リコネクションの室内実験及びシミュレーションなど様々な講演及び活発な議論を行った。その中で、太陽活動と高ベータプラズマについて天文台と核融合科学研究所の間で共同研究をおこなうこととなった。この研究会の発表件数は17件、参加者は50名であった。さらに平成18年度の事業として、「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会を平成18年11月20日から22日まで、名古屋市において開催した。発表は宇宙プラズマの観測、実験室プラズマ、宇宙プラズマシミュレーション、プラズマ基礎過程のシミュレーション、新しいシミュレーション手法の開拓など多岐にわたるものであった。磁気リコネクションの実験については米国Princeton大学のYamada氏、東京大学の小野氏がそれぞれの実験について報告した。小野氏は東京大学TS実験における非定常・間欠リコネクション現象から、高速リコネクション機構について考察し、リコネクション領域へのフロー速度により3つのタイプのリコネクションがおけると報告した。国立天文台の柴崎氏は、太陽フレア現象にバレーニング不安定性といった高ベータプラズマ現象が関与しているという説を提唱した。カルフォルニア大学リバーサイド校の鷲見氏は太陽圏外圏のプラズマの3次元MHDシミュレーションによる解析を通じて粒子加速の環境を論じ、観測結果との比較に関して報告した。東北大学の市来氏は磁

化プラズマ中フロー速度シアによって駆動されるドリフト波不安定性が負イオン導入によって抑制されるという実験結果を報告した。また、東北大学の畠山氏、大原氏はペアイオン系プラズマの生成、不安定性、およびその物質創成への応用について報告した。静岡大学の山際氏は電子ビーム・プラズマ系の非線形現象に関して、粒子速度分布の情報を含む詳細な実験結果を示し、その構造について論じた。東京大学の吉田氏は木星の磁気圏を模擬した実験装置である RT-1 装置の概要と理論的背景、実験の現状について報告した。名古屋大学の樋田氏は最近のショック粒子加速の 2 次元シミュレーションによりショック面の曲がりの効果の粒子運動に及ぼす影響について報告している。2006 年秋に打ち上げに成功した太陽観測衛星「ひので」に関して 3 件の発表が行われた。国立天文台の末松氏は可視光望遠鏡観測を中心に報告し、可視光・磁場望遠鏡によるこれまでにない高空間分解能連続観測により太陽磁気流体現象の解明につながるデータが得られ始めていると報告した。また、鹿野氏は X 線望遠鏡観測について、前任機「ようこう」の X 線望遠鏡に比べ温度感度範囲が広いこと、空間分解能が格段に高いことにより、太陽コロナを構成する全プラズマの詳細観測が可能となること並びに可視光望遠鏡や極体紫外線撮像分光装置との連携の可能性を紹介した。また、関井氏は「ひので」がもたらす局所日振学への効果について述べた。最後に、核融合科学研究所の Skoric 氏は多階層シミュレーションの新しい手法である粗視化投影 equation-free 法について、最近の基礎研究の進展を紹介した。これらの発表及び活発な議論を通じて幅広い分野の研究者の交流がはかられた。

2. 核融合科学研究所と東北大学で磁化プラズマ中フロー速度シアに起因する低周波不安定性に関して東北大学の基礎実験に対応してシミュレーションの共同研究をおこない、イオン速度シアにより生成されるイオン音波及び静電イオンサイクロトロン波の性質を明らかにした。さらに、負イオン導入効果についてシミュレーションを行い、イオン音波不安定性が負イオンの導入によって抑制されること、イオンサイクロトロン波不安定性の基本波は成長が助長されるが、高調波成分は抑制されることを明らかにした[1]。(金子、石黒、畠山)
3. 核融合科学研究所と国立天文台の連携を深めると同時に両研究所が自然科学研究機構の一員として共通の基盤の上に立っていることを広く一般にアピールするため、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)及びプラズマシミュレーション研究、国立天文台の太陽の研究を象徴するいくつかの図面とその関係を説明するパネルを作成し、平成 18 年度に核融合科学研究所、国立天文台、国立天文台野辺山太陽電波観測所の 3 カ所に設置した。
4. 核融合科学研究所と国立天文台のバーチャルリアリティのコンテンツの相互交換を促進するための技術的な問題などを議論し、天文台と互換性のあるグラフィックシステムの核融合研への導入及び 4 次元デジタル宇宙シアターの移植の技術的な検討を行った。
5. ミクロ物理ベースでマクロの現象を効率的に取り扱いうる equation free projective method のプラズマ物理への応用に関する研究をおこなった。アメリカ合衆国メリーランド大学から George Stantchiv 博士、セルビア・モンテネグロのニッシュ大学から Aleksandra Malukov 博士を招いて単純なプラズマ系である、1 次元の静電系であるイオン音波を対象として、二次元の位相空間情報を累積分布関数に取り込む手法の適用及びその効果について検証している[2]。(Maluckov, Skoric, 石黒)

6. プリンストン大学で磁気リコネクションの実験研究者を招聘し、海洋研究開発機構地球シミュレータセンター及び核融合科学研究所で磁気リコネクションの物理に関する情報交換及び議論を行った。

[1] T. Kaneko, H. Saito, S. Ishiguro, and R. Hatakeyama “Low-Frequency Instabilities Locally Enhanced by Parallel Flow Velocity Shears in Magnetized Plasmas”, *Journal of Plasma Physics*, 72 (6), (2006), 989-992.

[2] Milos M. Skoric, Sandra Maluckov and Seiji Ishiguro, “A Primal Coarse-Projective Integration Scheme in Multi-Scale Plasma Dynamics”, *23rd Symposium on Physics of Ionized Gases -SPIG*, Kopaonik, Serbia (2006).

3.3.1.3. 「非平衡量子物理学の開拓」プロジェクト

エネルギー変換の基礎研究として、常温付近の半導体（古典力学系）で温度勾配による輸送現象（熱電効果）を研究してきた。低温での現象の場合は、量子力学的効果を考慮しなければならない。しかし従来の物理学では、電場による量子輸送現象の研究がほとんどであり、温度勾配による量子輸送現象は全くと言ってよいほど研究されていない。本プロジェクトでは、従来の物理学における未開の領域として、温度勾配が引き起こす熱流による新しい量子輸送現象(熱量子効果)を解明し、それによって非平衡量子物理学という新分野を切り開くことを研究目的とした。

主な研究成果として、新しい熱量子効果として量子ネルンスト理論を、さらに、スピントロニクス基礎理論として磁化についての理論を提案し発表した。以下にその概要をまとめる。

1. 「量子ネルンスト効果」の理論予測(中村、東大生産研羽田野、横浜国大白崎)

古典的なネルンスト効果とは、バルクの試料の z 方向に磁場、 x 方向に温度差をかけたときに y 方向に電位差の現れる現象である。我々は、この量子効果を新しく理論的に提案した。つまり、化学ポテンシャルがランダウ準位の間にあるときは、(1) ネルンスト係数（温度差に対する電位差の応答関数）が強く抑制され（図3.2.3-1）、(2) 熱コンダクタンスが量子化されるという結論を得た[1]。

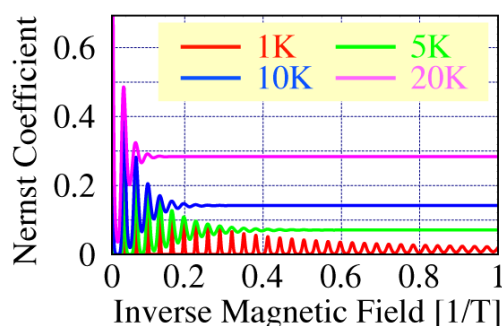


図 3.3.1.3-1 ネルンスト効果の量子化

2. 「スピン軌道相互作用系の非平衡輸送現象」の理論予測(中村、東大生産研羽田野、横浜国大
白崎)

まず、バリスティックな伝導をする擬一次元系の中にスピン軌道相互作用がある場合に、化学ポテンシャルがサブバンドの中央にできたギャップの中にあるときだけ、面内の磁化が発生する事を理論的に明らかにした(図3. 2. 3-2) [2]。

次に、「非可換ゲージ場理論によるスピン軌道相互作用の解析と完全スピンスピンフィルターの提案」を行った[3]。二次元系のスピン軌道相互作用が非可換ゲージ場理論 (Yang-Mills 理論) に等価であることを指摘し、磁場とスピン軌道相互作用の強さを調節することによって完全スピンスピンフィルターが実現できることを示唆した。この我々の提案した完全スピンスピンフィルターは、入力する電子流のエネルギーによらない点が、従来とは異なる著しい成果である

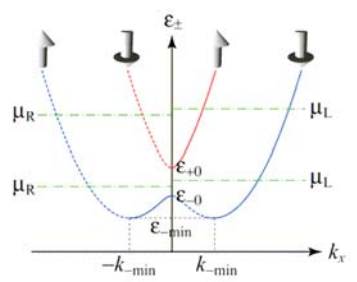


図 3. 3. 1. 3-2 擬一次元スピン軌道相互作用系のサブバンド構造

将来計画として、金属-半導体の接合界面を想定(図 3. 2. 3-3) し、その両端に温度勾配を与えた場合の量子熱整流作用 (熱ダイオード) の新たな提案の理論検討を中村と分子研の米満を中心に行っている。この新デバイスの理論検討を完成させ、さらにこれらの成果を基盤に新たな温度差による量子効果を用いた量子ナノデバイスの提案を本プロジェクトで培った共同研究グループで取り組む計画である。



図 3. 3. 1. 3-3 金属-半導体-金属接合の模式図

- [1] H. Nakamura, N. Hatano, and R. Shirasaki: "Quantum Nernst Effect", Solid State Communications, Vol. 135 No. 8 (2005) pp. 510-514.
- [2] N. Hatano, R. Shirasaki and H. Nakamura: "Gap-mediated magnetizaion of a pseudo-one-dimensional system with a spin-orbit interaction," Solid State Communications, Vol. 141 No. 2 (2007) pp. 79-83.
- [3] N. Hatano, R. Shirasaki, and H. Nakamura: "Non-Abelian gauge field theory of the spin-orbit

3.3.1.4. 人間における顔認知のメカニズム：特に機能発達と学習効果の解明

本研究の目的は、

- 1) 脳波、脳磁図、機能的磁気共鳴画像（fMRI）、近赤外線スペクトロスコピー（NIRS）、経頭蓋磁気刺激（TMS）といった非侵襲的脳機能計測法を用い、脳科学者、臨床小児科医と乳幼小児心理学の専門家が協力して、人間における顔認知に関する発達学習過程および顔認知障害の病態生理を明らかにすることを目的とする。（生理学研究所，柿木）
- 2) 様々な表情や動きを伴うバーチャルリアリティ画像を製作し、幼少児にも興味を持って実験に参加してもらえるようにする。
- 3) 研究成果を教育現場に還元することを最終的な目標とする。（生理学研究所，柿木）

これらの課題，特に課題2を達成するために，没入型バーチャルリアリティ装置で人の表情を可視化するための基礎検討を行った。2つのCCDカメラを使用した三次元スキャナを利用し、人の表情情報を取得した（立命館大学，仲田）（図3.3.1.4-1）。取得データをバーチャルリアリティ装置で表示可能な形式に変換し、結果、24993頂点と49982ポリゴンからなる人の立体画像を生成した。全てのポリゴンにはCCDカメラから取得した人の肌のテクスチャが張られており（立命館大学仲田）、非常にリアリティの高い映像となっており、観測者がこの表情画像を自分の好きな角度で観察することができるようにした（図3.3.1.4-2）。



図 3.3.1.4-1 3次元スキャナ

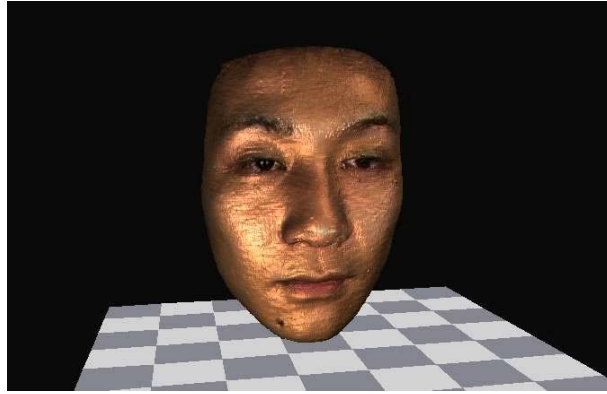


図 3.3.1.4-2 バーチャルリアリティ空間上に構築した人の表情

3.3.2. 民間との共同研究（石黒）

弱電離プラズマを利用した半導体製造装置（バッチ式プラズマ処理装置）の反応室内におけるプラズマ生成及びプラズマ挙動を解析するプラズマシミュレーション技術の開発研究を行った。最初に、半導体製造装置中の基礎パラメータ及び特性を評価し、シミュレーションモデルの満たすべき条件を明確にすると共に、手法などの調査を行った。次に、RF 電場の印加、荷電粒子と中性粒子の衝突によるプラズマ生成、装置の幾何形状を取り入れた粒子シミュレーションコードを開発し、放電によりプラズマが生成、維持されることを確かめると共に、装置内の密度分布などを調べた。さらに、容器中に構造物の効果を取り入れることを可能とし、そのプラズマ挙動への影響を明らかにした。

さらに開発したシミュレーションコードを改良し、複数 CPU を利用しての実行を可能とするなどの高速化を行い、実機の大きさに対応するシミュレーションを実行した。当初、実験とシミュレーションで不一致が見られたが、実験における測定に問題があったことが判明し、その結果修正した実験結果とシミュレーションはよい一致を示した。すなわち実験に先行してシミュレーションが正しい結果を出していたといえる。

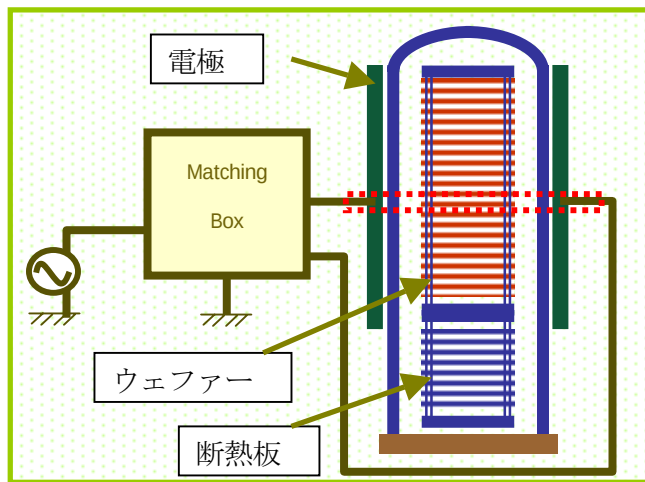


図 3.3.2-1 プラズマプロセッシング装置(日立国際電気(株))。点線で囲まれた部分がシミュレーション領域。

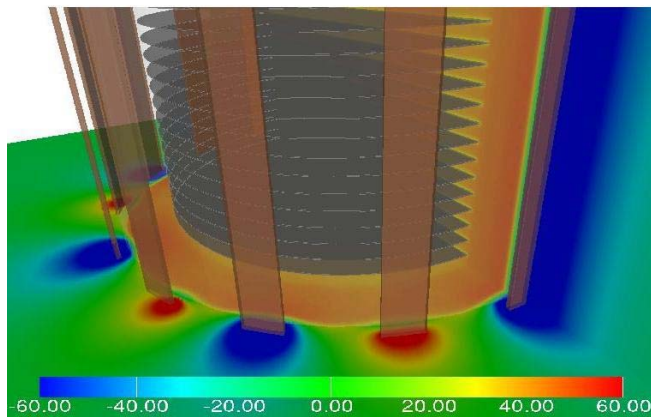


図 3.3.2-2 電位分布のスナップショット。電極付近にシースポテンシャルが形成されている。

3.4. 国際共同研究

核融合研究はITERの建設が始まったことにより、新しい時代に突入したと言わねばならない。どのような核融合研究領域の研究者にとっても、これからの核融合研究においてはITERとの関わりの議論なしでは済まされない。シミュレーション科学研究部では、このような今後の研究の主要な流れを見失うことなく、ITERに関わる研究に積極的に取り組んできた。さらに日本におけるITER研究の基盤が青森県の六ヶ所村であることを鑑みて、平成19年4月の研究部発足と同時に六ヶ所研究センターを立ち上げている。本節では、まずITERとの関わりにおいて現在進行中のシミュレーション科学研究部の研究活動について報告する。また国際協力の視点から、研究部を中心にして開催されてきたいくつかの国際会議についても報告する。シミュレーション研究では日米協力活動の初期の段階から、核融合理論研究協力体制(JIFT: Joint Institute for Fusion Theory)が活発に機能しており、この活動についても報告する。最後に自然科学研究機構の国際共同研究拠点ネットワークの形成の研究課題について報告する。

3.4.1. ITER連携、ITER-BA連携と六ヶ所研究センター

ITERの核燃焼の研究は環状磁場によるプラズマ閉じ込め研究にとってマイルストーンとなるべきものであり、当研究部でもITERとの協力関係を重視しており、研究への参加とまた核燃焼に関わる成果の適切なフィードバックを考えている。本節では3.4.1.1にITER-BAに関わる主として六ヶ所研究センターにおける活動、3.4.1.2に将来必要となるフランスとの間の高速ネットワークについて述べ、3.4.1.3にITER連携活動の現状を報告し、最後に3.3.1.2においてITERに関わる主な研究活動について述べる。

3.4.1.1. 六ヶ所研究センターにおけるITER連携活動等

六ヶ所研究センターは、平成19年4月に、大学共同利用機関として国際熱核融合実験炉(ITER)及び関連する幅広いアプローチ(ITER-BA)計画との連携を円滑に進めるためにシミュレーション科学研究系の中に設置した。ITER-BAとの連携活動を進め易くするためにITER-BAの実施場所である青森県上北郡六ヶ所村に開設した。ITER-BA計画は、ITER計画を補完する日本・欧州原子力共同体間の国際協力プロジェクトであり、2007年度から10年間に六ヶ所村と那珂市で実施される。六ヶ所村では、核融合材料照射施設の工学実証及び工学設計活動、国際核融合エネルギー研究センター(核融合計算機シミュレーションセンター、原型炉設計研究開発調整センター、ITER遠隔実験センター)の活動が行われる。ITER及びITER-BAの日本の実施機関は、日本原子力研究開発機構に指定された。

六ヶ所研究センターの当面の役割は、広報活動、関連情報の大学等への迅速な提供、大学等からの意見の伝達、学術の立場からITER及びITER-BAとの連携である。また共同研究推進のため、研究環境基盤として高速情報ネットワークを整備する。

(1) 日本原子力研究開発機構（青森研究開発センター）との連携活動

ITER-BA の実施に必要な建屋（管理・研究棟）の設計が日本原子力研究開発機構（JAEA）で行われている。設計作業は平成 19 年度末に終え、平成 20 年度から建設工事が開始される。大学共同研究機関として ITER-BA に参画するために必要な研究室等について、JAEA と調整等を行っている。また、研究基盤として必須な高速情報ネットワークの構築について、ITER-BA の需要（活動の時期、活用形態、接続先など）と六ヶ所村で実施が想定されている青森県の行う「青森県原子力人材育成・研究開発センター（仮称）」の需要、核融合科学研究所の需要などを取りまとめる作業を開始した。ITER-BA 活動のための高速情報ネットワークは国立情報学研究所が運営する学術情報ネットワーク SINET3 と接続する予定であり、取りまとめた結果をもとに国立情報学研究所に協力依頼を行う予定である。

(2) 青森県（エネルギー総合対策局 ITER 支援室）との連携活動

青森県は、大学と研究機関と産業界の連携による原子力に係る技術者、研究者の人材育成・研究開発を行う「青森県原子力人材育成・研究開発センター（仮称）」を構想している。この構想では、大学内の講義だけでなく実際に稼働中あるいは建設中の原子力施設で研究を行い、研究施設で研究者の指導の下に教育・研究を行うこととし、原子燃料サイクル施設があり、ITER-BA が実施される六ヶ所村に設立を予定している。連携を予定している大学は北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学、弘前大学、八戸工業大学であり、研究機関は日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所、（財団法人）電力中央研究所、（財団法人）環境科学技術研究所である。産業界は（社団法人）日本原子力産業協会、電気事業連合会、日本原燃株式会社である。この青森県の原子力人材育成・研究開発推進構想に協力し、実現のための検討委員会に参画している。

（平成 19 年 7 月 2 日第 1 回青森県原子力人材育成・研究開発推進構想検討委員会、平成 19 年 10 月 9 日第 2 回青森県原子力人材育成・研究開発推進構想検討委員会）

(3) 六ヶ所村との連携・協力（広報活動）

六ヶ所地域振興開発(株)が行う「核燃料サイクル関係推進調整等（六ヶ所村内における理解促進活動）」に協力し、村内ショッピングセンター「リーブ」内に、地元の方々に核融合研究の理解を深めて頂くために、核融合科学研究所のパフレット類を展示・配布し広報活動を行っている（平成 19 年 8 月より）。

3.4.1.2. ITER連携と長距離広帯域ネットワーク

ITER 本体はフランスに建設され、青森県六ヶ所村には遠隔サイトが建設される予定である。これらの間には、研究活動の一環として情報ネットワーク経由で大量のデータ転送が行われることになる。一方、このネットワーク回線は米国経由となり地球を 2/3 周する可能性が大きく、信号の往復時間(RTT)が 300 ms となり、回線の帯域を上げても転送速度が上昇しないという現象が予

想される。

この問題は、信号が伝わる時間とネットワークの帯域幅の積（速度遅延積）が大きい長距離広帯域ネットワーク(Long fat pipe network, LFN)にて発生することが知られている。確実に誤りがなくデータ転送を行う際にはTCP/IP プロトコルが選択されるが、輻輳回避機能を実現するため一般に使われる Reno アルゴリズムでは問題がある。そこで、最良のアルゴリズムを開発するため、これまで LFN 向けとして提案されている輻輳アルゴリズムを遅延模擬装置によって評価した。

その結果、RTT=300 ms の場合、理想的にパケット損失がない場合の 10 分間平均の転送速度は Reno では 320Mbps であるが、CUBIC-TCP, Hamilton-TCP, Scalable-TCP では 700Mbps 以上と 2 倍以上の改善が見られる。また、パケットロス(10^{-6})がある場合は、Reno では 150Mbps まで半減するが、CUBIC-TCP 等では 600Mbps 以上を維持した。これらより ITER 国際研究を進める上でも標準的なアルゴリズムである Reno に替わる輻輳アルゴリズムの開発の重要性が明示できた。

今後、10Gbps への対応のほか、国内における実環境での測定（SNET; SINET3 を利用した核融合研究のためのバーチャルラボラトリ）を予定している。

[1] T. Yamamoto, “Estimation of the advanced TCP/IP algorithms for long distance collaboration”, Fusion Eng. Des. (in press)

3.4.1.3. ITER連携活動（ITER協力専門委員会およびITPA活動など）

研究所における ITER 計画への研究支援を適切かつ円滑に実施するため、平成 16 年度に ITER 協力専門委員会と連携研究推進センター学術連携研究室 ITER 連携研究部門が設置された。ITER 協力専門委員会は、研究所の幅広い分野（核融合科学、炉工学等）において ITER 連携研究を推進するために、研究所内の各分野の専門家（14 名）及び客員（JAEA:前日本原子力研究所）（2 名）で構成されている。シミュレーション科学研究部からは中島徳嘉 LHD・磁場閉じ込めシミュレーション研究系研究主幹と藤堂泰准教授が委員として参加しており、藤堂准教授は ITER 連携研究部門も併任している。ITER 協力専門委員会と ITER 連携研究部門は、ITER 連携研究活動の支援体制及び活性化の方法、ITER 連携研究活動に関する具体方策等について検討してきた。また、研究所での ITER 連携研究を活性化するため 国際トカマク物理活動(ITPA)に関する活動方針を定め、ITPA 会合を「ITER（トカマク）関連研究あるいはトラスプラズマの総合的理解を目指す研究」に関する一つのワークショップとして位置付け、研究所からの発表を定着させることを目指している。そのために、それぞれ年 2 回程度開催される 7 つの ITPA トピカルグループ（「輸送及び内部障壁の物理」、「閉じ込めデータベースとモデリング」、「周辺及びペデスタルの物理」、「スクレイプオフ層とダイバータの物理」、「MHD、ディスラプション及び制御」、「定常運転」、「計測」）会合への研究所からの派遣者を組織的に検討し推薦している。

シミュレーション科学研究部から ITPA への貢献として、まず中島研究主幹が MHD とディスラプショントピカルグループのメンバーを務めていることが挙げられる。ITPA トピカルグループ会合へもシミュレーション科学研究部から参加・発表を行っており、その状況を表 3.3.1.1-1 にまとめる。2005 年 7 月の「MHD、ディスラプション及び制御」トピカルグループ会合では、ITER

弱負磁気シアプラズマにおけるアルフベン固有モードに関する拡張オーム則を用いたドリフトモデルシミュレーションの結果を報告し、参加者の注目を集めた。また、ITPA メンバーが中心となって作成した Nuclear Fusion の特別号“Progress in the ITER Physics Basis”には、藤堂准教授が共著者として参加した[1]。

2007 年からトカマク物理の詳細な理論と実験の知見を提供するために ITER SUMMER SCHOOL が開催されていくことになった。この目的は、大学院生、ポスドクターらの若手研究者が、現在そして今後予期される磁場閉じ込め核融合装置に対する挑戦的な課題に取り組めるようにし、また、ITER プラズマの物理を開拓する上で必要とされる幅広い知識を獲得することである。第1回である2007年は、7月16日から7月20日の5日間にかけてプロバンス(フランス)に位置する Institute for Political Studies において、“Turbulent transport in fusion plasmas”をテーマとして乱流輸送に関する講義が行われた。シミュレーション科学研究部からは、佐藤雅彦助教が出席した。統合輸送コード「TASK」をベースとした、3次元階層統合シミュレーションコードの開発を進めているところであり、輸送現象の知見を深める適切な機会であった。また、シミュレーション科学研究部において指導している仲田資季総研大五年制博士課程2年生を旅費をサポートして参加させた。ジャイロ運動論方程式を用いた乱流輸送の研究をテーマとしており、タイムリーなものであった。

ITER-BA への連携活動としては、2007年7月に開所した国際核融合エネルギー研究センターのプロジェクト委員会に中島研究主幹が委員として参加している。また、ITER-BA 計算機選定においても利用できるベンチマークコード PAS+を核融合研と大学が協力して整備した。

[1] A. Fasoli, C. Gormenzano, H. L. Berk, B. Breizman, S. Briguglio, D. S. Darrow, N. Gorelenkov, W. W. Heidbrink, A. Jaun, S. V. Konovalov, R. Nazikian, J.-M. Noterdaeme, S. Sharapov, K. Shinohara, D. Testa, K. Tobita, Y. Todo, G. Vlad and F. Zonca:

“Progress in the ITER Physics Basis Chapter 5: Physics of energetic ions”,

Nucl. Fusion, Vol. 47, No. 6 (2007) pp. S264-284.

トピカルグループ	開催時期	開催地	発表題目 (発表者)	参加者数
定常運転	2004年3月 8日～12日	那珂	• Fast frequency sweeping mode in JT-60U (Y. Todo)	1
MHD、ディスラプション及び制御	2005年7月 4日～6日	タラゴナ (スペイン)	• Simulations of Alfvén eigenmodes in an ITER-like plasma (Y. Todo)	1
MHD、ディスラプション及び制御	2007年10月 10日～12日	ガルヒンク (ドイツ)	—	1

表 3.4.1.3 シミュレーション科学研究部からの ITPA トピカルグループ会合への参加状況

3.4.1.4. ITER連携研究

当研究部では LHD に代表される 3 次元環状磁場配位を中心として、階層繰り込みモデルを用いたシミュレーションを推進しているが、3 次元磁場配位の理論及びシミュレーションは、2 次元磁場配位を包括するものであり、直接的、及び間接的に ITER、ITER-BA 活動に貢献できるものである。従って、現プロジェクト体制により、ITER、ITER-BA 活動に対して貢献を行う。更に、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトで進めている、予測性を持ち先進的な階層繰り込みシミュレーションは、物理課題重点型の階層拡張シミュレーションと実験適用型の階層統合シミュレーションとから構成され、階層拡張シミュレーションで得られた知見を階層統合シミュレーションへと、階層繰り込みモデルを用いて取り込むという構造をもっており、物理課題重点型の階層拡張シミュレーションで探求される様々な物理課題そのものが、直接的あるいは間接的に ITER、ITER-BA 活動で重要とされている物理課題、例えば、 α 粒子が励起する TAE モード・ITG 及び ETG 乱流輸送・新古典テアリングモード (NTM)・抵抗性壁モード (RWM) 等に対応している。また、実験適用型の階層統合シミュレーションは、通常軸対称を仮定して行われる実験シナリオの策定において、離散的なトロイダルコイルが作り出す浅いリップル等の α 粒子等に対する 3 次元効果を評価することに役立つと考えられる。このように、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトの体制、及び研究課題そのものが、平成 16 年度の外部評価委員会で求められていた ITER・ITER-BA への貢献に応えられるものであると考えている。以下に、ITER・ITER-BA 活動に直接的に寄与できると考えられる主な課題について述べる。

3.4.1.4.1. ITERにおけるアルヴェン固有モード

ITER などの磁場閉じ込め核燃焼プラズマにおいては、重水素と三重水素の核融合反応から発生する 3.5MeV の α 粒子がアルフベン固有モードを共鳴相互作用によって不安定化し、成長したアルフベン固有モードによって α 粒子の閉じ込めが劣化する可能性がある。このため、高速 α 粒子とアルフベン固有モードの相互作用は核融合プラズマの重要な研究課題である。本格的な核燃焼プラズマの実現には ITER を待たねばならないため、この問題を予測する上で計算機シミュレーションが果たすべき役割は大きい。ここでは、ITER と特に関係の深い研究課題を挙げる。

アルフベン固有モード挙動予測の精度を向上するために、MEGA コードにドリフトモデルと拡張オーム則を導入した [1]。ドリフトモデルはイオン反磁性ドリフトとイオン有限ラーモア半径効果を含む流体モデルであり、その方程式系は MHD とよく似ている。このモデルを用いて 1 次元運動論的アルフベン波のシミュレーションを実行し、分散関係がよく再現できることを確認した。同時に、以下に示す電子のランダウ流体モデルを用いた拡張オーム則を MEGA コードに導入した。

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{en} \left(\frac{1}{2} \nabla P - \mathbf{j} \times \mathbf{B} \right) = \eta_{LF} \mathbf{j}_{||}$$

$$\eta_{LF} = \frac{m_e}{n_e e^2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} v_{te} |k_{||}|$$

$$|k_{||}| = \frac{1}{2qR_0}$$

磁場に平行な波数の大きさ $|k_{\parallel}|$ は TAE ギャップの中心周波数に基づいて評価されている。この拡張オーム則により電子ランダウ減衰による実効的な電気抵抗が取り入れられている。

この拡張 MEGA コードを用いて、TFTR の D-T 実験において観測されたトロイダルモード数 $n=4$ の TAE のシミュレーションを実行し減衰率を計測した結果、減衰率は実周波数の 0.5%であった。これは NOVA-K による解析結果の約半分の値である。ランダウ流体モデルの計算においては、磁場に対して平行方向の波数が用いられる。減衰率計算の精度向上のためには、平行方向の波数をより注意深く評価する必要があるものと考えられる。この拡張 MEGA コードを用いて、ITER 弱負磁気シアにおける α 粒子駆動型不安定性のシミュレーションを実行した。初期条件は、ITER Technical Basis を参考にし、 α 粒子分布は D-T 反応率と減速時間に基づいて計算した。中心部での α 粒子ベータ値は 2%であるのに対して、 α 粒子によって駆動される不安定性を調べるためにバルクプラズマの初期ベータ値は空間的に一定に設定しており、その値は体積平均値 2.77%である。上に述べたように減衰率を過小評価していることを考えると、この計算は α 粒子駆動型不安定性による α 粒子輸送の上限を与える。線形段階では、プラズマ中心付近の低 $n(n=2-5)$ アルフベン固有モードが不安定であり、最不安定モードは $n=3$ であった。高速 α 粒子の軌道幅が最不安定モード数の決定に強く影響し、一般に ITER では高速 α 粒子軌道幅とプラズマ小半径の比は既存装置での NBI 実験の高速イオンよりも小さいが、ここで調べたプラズマは中心での安全係数が 3 を越えるため、既存装置と同程度のトロイダルモード数が不安定であったと解釈できる。非線形段階での α 粒子ベータ値減少の最大値は中心値と比較して 5%であった。

より精度の高いシミュレーションを目指して、電磁プラズマの新しいジャイロ運動論的シミュレーションモデルを構築した [2]。このモデルには独自に考案した全特性曲線法 [3] を適用し、磁場に対して平行な電場成分はアンペールの法則の時間微分から計算した。さまざまな電子ベータ値に対して運動論的アルフベン波の複素周波数が正しく計算されることを実証した。加えて、格子サイズが電子スキン長よりも 10 倍大きく、従来の δf 法では計算することができない場合でも、全特性曲線法を用いれば運動論的アルフベン波のシミュレーションが可能であることを示した。平成 20-21 年度には、この電磁プラズマシミュレーションモデルを用いた 3 次元コードを開発する計画である。

[1] Y. Todo, “Simulations of Alfvén eigenmodes with an extended Ohm's law”, Journal of Plasma Physics, Vol. 72, No. 6 (2006) pp. 817-820.

[2] Y. Todo and A. Ito, “Construction of a Gyrokinetic Plasma Simulation Model for Electromagnetic Phenomena”, Plasma and Fusion Research, Vol. 2 (2007) pp. 020(1-5).

[3] Y. Todo, “A Complementary Fluid Method in delta-f Particle Simulation”, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 81, No. 11 (2005) pp. 944-948.

3.4.1.4.2. 乱流輸送研究と ITER・ITER-BA との関わり

これまでに研究が積み重ねられているトカマクやヘリカル型磁場閉じ込め核融合装置と同様に、ITER においても異常輸送の評価と予測は重要な課題としてあげられている。特に ITER-BA 活動

において、大規模なシミュレーションを活用したプラズマ乱流輸送研究の進展が期待されている。旧・理論・シミュレーション研究センターならびにシミュレーション科学研究部では、5次元ジャイロ運動論的ヴラソフシミュレーション・コード (GKV コード) を独自に開発し、トーラス系におけるプラズマ乱流とゾーナルフローのシミュレーション研究を進めてきた。ここから得られる成果は、LHD プラズマ閉じ込めの理解にとどまらず、トカマクや ITER を含めたトーラス系一般に通用する普遍性を獲得すべく進められている。

旧・理論・シミュレーション研究センターでは、平成 16 年度に非線形 GKV コードを開発し、まず、トカマクにおけるトロイダル・イオン温度勾配 (ITG) 乱流とゾーナルフローのシミュレーションを行った。ゾーナルフローを含む ITG 乱流系の統計的な定常状態を分布関数揺動のレベルから再現することに成功するとともに、測地的音響モード (GAM) の無衝突減衰過程と定常ゾーナルフローを与える分布関数を高精度シミュレーションにより明らかにした [1]。

平成 17 年度には GKV コードを地球シミュレータに移植し、192 ノード利用でおよそ 5Tflops という高い性能を達成した。これを用いて DIII-D を模したパラメータについて ITG 乱流輸送の大規模シミュレーションを実行した [2]。乱流輸送の定常状態を非常に明瞭に再現するとともに、ゾーナルフロー励起の非線形過程や GAM 振動の励起がシミュレーションにおいて同定された。さらに、トカマクでの有限軌道幅効果を含んだ GAM 振動数とその減衰率を理論的に導出し、GKV シミュレーションによる結果と非常に良い一致を得た [3]。この結果は、トカマクのジャイロ運動論的シミュレーションの精度を検証するための指標として認められ、国内外の他のシミュレーションコードの検定にも用いられている。

平成 18 年度には、地球シミュレータを用いて、電子温度勾配 (ETG) 乱流の大規模な GKV シミュレーションを実行し、標準的パラメータ (DIII-D Cyclone base case) のもとで ETG 乱流の飽和状態をはじめて確認した [4]。(以上、渡邊、洲鎌)

平成 19 年度は、ITG および ETG 乱流の飽和過程をより基礎的なレベルから解明するため、スラブ配位でのシミュレーション研究を進めている。(仲田、渡邊、洲鎌)

平成 20 年度以降も、ヘリカル系における乱流輸送や帯状流のジャイロ運動論的シミュレーション研究やプラズマ乱流の基礎的な研究から多くの知見を得つつ、有限ベータプラズマ領域へのモデルの拡張を行い、ITER 装置に代表されるトカマク型磁場閉じ込め装置の乱流輸送特性の解明への貢献を継続する計画である。また、乱流輸送の局所的シミュレーションから得られた輸送係数モデルは、輸送コードに組み込むことができれば ITER の放電シナリオの研究に間接的に役立てることもできる。

- [1] T.-H. Watanabe, and H. Sugama, “Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence”, Nucl. Fusion Vol.46, 24-32 (2006).
- [2] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando i Margalet, “Gyrokinetic-Vlasov simulations of the ion temperature gradient turbulence in tokamak and helical systems” in Theory of Fusion Plasmas (edited by J. W. Connor, O. Sauter, and E. Sindoni, AIP, 2006) p264.
- [3] H. Sugama and T.-H. Watanabe, “Collisionless damping of geodesic acoustic modes”, J. Plasma Phys. Vol. 72, 825-828 (2006).

- [4] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and W. Horton, “Gyrokinetic theory and simulation of toroidal ETG turbulence and zonal flow”, 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, UP1.00066 (2006).

3.4.1.4.3. ITERにおける新古典テアリングモード

新古典テアリングモードは ITER のベータ限界を制限すると考えられている。新古典テアリングモードはトロイダル電流分布がテアリングモードに安定な場合であっても発生する。この不安定性は非線形不安定性であり、磁気島が発生することによって、磁気島内のブーツトラップ電流が失われる事によって不安定になる。この不安定性が起こる磁気島幅の閾値を求めることが ITER のベータ限界を予測する上で重要であると考えられている。

LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトが行っている多階層間相互作用のシミュレーション研究は、磁気島と乱流の相互作用に取り組んでおり、その研究は、新古典テアリングモード発生問題に応用可能である。LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトでは、多階層間相互作用の典型的な問題である磁気島と微視的乱流の相互作用を数値シミュレーション及び理論の両面から解析し、その階層間相互作用の物理機構の理解を深め、階層統合モデルに使用できるような理論モデル構築に対する知見を得ることを目的として、多階層間相互作用の研究を理論的な側面から行っているカルフォルニア大学サンディエゴ校の P. H. Diamond 教授と共同研究を行っている。この共同研究では、磁気島が乱流から受ける影響と乱流が磁気島から受ける影響の両方を同時に取り入れた理論モデルの構築を行う。

この磁気島と微視的乱流の多階層相互作用のモデルでは、乱流としてドリフト波乱流を考える。この乱流は異常輸送を起こし、圧力分布を変える。そして、磁気島の成長はブーツトラップ電流を通じて電子圧力の分布に大きく左右される。我々は新たに、磁気島の非線形発展を記述する方程式において乱流による動径方向の異常輸送および磁気島自身による輸送の変化を導入した。また、磁気島の成長に伴って生じる圧力分布平坦化により乱流の成長率が低下する効果を乱流の時間発展を記述するモデル方程式に導入した。これらの方程式を用いることにより、通常の磁場閉じ込めプラズマのように微視的乱流が背景に存在する状態において、新古典テアリングモードが発生する磁気島幅の閾値を評価する。この新しい評価は乱流の影響で磁気島成長の閾値が大きくなること明らかにした。これは乱流が磁気島安定化に寄与することを示している。また、この磁気島発生に対する新たなベータ値依存性を示した[1]。

平成 20 及び 21 年度を念頭においた今後の発展として、乱流領域拡散の効果を取り入れて乱流の空間分布を考慮に入れたモデル方程式を構築する予定である。また、閉じ込め装置サイズからイオン運動論効果まで含んだ多階層時空間スケールを扱い得る二流体モデルに基づいたシミュレーションコードにブーツトラップ電流と磁力線平行方向の熱拡散効果を導入する。そして、磁気島と乱流の多階層相互作用のシミュレーションとして新古典テアリングモード発生問題のシミュレーションを行うことを可能にする。

- [1] A. Ishizawa, P. H. Diamond, and N. Nakajima, Proceedings of 17th International Toki Conference

3.4.1.4.4. ITERにおけるRWM

トカマクプラズマでは、抵抗性壁モードの発生によるベータ値の制限が報告されており、ITERにおいても抵抗性壁モードの安定化は重要課題の一つとなっている。本研究ではシミュレーションにより、抵抗性壁モードの非線形挙動を明らかにすることを試みた。平成16年度から平成19年度にかけては、低ベータ円柱トカマクに対する簡約化磁気流体力学(MHD)方程式系を用いて、自由境界問題における非線形シミュレーションの数値計算技法の確立、および、抵抗性壁モードの基本的性質を明らかにすることを行った。まず、自由境界問題を取り扱うために擬真空プラズマモデルを用い、シングルヘリシティを仮定した2次元コードを開発した。擬真空プラズマモデルは、真空領域を抵抗が大きく密度の小さい擬真空プラズマで置き換えるものである。開発したコードを用いて、ポロイダルモード数 m とトロイダルモード数 n が $(m,n)=(3,1)$ の抵抗性壁モードに対する非線形シミュレーションを行い、プラズマ平衡流の飽和レベルに対する影響を調べた。その結果、回転が小さい時は飽和レベルが回転の大きさに依存しないが、回転がある大きさよりも大きくなると、飽和レベルが減少することを明らかにした。また、この計算結果は回転の大きさに対するモード構造の変化で説明できることも明らかにした。[1]

次に、シミュレーションコードを3次元コードへと拡張し、異なるヘリシティを持つモード間の相互作用について調べた。本研究では $(m,n)=(3,1)$ の抵抗性壁モードが支配的なモードであるが、 $(m,n)=(5,2)$ と $(2,1)$ の内部モードも弱く不安定な場合の平衡分布を考えた。シミュレーションによると、初期段階では $(3,1)$ モードが支配的であるが、その後 $(5,2)$ モードが強く不安定化され、プラズマ周辺部の磁気面が破壊され、温度が低下する現象が見られた。その温度の低下領域が $q=2$ の有理面に到達したときに、 $(m,n)=(2,1)$ モードが強く不安定化されプラズマの大変形をもたらす可能性があることが分かった。このシミュレーションでは、非線形状態において多くの高次モードが発生している。そのため、より多くの高次モードを含めた非線形シミュレーションを行い、数値シミュレーションの妥当性の検証を現在進めている。[2]

これまでに開発したシミュレーションコードは、ポロイダルフラックスの拡散項を陰的に取り扱うことで、擬真空プラズマの抵抗によるクーラン条件を取り除いていた。しかし、非線形項については陽的に取り扱っているため、シアールフベン波によるクーラン条件で時間積分の刻み幅が制限される。特に、真空プラズマの密度が小さいと、シアールフベン波の伝播速度が速くなるため、このクーラン条件の問題は、3次元シミュレーションを長時間行う上で深刻な問題である。この問題を解決するために、完全陰解法を用いたシミュレーションコードを今後開発していく。完全陰解法を用いると、クーラン条件に制限されずに、求める計算精度により時間刻み幅を選択することが可能となる。完全陰解法を用いたシミュレーションコードはロスアラモス研究所の Glasser 博士により、スペクトル有限要素法による2次元シミュレーションコードが開発されてきている。今後、共同でコードの3次元化を進める計画である。そこで、平成20年度以降は、この完全陰解法を用い、自由境界問題を取り扱い可能な非線形 MHD シミュレーションコードの開発を進めていく。まず、シングルヘリシティを仮定して円柱プラズマに対する、擬真空プラズ

マモデルを用いた2次元シミュレーションコードの開発を行う。ここで新たに開発したコードを用いて抵抗性壁モードの計算を行い、すでに計算していた簡約化MHD方程式による抵抗性壁モードの非線形シミュレーション結果との比較、検討を行う。そして、完全陰解法を用いたこのシミュレーションコードを3次元シミュレーションコードへと拡張し、トーラスプラズマにおける抵抗性壁モードの非線形シミュレーションを行い、ITERにおける抵抗性壁モードの非線形挙動の先行シミュレーションを行っていく計画である。

[1] Masahiko Sato and Noriyoshi Nakajima, "Nonlinear evolution of resistive wall mode in a cylindrical tokamak with poloidal rotation", Physics of Plasmas 13 (2006) pp. 102507-1 - 16.

[2] Masahiko Sato and Noriyoshi Nakajima, "Nonlinear three-dimensional simulations of resistive wall modes", Journal of Plasma Physics 72 (2006) pp.1223 - 1227.

3.4.1.4.5. 階層統合シミュレーションとITERとの関わり

LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトで推進している階層繰り込みシミュレーションの構成要素の一つである階層拡張シミュレーションのコアコードは、2次元環状磁場配位を対象とした拡散輸送モデルに基づく統合輸送コード(TASK)を3次元環状磁場配位に拡張したTASK3Dを基本としている。拡散輸送モデルにおける2次元環状系との大きな違いは、真空の回転変換の存在を考慮した回転変換の時間発展、及び軸対称性の欠如が生み出すトロイダル粘性で表現される衝突周波数に反比例する新古典拡散($1/\nu$ リップル拡散)とそれが決定する径電場の時間発展である。このような軸対称性の欠如に由来する効果を3次元MHD平衡に基づいて直接的に取り扱うため、ITER等における離散トロイダルコイルが作る浅いリップルの効果を摂動展開的な手法を用いなくとも評価することが可能となる。新古典輸送が径電場に依存しない状況は、(軸)対称性とクーロン衝突の運動量保存に由来するため、周辺部における α 粒子等の直接損失、非弾性衝突、離散トロイダルコイルによる対称性の欠如は、ITER等のトカマクにおいても、周辺部分の新古典輸送は径電場依存性を有することを示唆する[1]。以上の評価は、拡散輸送モデルとは別に、粒子損失、非弾性衝突、対称性欠如を考慮した新古典輸送解析を必要とするが、3次元環状磁場配位の解析を基本として対応可能と考えられる。

階層拡張シミュレーションの開発においては、平成20年度以降、不純物を考慮した新古典輸送解析の多粒子系への拡張、中性粒子の考慮、高速粒子直接損失の評価等がコアプラズマ領域及び周辺領域で計画されており、ITERプラズマにおける3次元磁場配位効果の考察へ貢献できると考えている。

[1] N.Nakajima and M.Okamoto, "Neoclassical flow, current, and rotation in general toroidal systems", Journal of Physical Society of Japan, Vol.61, No.3, 1992, pp. 833-843.

3.4.2. プラズマ数値シミュレーション国際会議およびアジア太平洋プラズマ理論会議

第19回プラズマ数値シミュレーション国際会議（ICNSP）および第7回アジア太平洋プラズマ理論会議（APPTC）を合同国際会議として、平成17年7月12日（火）より15日（金）までの4日間の日程で、奈良県新公会堂（奈良市）で開催した。

プラズマ数値シミュレーション国際会議は、プラズマ物理や関連領域における計算機シミュレーション研究を中心に、最近の研究成果に関する招待講演と研究発表およびそれらを基にした議論や研究交流を行うことを目的としている。同会議はこれまで、北米大陸（アメリカ合衆国とカナダ）でのみ開催されてきたが、平成15年9月、ボストン郊外で行われた第18回ICNSPの組織委員会において、北米大陸以外で初めての会議として日本開催が了承され、第19回ICNSP組織委員会（委員長：堀内利得）が組織された。一方、アジア太平洋プラズマ理論会議は、アジア太平洋地域におけるプラズマ・核融合理論研究の交流・連携を目的として、これまで韓国、中国、日本、オーストラリアで開催されてきた。平成14年7月、シドニーで行われたAPPTC組織委員会で、第7回の会議を日本で開催することが了承され、第7回APPTC組織委員会（委員長：岡本正雄）が組織されました。その後の両組織委員会との折衝により、第19回ICNSP会議および第7回APPTC会議が合同国際会議として奈良市で開催されることが了承された。この会議の開催に当たっては、合同国際会議実行委員会が組織され、シミュレーション科学研究部のスタッフをはじめ、核融合科学研究所、国内の大学の関係者の協力により、会議が成功裏に行われた。会議には、海外20カ国からの57名の参加者を始めとする総数は198名の参加があった。

会議初日の開会式および佐藤哲也地球シミュレータセンター長による「マイクロ-マクロ連結シミュレーション」とする基調講演が行われた。基調講演に引き続き、宇宙・天体プラズマ、基礎プラズマ、レーザープラズマ、磁場閉じこめプラズマ、物質科学、生物物理、可視化・シミュレーション技術等の最先端の学術研究に関する175件の論文発表が、7つのオーラルセッションと2つのポスターセッションで行われ、それぞれのテーマで白熱した議論が行われた。この会議では、毎回、講演内容の理解を助け、活発な議論や研究交流を促進し、さらには若手研究者を育成する目的から、予めそれぞれの発表者から集めた詳細な研究内容を記した概要を概要集としてまとめ、会議の参加者に配布している。また、この会議の特徴として、シミュレーション研究の学際的な性格を基に、異なる分野間の交流や連携研究を促す立場から、プラズマ・核融合分野の研究発表ばかりでなく、関連する分野として、宇宙・天体プラズマ、物質科学や生物物理のシミュレーション研究者にも門戸を開いている。今回の会議では、参加者全体の約4分の1がこれらの関連分野からの参加となった。会議での議論から、これまでの研究で蓄積されたミクロの物理とマクロの物理を如何に自己無撞着に結合して、自然現象を全体として理解するかという問題が、これらの分野で直面する重要な課題として、共通して存在することが明らかにされた。国際共同研究等を通じて、この問題に関する今後の発展が期待される。また、バンケットでは、松本紘京都大学生存圏研究所長の「人類生存圏科学」とする特別講演が行われ、人類の置かれている現状を直視した時、ホリスティックな視点から、環境・エネルギー問題を考える必要があることが強調された。この問題提起も、シミュレーション科学の直面している問題と多くの共通点を持っており、ホリスティックな視点からの研究が今後の大きな学問潮流となることを示唆している。

この会議の大きな使命の1つが、シミュレーション研究に係る3つの賞の受賞者の選定および会議での表彰である。1番目が3年前になくなられたUCLAのJohn Dawson博士を記念して

設立された“John Dawson Prize”で、プラズマシミュレーション研究の発展に多大な功績をあげた研究者に授与される。今回の会議が2回目で、地球シミュレータセンター長の佐藤哲也博士が授与された。2番目は、シミュレーション結果の可視化に関するもので、最も優れた物理的で洞察的な可視化表現を用いた研究発表に対して与えられる“Oscar Buneman Award”である。動画部門と静止画部門があり、動画部門に青木順氏（京都大学）が、静止画部門に三浦英昭博士（核融合研）が授与された。3番目は、最も優れた大学院生の研究発表に対して与えられる“Best Graduate Student Presentation”で、武木田秀人氏（東北大学）と森高外征雄氏（名古屋大学）が授与された。この3賞の存在は、この会議が単なる研究交流の場であるばかりでなく、若手研究者の育成や、シミュレーション手法、計算機科学、科学的可視化等のシミュレーション研究に必要な最先端の研究・開発情報を得る等、シミュレーション研究者にとって非常に重要な会議となっており、シミュレーション科学の発展に大きく寄与しておりことを雄弁に物語っている。

なお、第20回 ICNSP は、テキサス大学核融合研究所（IFS）がホストとして、平成19年10月にオースティン市で開催された。この会議には、シミュレーション研究部をはじめ、日本から多数の参加があった。また、第8回 APPTC は、インドのプラズマ研究所（IPR）がホストとして、平成19年12月にアーメダバードで開催予定である。

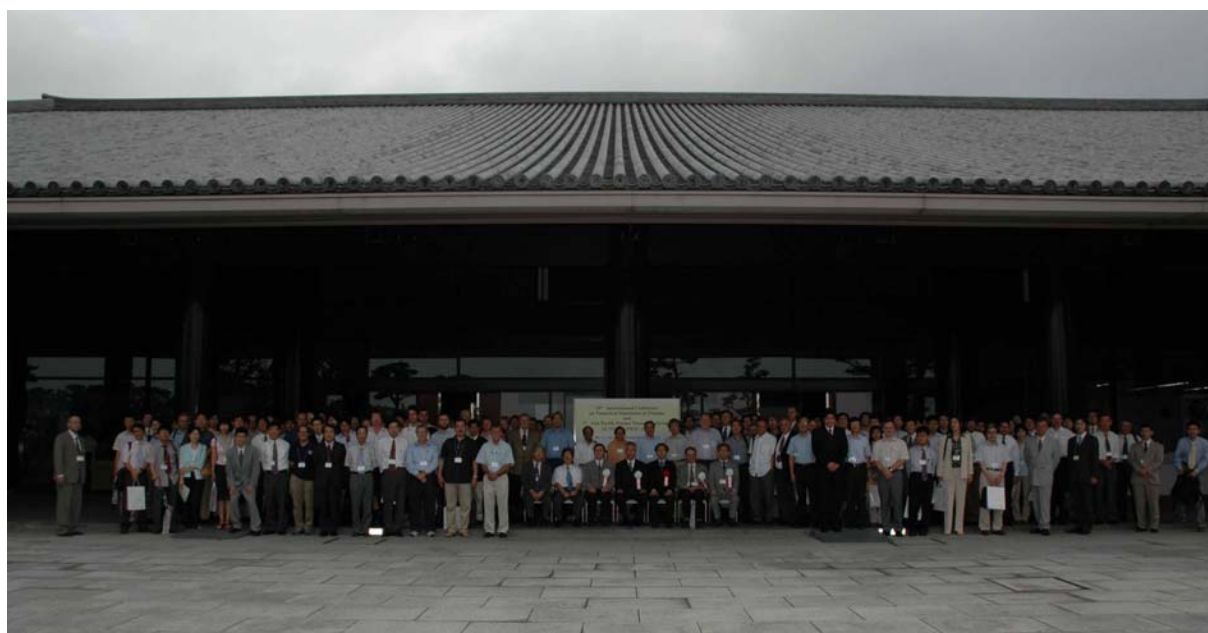


図 3.4.2. 会議参加者の集合写真。

3.4.3. JIFTによる研究連携

JIFT プログラムでは、①プラズマの理論的理解、特に磁場閉じ込め核融合プラズマの輸送、加熱、平衡・安定性などの理解を目指し、②非平衡・非線形・開放系でのプラズマ複雑現象などの理解のためにシミュレーション研究を日米共同で推進することを目的として、ワークショップ、研究者派遣、共同計算プロジェクトなどを実施してきた。この実施に当たっては、日本側には核融合科学研究のシミュレーション科学研究部（旧理論・シミュレーション研究センター）を、米

国側にはテキサス大学核融合理論研究所をホスト機関として設け、計画の実施のための支援や調整を行ってきた。また、計画の立案と実施結果のレビューは毎年1回、J I F T運営委員会を日米交互に開催し、実施してきた。

a) LHD 中の MHD 直接数値シミュレーション

大型ヘリカル装置(LHD)に閉じ込められたプラズマの挙動を、非線形・圧縮性電磁流体力学(MHD)方程式の直接数値計算の立場から研究した。直接数値計算の性能(計算速度・計算精度)の向上のための数値スキームの開発の一環として、8次精度コンパクト手法をシミュレーションコードに実装した。従来の手法よりも打ち切り誤差が著しく小さくなり、磁力線並行方向への熱伝導効果が従来より大きな値で実行が可能になった。この改良による研究成果は、2006年8月にイタリア・ヴァレンナで開催された核融合プラズマ理論国際ワークショップで発表された(招待講演)。

また、MHD シミュレーションコードの将来的な二流体コードへの拡張を考慮し、Hall MHD 方程式のシミュレーション研究を、テキサス大学オースチン校のマハジャン教授と始めた。この研究のため、擬スペクトル法を用いたシミュレーションコードを開発した。この研究成果は、現在 Physical Review Letter 誌に投稿中である。

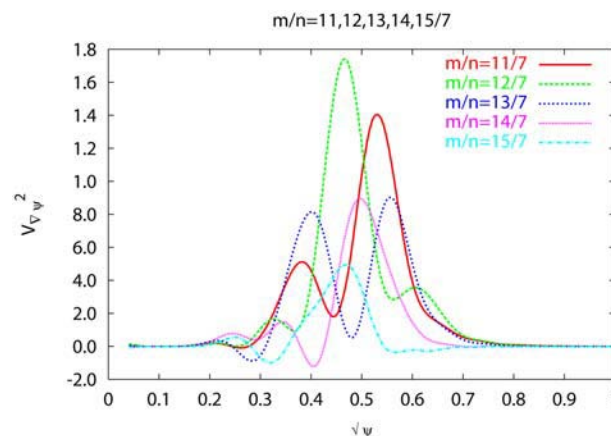


図 3.4.3-1 高精度 MHD シミュレーションで得られた、 $n=7$ 不安定モードの動径方向分布。バルーニング的なモード構造が見られる。

b) アルヴェン固有モードの時間発展における非線形 MHD 効果

MHD 流体と高エネルギー粒子の相互作用に関する連成シミュレーション手法に基づくシミュレーションコード(MEGAコード)を開発することにより、アルヴェン固有モードに関する様々な物理現象の解明に関する世界最先端の研究を行ってきた。最近の研究成果としては、アルヴェン固有モードの時間発展における非線形 MHD 効果を調べるためのシミュレーションを実行し、トロイダルモード数 $n=0$ の磁場揺動がアルヴェン固有モードの飽和レベルを抑制することを、世界で始めて明らかにした(図 3.4.3-2)。

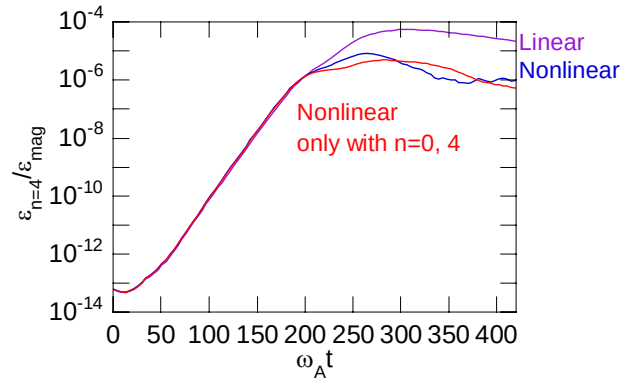


図 3.4.3-2 標準非線形 MHD 計算、線形化 MHD 計算、および $n=0, 4$ モードのみを含む非線形 MHD 計算における、 $n=4$ トロイダルモードのエネルギー時間発展の比較。

c) カオス散乱を伴う磁気リコネクション過程でのエネルギー開放問題の理論研究

(大谷寛明、T. Petrosky(テキサス大)、W. Horton(テキサス大))

磁気リコネクションの発生機構として重要な役割を果たすと推測されている、X 形に交わった磁場セパトリックス近傍での荷電粒子のカオス散乱過程を解明する目的で、X 点近傍での磁場構造を表現するモデルポテンシャルを導入し、ハミルトニアンによる荷電粒子軌道の定式化を始めた。

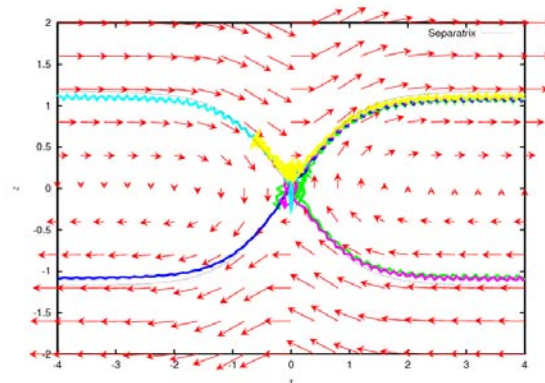


図 3.4.3-3 導入したモデルポテンシャルにおける荷電粒子の軌道をリープフロッグ法による数値計算で求めた。赤矢印は磁場を示す。

イオンの散逸領域では、イオンは磁化されていないため、meandering 運動と呼ばれる複雑な軌道を描く。この複雑な運動によって、イオン圧力の非対角成分が成長し、磁場凍結条件を破られる。イオンの散逸領域形成において、この meandering 運動が果たす役割について簡単なモデルで解析を行い、その関係を直接導くことができた。

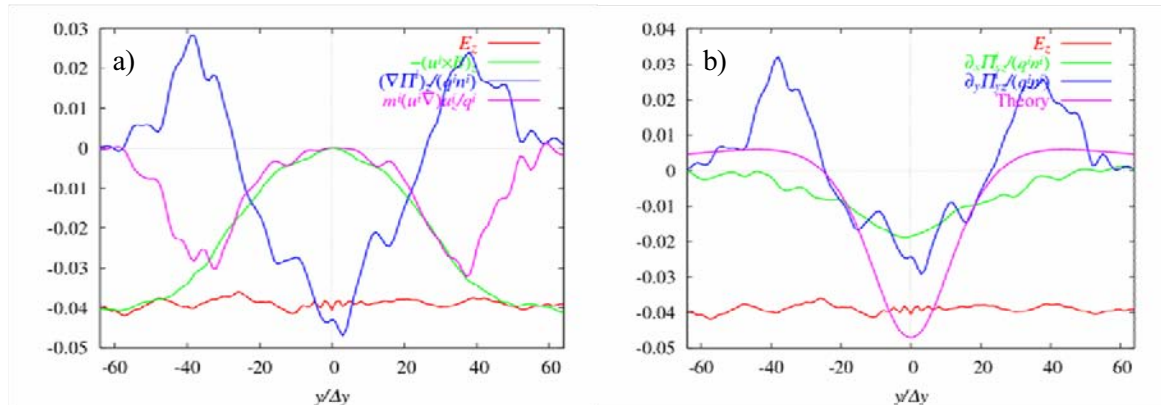


図 3.4.3-4 a)力のつりあい式における各項のプロファイルと b)理論から得られた圧力項。横軸は y である。a)赤線： E_z 、緑線： $-(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 、青線：圧力項、ピンク線：慣性項。b)赤線： E_z 、緑線：圧力項の x 成分、青線：圧力項の y 成分、ピンク線：理論。

d) 磁気流体波に対するホール電流効果

(Hameiri)

ホール電流効果を含んだ磁気流体モデルはホール MHD と呼ばれ、最も簡単な拡張磁気流体モデルである。このホール MHD の基本的な性質を理解するために、ホール効果によって磁気流体モデルの三つの基本波が受ける変更を調べた。下図は、横軸方向に一樣な磁場がある場合の波の位相速度を表す。ホール効果が大きい場合、非圧縮シアールヴェン波は流体的な圧縮波に変わることを明らかにした。

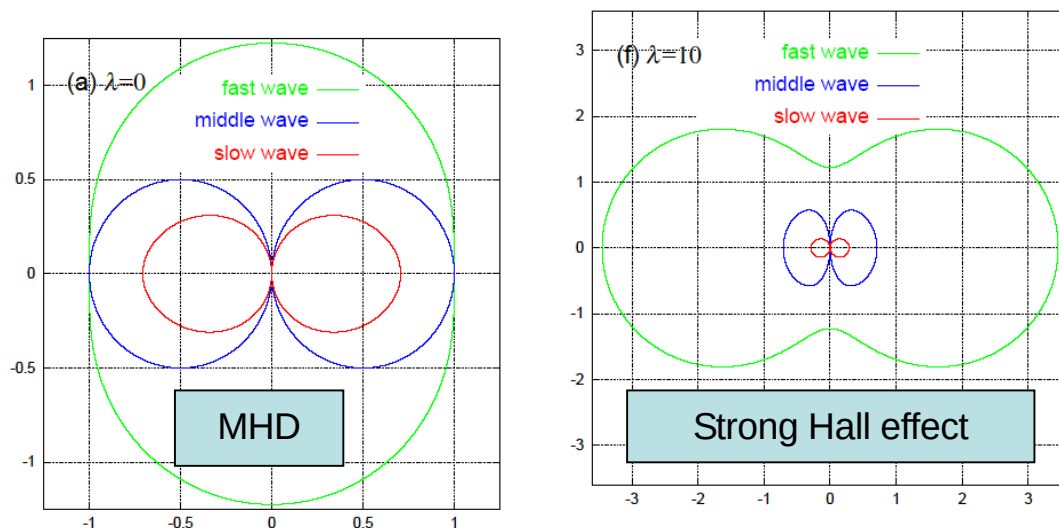


図 3.4.3-5 磁気流体波動の位相速度; (a) MHD、(b) 強いホール電流効果がある場合。

e) 簡約化二流体方程式の導出

(Ramos)

拡張磁気流体モデルを用いて高温磁場閉じ込めプラズマの不安定性を解析するために、Ramos

博士が導出した二流体方程式を簡約化し、新たな方程式系を導出した。ここで、簡約化のために大アスペクト比（磁場が強くその曲率も小さい）、垂直方向に比べ磁力線方向波数が小さいこと、ドリフトオーダーリング（イオン熱速度で特徴づけられる時間に比べ十分遅い現象に着目）を仮定した。得られた簡約化方程式系は、イオンジャイロ粘性テンソルを正確に扱っておりまた温度の非等方性を扱うことができる。さらに、重要性の小さい速い磁気音波を取り除くことでシミュレーションにおける時間ステップ幅を大きく取れること、磁場に垂直方向に波長が短くかつ磁力線方向には長いフルート型のモード構造を精度良く再現することが可能となること、アスペクト比が小さな低ベータトロイダル配位において扱う変数の数を減らすことができるなどの性質を持っている。また、簡約化された後も、二流体方程式の重要な性質である、ホール効果を含んだ一般化オームの法則、イオンジャイロ粘性、温度非等方性は保たれている。この方程式系を用いて、ドリフト波や種々の二流体効果を含んだ磁気流体的不安定性を同時に取り扱うことが可能となる。

さらに、拡張磁気流体モデルを用いたマルチスケール性をもつ平衡状態の解析の第一段階として、無衝突磁化プラズマの流体方程式の定式化において現れる完結の問題が重要となる非等方圧力をもつ一流体およびホール磁気流体モデルを用いて流れをもつ軸対称平衡の解析を行い、平衡状態を表す偏微分方程式の楕円性条件が流速と運動論的な波の伝播速度との関係によって得られることを明らかにした。

f) LHD におけるアルヴェン固有モード解析

(Spong)

高速イオンエネルギースペクトルの時間発展がNPAによって計測されているLHD実験がある。その中で#47645の実験では、アルヴェン固有モードの不安定化に伴って高速イオンエネルギースペクトルに減少部分と増加部分の両方が観測されている。減少部と増加部の高速イオン減速時間の比較から、アルヴェン固有モードによって高速イオンがプラズマ小半径の10%程度輸送されたものと推定することができる。このプラズマにおけるアルヴェン固有モードの周波数と空間分布をAE3Dコードを用いて解析し、実験で観測されたトロイダルモード数 $n=1$ の不安定性の候補として二つのTAEを見出した。その空間分布を図3.4.3-6に示す。

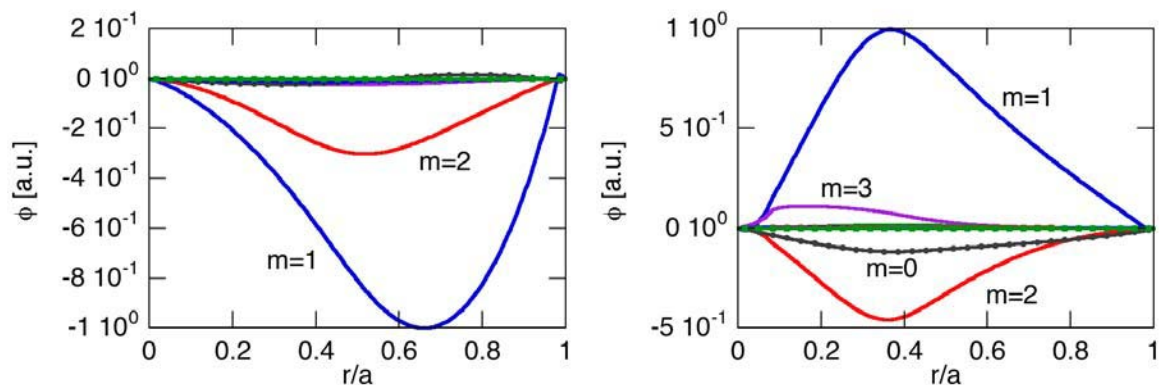


図 3.4.3-6 AE3D コードを用いて解析したトロイダルモード数 $n=1$ の二つの TAE。周波数はそれぞれ 42.7kHz (左) と 79.1kHz (右)。

g) 完全陰解法を用いた高精度シミュレーションコード開発
(Glasser)

時間スケールが異なる現象を含んだシミュレーションにおいて陽的解法を用いると、もっとも早い時間スケールの現象によりクーラン条件が決定され、興味あるゆっくりした現象の長時間シミュレーションは難しい。これに対する解決方法は完全陰解法である。完全陰解法では一般的にニュートン法が用いられるが、その反復過程で現れる大規模連立線形問題を高速に解く必要がある。この研究では領域分割法である static condensation、FETI-DP (Finite Element Tearing Interconnection-Dual Primal) 法[1]等によりこの課題の解決に取り組んでいる。図では、ロスアラモス研究所の Glasser 博士により開発されたスペクトル有限要素法コードを用いて、2次元拡散問題に対するスケーラビリティのテストを行ったものである。このテストでは、CPU 数の増加に伴って格子点数を増加させており、理想的なスケーラビリティを持つ解法では、CPU 数、格子点数の増加に依存せずに計算時間が一定になる。CPU 数が少数 (8 個以下) に対しては、ほぼスケーラビリティが実現できている。今後は、さらに多くの CPU 数を使用しても、スケーラビリティを実現できるよう改善を行っていく。この領域分割法は他のシミュレーションコードにも適用できる。例えば、ヘリカル系プラズマに対する統合シミュレーションコード TASK3D の 1 次元拡散型輸送モジュールへの応用も現在進めており、これにより非線形性の強い輸送現象や径電場の時間発展シミュレーションを高速に行えることが期待できる。

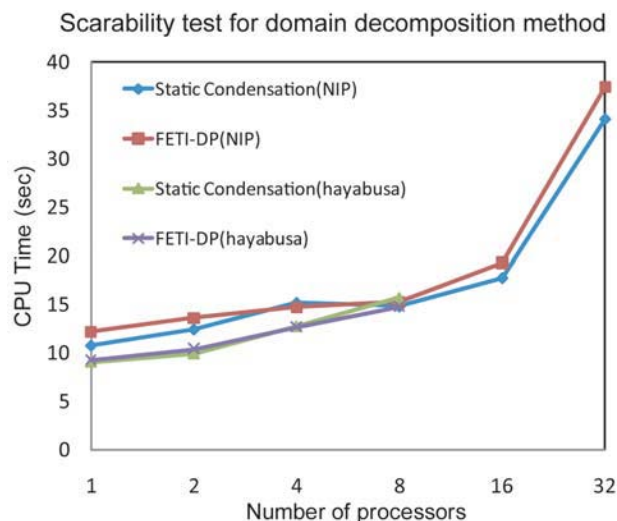


図 3.4.3-7 次元拡散問題を用いたスケーラビリティテスト。ロスアラモス研究所のクラスターマシン NIP と NIFS のクラスターマシン hayabusa においてテストを行った。

[1] Axel Klawonn and Olof B. Widlund, “Dual-Primal FETI Methods for Linear Elasticity” Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. LIX (2006) pp. 1523-1572.

3.4.4. 国際共同研究拠点ネットワークの形成

3.4.4.1. 課題「核融合と宇宙プラズマの実験およびシミュレーションにおける乱流領域の先進的な評価」

乱流プラズマの性質は、無数の非線形フィードバックループの中でともに連結している、広範囲の空間および時間スケール上で働く多数の個別な物理的プロセスによって支配される。このようなプラズマを理解し制御することを進歩させるために必要な条件は、プラズマからの観測された複雑な信号からモデルによらない情報を抽出する定量的手法を適用することである。これは核融合および宇宙、コンピューター・シミュレーション実験、両方において必要である。近年、複合系科学から得られた一連の技術は、プラズマのデータにおいて成功裡に適用された。これらの技術は以下のことを含んでいる。(1) 揺動データを分化し、尺度を直すこと。これは支配的な根本的プロセスの数、およびそれらが作動する空間と時間上の範囲についての情報を産出する。例えば MAST における核融合実験。(2) プロットの反復。これは太陽風および磁気圏のプラズマ中の事象間での相互の情報内容とパターン反復の定量的測度を提供する。(3) 核融合実験の大域的な閉じ込めの特性に関連するパルス事象の標準統計分析。空間と時間上の間欠性を通してプラズマの乱流へ至る過程を定量化する。初期の試みは、3 つの波による相互作用シミュレーション・モデルについてなされた。空間と時間上のパターンの特異値分解は、雑音分離からの信号に使用された。幾何学な次元とエントロピー変化は、コヒーレントな構を含む分岐と直接関係がある。データを二値変数に粗視化することは、相転移および臨界現象に関する理論からの技術を可能にした。一般的に、どれくらいモデル・シミュレーションが実験データと一致するのかを計る能力は、修正あるいは補足モデリングを必要とするかもしれない現実のデータにある新しい物理学的内容を分離する手助けをすると思われる。いくつかの重要な磁気閉じ込め核融合プラズマ実験からの周辺乱流データに関する研究における主な取り組みに加え、課題「核融合理論と宇宙プラズマへの応用」の渡邊智彦准教授との協力における大型コンピュータシミュレーションデータの補足的分析、特にドリフト乱流と帯状流のジャイロ運動論 (GKV コード) シミュレーションに関心が移ってきている。

周辺プラズマ乱流測定は、磁気核融合装置中のプラズマ閉じ込めの理解における現在の研究にとって重要であり、この問題に関連する研究は、とりわけダイナミックスの間歇的様相の数量化に重点的に取り組んでいる。磁氣的閉じ込め装置の周辺領域の乱流および間歇性についてより理解を深めるために、MAST 装置、TORE SUPRA トカマク及び PISCES 線形装置上での測定から得られ、標準統計分析に対してベンチマークされた 3 つのデータセットが、分析されて来ている。本課題では、プラズマ乱流の自己相似性及びマルチフラクタル特性のいくつかの解析に重点的に取り組んでいる [1, 2, 3]。

分野間連携、国際ネットワーク、拠点形成という観点から本ネットワーク内の他の事業との連携について、本課題の目標は、核融合実験、宇宙及びシミュレーション実験の乱流データを解析するための高度な複合システム的方法の研究であり、Culham-MAST チームとの共同研究を基盤とした、主要な核融合実験の周辺プラズマ乱流時系列の一般的なスケーリング特性に主に取り組んでいる。この点において、課題「核融合理論の宇宙プラズマへの応用」における渡邊智彦准教授と協力し、シミュレーションデータの分析、特にドリフト乱流と帯状流のジャイロ運動論 (GKV コ

ード) シミュレーションにおける取り組みを計画し、既に始めている。更に、平成 17 年度の R. Dendy 氏の訪問中に初められた協力は、LHD 周辺プラズマ乱流解析において、大野哲靖助教授(名大)らの LHD チームとより深まってきている。

海外からの招聘および海外への派遣について主たる成果としては、MAST, TORE SUPRA 及び PISCES プラズマ閉じ込め装置で得られた周辺乱流データの調査のため、いくつかの高度な方法が試みられ、プラズマ乱流の自己相似性(局所的対全体的など)及びマルチフラクタル特性のいくつかの解析に重点的に取り組んだ[1]。また、2つの会議でのプレゼンテーション及び NIFS レポートが行われ、2つのジャーナルレポートが準備されている。本ネットワーク内における現在の課題のいくつかと共同することが可能であると考え。上記にも書いたが、課題「核融合理論の宇宙プラズマへの応用」における渡邊智彦准教授と共にドリフト波乱流と帯状流の大規模なジャイロ運動論(GKV コード)シミュレーションデータ解析を続けていきたい。物質表面欠陥とフラクタル乱流特性の関係における物質科学課題「境界プラズマ乱流現象の統計性と再堆積材料表面過程に関する学際的研究」との区別として、本課題の目的はプラズマ乱流の基本的現象学、つまりコヒーレントな構造の構築、確率密度関数のマルチフラクタルおよびスケーリング特性と異常拡散との関係の解明にある。また、提示された方法論が、高部英明教授の課題「プラズマ・天文分野連携による実験室宇宙物理の国際拠点形成」と関連性があると考え。この点において、今後宇宙プラズマ観測からの乱流解析が予想される。

[1] M. Rajkovic, M.M. Skoric, K. Solna and G. Antar,
Characterization of local turbulence in magnetic confinement devices
Nuclear Fusion 47 (2007) 1-13

[2] M. Rajkovic, M.M. Skoric,
Characterization of Intermittency in Plasma Edge Turbulence
Contrib. Plasma Physics (in press).

[3] M. Rajkovic, M.M. Skoric, B. Dudson and M. Kono,
A Comparison of Intermittency in Neutral Fluids and Magnetically Confined Plasmas
17th ITC, Toki (2007) Plasma Fus. Res. (to appear)

3.4.4.2. 課題「核融合理論の宇宙プラズマへの応用」

プラズマは、言うまでもなく、核融合科学と宇宙科学に共通の研究対象である。1960 年代の核融合研究の初期や、同時期に行われた地球や太陽系空間探査の時代から、新しい理論解析手法やモデルの拡張を行いつつ、プラズマの理論研究は今日まで発展を遂げてきた。それらの内、基本的な課題については、プラズマ物理の基礎として確立され、核融合や宇宙プラズマなどの対象によらない普遍性を獲得している。しかし、それぞれの専門への分化が進んだ後も、核融合理論分野におけるジャイロ運動論に代表されるような、理論解析手法やシミュレーション手法の進展が見られる。本課題は、核融合理論で培われた理論モデルや解析手法を宇宙プラズマ現象に応用し、解析手法の有用性や普遍性を見出すとともに、この分野の国際共同研究ネットワー

ク拠点を構築することを目的としている。直接とりあつかう現象は異なるがゆえに、こうした活動を通じて、理論解析手法やモデルの汎用性を実証することができる。こうした目的のもとに、平成 17 年度より自然科学研究機構・連携事業の「**国際共同研究拠点ネットワークの形成**」の中の一プログラムとして本課題が採択され、以下のような連携課題が行われた。

平成 17 年度から 19 年度において、以下の研究テーマについて連携を行った。

- 簡略化磁気流体モデルの磁気圏 - 電離圏結合系への応用
- 無衝突流体方程式の運動論的完結モデルの導出と応用
- 新しい運動論的シミュレーション・モデルの構築
- ホール磁気流体モデルの理論および数値解析
- ジャイロ運動論的シミュレーション・コードの移植
- 乱流シミュレーションデータの先進的統計解析
- 磁気流体緩和理論の宇宙プラズマへの応用

海外からの招聘については以下のプログラムを実行した。

- **Juhyung Kim** (テキサス大学核融合理論研究所、USA)

平成 18 年 12 月 10 日から平成 18 年 12 月 23 日

ジャイロ運動論的シミュレーション・コードを用いた共同研究を有効に進めるため、**Juhyung Kim** 氏を招聘した。ジャイロ運動論とそれに基づくシミュレーション研究は、核融合プラズマの理論研究において重要な位置を占めている。これらは近年、地球磁気圏や宇宙プラズマの研究に応用されはじめており、連携先であるテキサス大学核融合理論研究所においては、ジャイロ運動論に基づく磁気圏プラズマ不安定性の理論研究が展開されている。核融合研で開発された GKV コードについて、**Kim** 氏の滞在中にその詳細部分について解説するとともに、テキサス大学の計算機に移植するための作業を行った。

- **Milan Rajkovic** (Vinca Institute of Nuclear Sciences, Serbia)

平成 19 年 2 月 1 日から平成 19 年 2 月 17 日

Rajkovic 博士は、当事業における課題「核融合と宇宙プラズマの実験およびシミュレーションにおける乱流領域の先進的な評価」（研究代表者：M. Skoric 教授）への協力のため平成 18 年 11 月 28 日から平成 19 年 1 月 31 日の予定で招聘された。この機会を利用して、乱流・カオスや統計物理の専門家である **Rajkovic** 博士の協力を得て、プラズマ乱流の解析についての協力関係を持つことは、本課題と上記課題との連携を進める上で非常に有意義であるため、博士の滞在を延長し、プラズマ乱流シミュレーション結果についての統計的解析手法の検討を行った。

- **R. Bhattacharyya** (Saha Institute of Nuclear Physics, India)

平成 19 年 3 月 4 日から平成 19 年 3 月 17 日

トカマクや RFP、スフェロマックなど、プラズマ内部電流が磁場配位に重要となる環状プラズマの平衡について、磁気流体緩和理論による研究がなされてきた。**Bhattacharyya** 博士は最小散逸原理に基づく緩和理論に精通し、さらに二流体プラズマへの理論の拡張を進めている。

最近は、太陽コロナなどの宇宙プラズマへの応用にも取り組んでおり、本課題の目的と合致した研究の展開を指向している。滞在中に磁気流体緩和理論の宇宙プラズマ現象への応用について議論を行った。

○ Milan Rajkovic (Vinca Institute of Nuclear Sciences, Serbia)

平成 19 年 10 月 14 日から平成 19 年 12 月 21 日

当事業における課題「核融合と宇宙プラズマの実験およびシミュレーションにおける乱流領域の先進的な評価」(研究代表者:M. Skoric 教授)と協力し、シミュレーションデータ統計的解析についての共同研究を行うため、Rajkovic 博士を招聘した。

海外への派遣については、以下のプログラムを実行した。

- 平成 18 年 1 月 29 日から 2 月 4 日かけて、核融合科学研究所の渡邊智彦、洲鎌英雄の両名がテキサス大学オースチン校の核融合理論研究所を訪問し、当地の W. Horton 教授およびその共同研究者と本研究課題についての打ち合わせを行った。簡略化磁気流体方程式を用いたフィードバック不安定性についての研究結果や、核融合プラズマにおける異常輸送研究で使われるジャイロ運動論やドリフト運動論の磁気圏プラズマへの適用について議論を行った。また、「無衝突流体方程式の運動論的完結モデルの導出と応用」、「新しい運動論的シミュレーション・モデルの構築」の研究テーマについては、当地の研究者と議論しながら、渡邊・洲鎌の両名を中心に研究を進めている。
- 平成 20 年 3 月に核融合科学研究所の三浦英昭がテキサス大学オースチン校の核融合理論研究所を訪問し、当地の S. Mahajan 博士と、ホール磁気流体方程式の新たな解析解と数値シミュレーションの比較・検証について共同研究の議論・打合せを行った。

4. 若手人材育成

あらゆる研究分野において、学生教育ないしは若手研究者の人材育成は、その研究領域の発展のためには必要不可欠の要素であり、最大限の注意と努力を払うべき課題である。シミュレーション科学研究部では、その前進のシミュレーション研究センターの時代から一貫して大学院教育に積極的に取り組むと共に、広く海外までも含む研究所外の学生及び若手研究者を対象とした教育活動である「アジア冬の学校」、またシミュレーション科学の広がりを目指して計画された「シミュレーション科学公開講座」などの企画にも力を入れてきた。本章においては、これらの若手人材育成のための活動について報告する。

4.1. 大学院教育

核融合科学研究所の大学院教育は、総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻、名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科との連携大学院、特別共同利用研究員としての他大学の学生の教育委託、以上の三本の柱によって成り立っている。名古屋大学との連携大学院と特別共同利用研究員制度では、博士前期課程と後期課程を通して大学院教育を行ってきたが、総合研究大学院大学では平成17年度までは博士後期課程のみを受け入れてきた。その後、総合研究大学院大学は平成18年度より5年一貫制博士課程教育を開始し、現在は学部卒業生を直接受け入れている。

総合研究大学院大学は、新しい国立大学として昭和63年10月に創設された。他の一般の国立大学とは極めて異なった特徴を持ち、全国の国立共同利用機関がその教育のための基盤となり、学生の教育は主としてそれぞれの研究所において行われる。さらに大学全体を統括するための本部が葉山に設置された。基本的な構想としては、博士研究者を育てることを主目的とし、そのために発足当初においては博士後期課程のみを設置していた。核融合科学研究所は、数物科学研究科の核融合科学専攻として平成4年4月から総合研究大学院大学に加わっている。このような大学院大学としての特徴は、そのまま核融合科学専攻における学生教育の特徴となる訳で、優れた研究環境の中で豊富な教員に囲まれた大学院教育が特徴である。また、学生の指導を主任指導教員と指導教員の二人制で行っていることも、他に見られない特徴となっている。

大学院教育は、博士前期課程（修士課程に相当する）と博士後期課程にわたり、前期課程のみを終了して卒業する学生もいるが、研究分野としての若手人材育成の業績としては博士課程を修了した学生が主な対象となるであろう。平成16年度以降、シミュレーション科学研究部とその前身である理論・シミュレーション研究センターの教員が主に指導を行い、総合研究大学院大学の博士課程を終了した学生は6人である。以下に、学生の名前と卒業論文の題目、また研究指導にあたった指導教員名を表に示す。

学位取得年度	学生氏名	博士論文題目	主任指導教員	指導教員
平成16年度 9月	李 百文	The Complexities on Ultra-Intense Laser Interaction with Plasmas	石黒静児	堀内利得

平成16年度 3月	阿部陽介	Numerical simulation of momentum transport processes through gas-liquid interface	渡邊智彦	堀内利得
〃	塩崎 優	歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形発展	藤堂 泰	渡邊智彦
〃	神保成昭	The Strike Point Pattern on the Local Island Divertor in LHD	岡本正雄	中島徳嘉
〃	相羽信行	Theory and Computational Method for the Stability Analysis of External MHD Modes in Toroidal Plasmas	岡本正雄	藤堂 泰
平成17年度 9月	Smirnov, Roman	Statics of Dust Particle on Plasma Facing Wall and Dynamics in Boundary Plasma	富田幸博	林 隆也
平成18年度 9月	Khan, Riaz	Simulation study on nonlinear dynamics of ballooning modes in a spherical tokamak	中島徳嘉	洲鎌英雄

表 4.1-1 シミュレーション科学分野における総合研究大学院大学博士課程卒業生

同じく連携大学院の名古屋大学大学院理学研究科の博士課程を終了した学生は以下の1人である。

学位取得年度	学生氏名	博士論文題目	主任指導 教員	指導教員
平成19年度 3月	杉村 剛	全球大気シミュレーションにおける鉛直および水平格子系に関する研究	高橋桂子	坂上仁志

表 4.1-2 シミュレーション科学分野における名古屋大学博士課程卒業生

4.2. 卒業生の活躍

博士号を獲得してシミュレーション科学部を巣だって行った卒業生の多くは、国内、国外の様々な研究所において優れた業績をあげている。その中から Roman Smirnov 氏と李百文氏のお二方の現況について報告する。

Roman Smirnov 氏はウクライナ・キエフ大学を卒業し、修士号を取得後、平成 14 年 10 月に総合研究大学院大学国際大学院コース（数物科学研究科、核融合科学専攻）に入学した。平成 17 年 9 月に「Statics of Dust Particle on Plasma Facing Wall and Dynamics in Boundary Plasma」の題目で理学博士の学位を取得した。同大学院を卒業後、米国、カリフォルニア大学サンディエゴ校に研究員として研究を開始した。これまでに、大学院在学中に行ってきた「プラズマ中の微粒子の振る舞いに関する研究」を発展させて、トカマク周辺プラズマ中での微粒子の輸送を解析するシミュレーションコード（DUSTT code）を開発した [1]。この輸送解析コードは、多くのトカマク装置（DIII-D, NSTX etc.）中での微粒子挙動の測定との比較検討に広く使われている。

参考文献

[1] R. Smirnov, A. Yu. Pigarov, M. Rosenberg, S.I. Krasheninnikov, and D. A. Mendis: "Modelling of dynamics and transport of carbon dust particles in tokamaks", Plasma Phys. Control. Fusion Vol. 49 (2007) pp. 347 – 371

中華人民共和国の北京応用物理・計算数学研究所の助教授である李百文(LI Baiwen)氏は平成 13 年 10 月に総合研究大学院大学に入学した。平成 16 年 9 月に「The Complexities on Ultra-Intense Laser Interaction with Plasmas」の題目で理学博士の学位を取得した。同大学院を修了後は、再び、中華人民共和国、北京応用物理・計算数学研究所に戻り、助教授として、大学院在学中の研究課題であるレーザープラズマ相互作用のシミュレーション研究を中心にさらに発展させて精力的に取り組んでいる。それらの成果は多くの論文誌に掲載されている。

参考文献

- [1] **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M.M. Skoric, H. Takamaru and T. Sato, “Acceleration of high-quality, well-collimated return beam of relativistic electrons by intense laser pulse in a low-density plasma”, **Laser and Particle Beam**, **22** (3), 307-314 (2004).
- [2] **Li Baiwen**, Ishiguro Seiji, Skoric, Milos M. and Takamaru Hisanori, “Stimulated Raman Scattering, Cascade-into-Condensate and Acceleration of Large Relativistic Electromagnetic Solitons in Intense Laser Interaction with an Underdense Plasma”, **Journal of Plasma and Fusion Research, SERIES Vol.6**, 275-278 (2005).
- [3] **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M. Skoric, M. Song and T. Sato, “Stimulated Raman cascade and photon condensation in intense laser plasma interaction”, **Physics of Plasma** **12**, 103103 (2005).
- [4] Wei Yu, **Li Baiwen**, M.Y. Yu, F. He, S. Ishiguro and R. Horiuchi, “Laser-field synchrotron radiation”, **Physics of Plasma** **12**, 103101 (2005).
- [5] Ishiguro S., Nikolic Lj, Skoric M.M. and **Li Baiwen**, “Intense Reflection of a relativistic laser pulse in subcritical plasmas”, **Journal of Plasma and Fusion Research, SERIES Vol.6**, 279-282 (2005).
- [6] **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M. M. Skoric M. Song and T. Sato “Ion-vortices in ion phase-space in intense laser interaction with subcritical plasma”, **Journal of Plasma Physics, Volume 72, Issue 06**, pp 1257-1261 (2006).
- [7] Long Li, **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M. Song and C. Y. Zheng, “Electromagnetic radiation at the electron plasma wave frequency by intense laser pulse interacting with low-density plasmas”, **Journal of Plasma Physics, Volume 72, Issue 06**, pp 1303-1307 (2006).
- [8] **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M. Skoric and T. Sato, “Large amplitude relativistic electromagnetic solitons due to strong photon-condensation in intense laser underdense homogeneous collisionless plasma interaction”, **Physics of Plasma** **13**, 042303 (2006).
- [9] **Li Baiwen**, Ishiguro Seiji and Skoric M M, “Large amplitude electromagnetic solitons in intense laser plasma interaction”. **Chinese Physics Vol. 15**, pp2046-2052 (2006)
- [10] **Li Baiwen**, S. Ishiguro, M. M. Skoric and T. Sato “Stimulated trapped electron acoustic wave scattering, electromagnetic soliton and ion-vortices in intense laser interaction with subcritical plasma”, **Physics of Plasma** **14**, 032101 (2007).

4.3. 若手研究者の育成

4.3.1. OD(ポスドク)研究者の活用

核融合科学研究所では、いわゆる「ポスドク」に相当する若手研究者に対して、COE 研究者として雇用することによりその研究活動を促進し、有力な人材として育てる努力を行っている。平成 16 年度から 19 年度までの期間で、シミュレーション科学研究の COE 研究者として採用された若手研究者とその研究課題は以下の通りである。

[平成 16 年度]

研究者氏名：石澤明宏

研究課題：輸送による平衡分布時間発展を考慮に入れた MHD シミュレーション研究

研究者氏名：石原典雄

研究課題：回転球殻における双極子磁場反転機構の解明

研究者氏名：長谷川裕記

研究課題：大振幅波における自己組織化とエネルギー輸送に関する大型シミュレーションによる研究

研究者氏名：沼波政倫

研究課題：非線形シグマ模型に関する、格子理論に基づく計算機シミュレーション

[平成 17 年度]

研究者氏名：神保成昭

研究課題：LHD 配位における周辺プラズマの輸送解析

[平成 19 年度]

研究者氏名：堀 暖

研究課題：プラズマ中の多スケール性、巨視的保存量を考慮したプラズマ乱流の研究

4.3.2. 若手研究者の研究活動促進

核融合科学研究所では、若手研究者の研究意欲を促進し、研究能力の国際性を高めることを配慮して、研究上の必然性のある場合は積極的に海外に派遣するための努力を行っている。シミュレーション科学研究の分野において、平成 16 年度から 19 年度にかけての若手研究者(45 才以下)

の海外派遣実績を以下に示す。

[平成 16 年度]

助教授：5 件

助手：3 件

[平成 17 年度]

助教授：6 件

助手：4 件

[平成 18 年度]

助教授：2 件

助手：9 件

4.4. アジア冬の学校

平成 16 年度より、それまで長年に亘って行われてきたシミュレーション科学教育講座を継続・発展させる形で、総合研究大学院大学(総研大)の特定教育研究経費の支援の下、「総研大アジア冬の学校」が土岐地区に於いて実施されている。この冬の学校は、岡崎地区の 2 専攻（機能分子科学専攻、構造分子科学専攻）と土岐地区の核融合科学専攻の 3 専攻の開催でスタートし、翌年より、宇宙科学専攻と天文科学専攻が加わり、物理科学研究科の 5 専攻の共同開催として、発展・継続されるようになった。

この学校の目的は、物理科学研究科の各専攻の連携の下、集中講義を実施し、総研大で行われているレベルの高い研究・教育内容を広く総研大以外の大学院生や若手研究者の教育に活用することである。特に、聴講者の範囲を国内ばかりでなく、アジアの国々の大学院生及び若手研究者にまで広げ、総研大の教員と直接交流を持たせることにより、総研大の知名度を大いに上げ、入学希望者を増加させることもその効果として期待されている。さらに、この企画を通じて、教育による研究科内での連携が深まることにより、総研大としての専攻を跨る共有のカリキュラムや学際領域に関する新しい知見が得られるものと期待され、実施されてきている。

土岐地区の実施に関しては、シミュレーション科学教育講座との共催ということもあり、理論・シミュレーション研究センターあるいはシミュレーション科学研究部を中心に、核融合科学専攻全体の企画として実施されてきている。平成 16 年度は 21 名（国内 15 名、海外 6 名）、平成 17 年度は 43 名（国内 24 名、海外 19 名）、平成 18 年度は 29 名（国内 13 名、海外 16 名）の参加があった。学年構成としては、博士課程前期（修士課程）の大学院生がほぼ半数で、残りは、3～4 年生を中心とした学部生、および博士課程後期の大学院生となっている。海外からの参加者としては、中国と韓国を中心に、台湾、バングラディッシュ、インド、ドイツ等となっている。

平成 17 年度からは、5 専攻の共通の中心テーマを掲げて、講義内容で連携を取りながら、各専攻がそれぞれの特長を生かしながら、講義内容を企画している。例えば、「シミュレーションによる自然の探求」（平成 17 年）、「極限状態の科学」（平成 18 年）、「ゆらぎと構造形成の科学－生命・物質・宇宙－」（平成 19 年）といった具合である。核融合専攻での開催日数としては 3～4 日で、講義と演習、ポスター発表、施設見学、懇親会といった内容が含まれている。講義の内容としては、数値シミュレーションの基礎、プラズマ物理の基礎から核融合を目指したプラズマ実験、核融合プラズマやプラズマの複雑現象のシミュレーションまでの幅広いものとなっている（図 4.4-1 を参照）。平成 17 年度からは、参加者と核融合科学研究所のスタッフによるポスター・セッションを設けて、参加者と研究所スタッフとの研究交流、参加者のための研究ガイダンスの機会とした。特に、参加者による、現在行っている研究、これまで行ってきた研究、あるいは、これからしてみたい研究の紹介を行うことにより、参加者との研究交流や情報交換が滑らかに行えたこと、また、総研大の大学院生と参加した学部生・大学院生との間の情報交換の場として有意義であったと好評である。毎年、終了後に、実施内容に関するアンケートを行い、翌年以降の参考資料としている（図 4.4-2 を参照）。これらの実施内容は、毎年ウェブを作成し、一般に公開している。

総研大は世界最先端レベルの研究を推進する幅広い学問分野の研究機関をその基盤機関として持つ学際的でユニークな組織で、その充実した研究教育環境は大学院生・若手研究者にとって非常に魅力的な存在である。その一方、学部を持たないため、総研大の大学院生の候補者である学部生の多くにその存在が知られていないのも事実である。参加者のアンケート（図 4.4-2 を参照）によると、「アジア冬の学校」に参加した学生・大学院生の多くは、この企画を通じて初めて総研大の存在を知ったと述べている。また、参加学生の中から、総研大に入学にした方や、近い将来、総研大に入学することを希望する方がいるなど、総研大学生の勧誘や総研大の宣伝という観点で着実に効果を上げつつある。恒常的に大学院への入学者を確保し、大学院教育を通じて様々な分野の若手研究者を育成していくという大きな使命を持った総研大にとって、「アジア冬の学校」の果たしている意義は大きいといえる。



図 4.4-1. 平成17年度核融合科学専攻での実施風景。左図：授業風景、右図：ポスター発表による研究交流の実施。

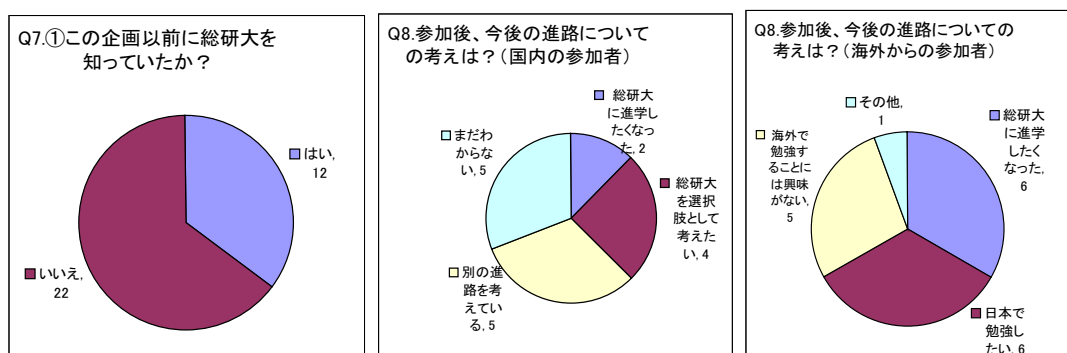


図 4.4-2. 平成17年度アンケート結果(抜粋)

4.5. シミュレーション科学公開講座

シミュレーション科学公開講座は 2001 年(平成 13 年)に第 1 回が開催され、それ以来、毎年 1 ないし 2 回開催されてきた。特に、平成 16 年からは、この成果を基に総研大アジア冬の学校と共催という形で開催されている。このアジア冬の学校については 4.3 で述べられている。平成 17 年には、単独で、HPF 講習会が開催されている。これは平成 14 年 2 月および平成 15 年 6 月に主催した講習会に引き続いて、HPFPC(HPF 推進協議会 <http://www.hpfdc.org/> : 会長津田孝夫先生)の全面的な御協力を得て、最近の動向、発展などについて 3 回目の講習会を開催した。なお、この講習会は核融合科学研究所共同研究大型シミュレーション共同研究「大型シミュレーション研究 (代表: 岡本正雄)」、核融合科学研究所共同研究理論共同研究「非線形複雑現象解明のための新しいシミュレーション技法の開発研究 (代表: 石黒静児)」、核融合科学研究所共同研究理論共同研究「非平衡開放系における秩序構造形成の物理 (代表: 堀内利得)」の一環として開催した。題目は「HPF/ES プログラミング — 実際にあった問題とその解決」(講師 村井 均 (地球シミュレータセンター))、「SPEC OMP の HPF 化とその性能評価」(講師 坂上 仁志 (兵庫県立大学))、「fhpf コンパイラの無償公開について」(講師 岩下 英俊 (富士通))、「並列プログラミングモデルの海外動向 調査報告」(講師 村井 均 (地球シミュレータセンター))、「HPF 開発状況」(講師 林 康晴 (NEC)) および Q&A であった。所内外から多数の参加者をえて有意義な講習会となったといえる。

5. まとめと展望

核融合プラズマに代表される非線形・非平衡・開放系のプラズマでは、複合物理過程の多重時空間スケール間の相互作用の結果として系全体の振る舞いが決まる。そのため、その全体像を明らかにするには、微視から巨視に及ぶ多重時空間スケール相互作用を自己無撞着に記述できる、「階層繰り込みシミュレーション」モデルの構築が必要とされる。これは、複雑現象の総合的理解という現代の科学が直面している重要課題へのシミュレーション科学からのアプローチであるといえる。

核融合科学研究所のシミュレーション研究は、平成 16 年度の外部評価においてその核融合研究への直接的な貢献と、基礎学術としての研究成果に対して高い評価を得た。翌年の平成 17 年度には、シミュレーション研究をさらに進展させることを目指して、組織検討委員会により新組織創設について検討され、平成 18 年 3 月にまとめられた最終報告書において、新しい組織を創設し、同時に三つの研究プロジェクトにより研究を推進することが進言された。シミュレーション科学研究部はこの報告書に沿った形で平成 19 年 4 月に創設され、現在約半年を経過したところである。

一方、プロジェクト研究による組織的研究は、研究部の創設に先立って平成 18 年 4 月より実質的に開始され、現在約 1 年半を経過した。この 3 つの研究プロジェクトにおいて、複雑現象の総合的理解という重要研究課題を共通項として、研究プロジェクトを推進してきた。また、大規模シミュレーションで得られた膨大なデータの中から、物理的に重要な情報を引き出すには、科学的な可視化手法を始めとする表現法・解析ツールの開発も共通課題となっている。それらを基礎に、さまざまな研究課題に対して、複数階層を繋ぐシミュレーションや複合物理モデルに基づくシミュレーション手法等の開発を行い、画期的な成果を幾つも上げてきている。また、その成果は、国内外の多くの研究者を含む共同研究の発展という形で、広がりつつある。

以下に、まず現在進行中のプロジェクト研究それぞれに対して研究成果を要約し、またそれらの研究方針に沿った形で、それぞれの研究プロジェクトの今後の研究の展望を述べ、共同研究や教育・若手育成などを重視して研究を進めていること、そして最後に次期中期計画に向けたシミュレーション研究の発展の方向性について述べる。

5.1. LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクト

環状系磁場閉じ込めプラズマを主たる研究対象として、核融合プラズマの閉じ込め物理の解明とその体系化を通して、シミュレーション科学の確立を目指すという中期計画の研究方針を具体化するために、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトは国内外の大学等との共同研究を基本として立案・推進されている。本プロジェクトは、明確な物理課題を設定して複合物理過程の階層間相互作用を緻密に解析する階層拡張シミュレーションの知見を、外部制御下での実験におけるプラズマの全時間変化の解析を行う階層統合シミュレーションへと繰り込む（階層繰り込みモデル）階層繰り込みシミュレーションを段階的に開発する。これにより、LHD-DD 実験、ITER 等に代表される燃焼プラズマに対する予測可能な先行シミュレーションを目指すとともに、最終的には磁場閉じ込め核融合炉システムにおける核融合プラズマの外部要因に対する応答を予

測できる階層統合シミュレーションコードとしての LHD ニューメリカル・テスト・リアクター (LHD Numerical Test Reactor) へと発展させる方向性で進めている。

核融合プラズマの本質に関わる複合物理過程の階層間相互作用を中心として研究課題設定を行っており、中期計画に設定されている環状系磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め物理機構の解明及びその体系化に関連した現在までの主な研究成果等は以下の通りである。

- 速度空間の微視的揺動レベルから配位空間内の巨視的構造形成の物理機構を解き明かすために、高精度ジャイロ運動論的ブラソフコードを開発した。速度空間の微視的揺動が帯状流の生成を介して配位空間内の乱流輸送レベルを規定することを示すとともに、イオン温度勾配に由来する乱流輸送と帯状流の生成に関して 3 次元磁場配位での乱流熱輸送レベルとプラズマパラメータの関連を議論できる水準に世界に先駆けて到達した。
- 複合物理過程の階層間相互作用研究の一環として、高エネルギー粒子の運動論効果と背景流体プラズマとの波 - 粒子 (巨視 - 微視) 相互作用による MHD モード励起シミュレーションを推進し、実験結果を説明できるレベルに世界に先駆けて到達した。核燃焼プラズマへの更なる進展を目指して、3 次元環状磁場配位への拡張、二流体背景プラズマへの拡張、新しい数値ノイズ軽減手法 (全特性曲線法) の開発を行った。
- 階層間相互作用研究の一環として、一流体 MHD モデルから微視的效果を含む二流体モデルへと拡張した少数多階層シミュレーションコードを開発し、微視的乱流と帯状流の競合状態が作り出す準平衡飽和状態から巨視的 MHD 不安定性が発現しうることを示し、微視的乱流と巨視的不安定構造の共存状態の存在を世界に先駆けてシミュレーションで示した。
- 複合物理過程の階層間相互作用研究の一環として、4 相が混在する多相解析をプラズマ中でのペレット溶発過程に関して行った。多相性と原子過程を考慮することにより、ペレットの形状変化による溶発率の増大を明らかにした。また、MHD 効果を取り入れることにより、プラズモイドがタイヤチューブ力により弱磁場側へドリフトすることを確認した。
- 階層間相互作用研究の基礎として、流れを持つ平衡に対する微視的空間スケールの影響を研究した。微視的效果の取り入れ方に応じて表現される波が異なり、その波の位相速度と平衡流の大小関係に応じて平衡の性質が変化することを明らかにした。
- 内寄せ LHD 配位において実験的に観測されている不安定性に対して MHD シミュレーションを実行し、不安定性が生み出す磁力線方向流・圧縮性等により、飽和状態が比較的良好な閉じ込め状態へと緩和することを示した。更に、高レイノルズ数を目指した数値スキームの改良、MHD オープンソースの作成を進めている。
- 周辺プラズマ領域における複合物理過程の階層間相互作用研究の一環として、プラズマに接する金属壁からの球状微粒子離脱条件、壁近傍の電位形成と微粒子の振る舞い、壁からの粒子放出を含んだ壁近傍の電位形成等を明らかにした。
- ネットワーク利用によるヴァーチャルリアリティ (VR) 装置間の接続、VR と数値シミュレーションの統合環境の構築、VR を使った設計支援環境の構築、VR を用いた核融合シミュレーション結果の簡易可視化、LHD 真空容器内の現実のイメージに近い VR-LHD モデルの作成等、多方面へ VR 関連研究を拡張した。裸眼立体視による 3 次元シミュレーションの可視化ライブラリも進めている。

階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データ、モジュール等として階層統合シミュレーションへと取り込む階層繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションの予測精度の向上を図り、最終的に LHD ニューメリカル・テスト・リアクターへ到達するという現在の方針を継続して行く。この方針に沿って、本中期計画期間中に第一世代階層統合シミュレーションコードを完成し、LHD で予定されている DD 実験、ITER 実験の先行シミュレーションを実施する。更に、次期中期計画においては、階層拡張シミュレーションの知見を、コア流体モデルでは過渡応答ダイナミクスとして、コア運動論モデルでは乱流輸送係数として、周辺モデルでは境界条件として第二世代階層統合シミュレーションコードへと繰り込み、階層統合シミュレーションコードの予測性度の向上を図る。

5.2. レーザー核融合シミュレーションプロジェクト

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターが高速点火方式を用いた実験計画 FIREX (Fast Ignition Realization EXperiment) を提案しており、本研究部でも平成 17 年よりレーザー核融合プロジェクトとして、大阪大学、摂南大学、九州大学、兵庫県立大学と密接な共同研究の下、シミュレーション研究を開始した。これには、階層的に積み上げられた多数の計算機シミュレーションコードから成る統合されたシステムの構築が必須となることから、放射・流体コード、相対論的粒子コードおよびフォッカープランクコードにより統合シミュレーションする Fast Ignition Integrated Interconnecting code (FI³)プロジェクトを推進し、現在までに以下の学術的成果が得られた。

- 従来は高速電子を適当な単色エネルギーの電子ビームと仮定してターゲットコアの加熱を計算していたが、このような評価は FI³ 統合シミュレーションによる評価とは全く異なっており、高速点火を詳細にシミュレーションするためには、統合シミュレーションが極めて重要であることを明らかにした。
- 平成 14 年に大阪大学で行われた金コーン付ターゲットを用いた高速点火実験と同程度の条件（例えば、加熱用レーザーのパルス長は 750[fs]）による FI³ 統合シミュレーションにより、コーン内に閉じ込められるスロッシング電子がコア加熱に大きな役割を果たすことがわかった。そして、このスロッシング電子の動向は、コーン前面に生成されるプレプラズマのスケール長に大きく影響され、現行パラメータではスケール長が 1.5[μm]のときに最適なコア加熱が得られ、コア部で 0.86[keV] と実験と同等な温度まで加熱が達成できた。
- 平成 20 年に開始される高速点火実験 FIREX-I で用いられる加熱用レーザーのパルス長 10[ps]と同程度の条件で FI³ 統合シミュレーションを行った結果、上記の短パルス加熱用レーザーでは最適なプレプラズマのスケール長ではポンドラモーティブ力により電子が掃き集められ、相互作用領域の密度が増加して高速電子ビーム強度の低下に結びつき、コアが十分に加熱されないことがわかった。この場合には、より長いプレプラズマが存在する方がコアは高い温度まで加熱されるため、この性質を積極的に利用できるよう、例えばコーン内側

にエアロジェルをコートするようなターゲットの最適設計が考えられる。

以上述べたように、実験条件と同等な条件による統合シミュレーションの重要性を明らかにし、世界に先駆けて高速点火実験のポイントデザインに踏み出せた意義は非常に大きい。今後は、平成 20 年度から開始される FIREX-I 実験の詳細な解析をするため、新衝突モデルの研究開発、統合に用いる相対論的電磁粒子シミュレーションの大規模 2 次元化、ハイブリッドコードによる高速電子輸送を含む統合シミュレーション、及びフォッカープランクコードと相対論的電磁粒子コードの双方向結合による、より高度な統合シミュレーションを目指す。なお、大学共同利用機関として、我が国におけるレーザー核融合の研究開発をシミュレーションの観点から推進するためには、一層の人員体制の整備が望まれる。

5.3. 複雑性プラズマシミュレーションプロジェクト

このプロジェクトは、自然科学研究機構の新分野創成型連携プロジェクト「自然界と実験室のプラズマ研究の交流研究拠点形成」、「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究拠点形成」、および「非平衡量子物理学の開拓」に基づく連携研究や関連大学との共同研究をその主たる基盤として、自然界プラズマにおける爆発的なエネルギー解放現象および複合物理系としてのプラズマと物質の間の相互作用等の研究テーマを当面の具体的な研究対象として、複雑性科学に共通する諸課題の解明に取り組んできた。特に、現代の科学が直面している重要課題の 1 つである、ホリスティックな視点による複雑現象全体の総合的理解にとって必須不可欠となる「階層絡り込みシミュレーションモデル」をはじめとする多階層・複合物理シミュレーションモデルの開発をその中心課題に据え、精力的にプロジェクトを推進してきた。

1) 磁気リコネクションに関する主な研究成果：

- 開放系電磁粒子シミュレーションコード (PASMO) を世界に先駆け開発し、長時間シミュレーションを実施することにより、駆動型無衝突磁気リコネクションに関する多くの重要な知見を明らかにした。特に、電流層中央での meandering 運動と呼ばれる荷電粒子の運動をその起源として、a) 電流層に 2 重構造が形成されること、b) 圧力テンソルが発達した結果、磁場凍結条件が破れ、無衝突磁気リコネクションが駆動されることを明らかにした。さらに、ドリフトキンク不安定性が電流層内部で成長することにより、波粒子相互作用を通じて異常抵抗が発生し、無衝突リコネクションが駆動されるという別のメカニズムが存在することも明らかにした。
- ミクロ階層とマクロ階層を結合するための階層結合モデルのプロット型を開発し、1 次元線形 Alfvén 波の伝播シミュレーションを用いてモデル検証を行った。その結果、2 つの階層間を通じて Alfvén 波がスムーズに伝播すること、即ち開発されたモデルが予期したように機能していることを確認した。

2) プラズマ物質相互作用の主な研究成果：

- 分子動力学シミュレーション手法を用いて、複数枚のグラフェンに水素フラックスを照射した際の崩壊メカニズムを調べた。水素原子が表面の炭素に運動量を与え

ラフェンを揺り動かす。やがて表面と二枚目のグラフェンの層間距離が局所的に小さくなり、表面と二枚目のグラフェンが共有結合により新たに結ばれる。これがきっかけとなり表面と二枚目のグラフェンが壊れるという新たなグラフアイト崩壊のメカニズムを明らかにした。

- 境界での粒子吸収、境界壁の帯電などをプラズマの運動と矛盾なく取り入れた3次元粒子シミュレーションコードを開発し、境界を持つ磁化プラズマ中の高密度領域(プロブ)における自発的な電場形成および、その効果による磁力線を横切る高速な輸送を自己無撞着な粒子シミュレーションにより実証した。

今後の展望としては、機構連携研究や関連大学との共同研究を基盤として、「階層繰り込みシミュレーションモデル」をはじめとする多階層・複合物理シミュレーションモデルの開発・シミュレーション科学研究の推進を行う。また、開発したモデルを用いて、核融合プラズマ、宇宙プラズマ、他の学問領域での複雑性プラズマ現象の基礎物理過程の解明を目指した研究を推進していく。

5.4. 共同研究、研究連携、若手人材育成

シミュレーション科学研究部のプロジェクト研究体制は、1.3 節にも記したように共同研究を基盤として成り立っており、第2章に記述した研究成果は本質的に多くの部分を共同研究活動に負っている。一方シミュレーション科学研究部が研究のための装置として責任を負っているプラズマ・シミュレータ及びLHD数値解析システムを用いた共同研究に関しては、それぞれ一年平均で約40件/約50件を受け入れており、附随した活動として各種レベルの使用ガイダンスや計算機使用上のサポート活動を含めて積極的に推進している。研究連携活動については、第3章にも記されているように機構内連携を始めとして、レーザー連携、ITER連携の枠組みに積極的に取り組んでいる。特にプラズマ・核融合の研究領域を超えた学際領域の共同研究を推進しつつある実績は、今後のプラズマ・核融合の研究の発展にとって重要であると考えている。ITERとの関わりの視点においても、LHD・磁場閉じ込めシミュレーションプロジェクトの研究体制及び六ヶ所研究センターは、組織的にも研究課題としても、ITER・ITER-BAに貢献できる構造をすでに備えている。またシミュレーション研究における国際的な共同研究も積極的に推進しており、JIFTを始めとした国際共同研究のネットワークを確立しつつある。

若手人材育成については、大学院教育に積極的に取り組む一方、ポスドクを積極的に活用すると共に若手研究者の海外派遣を推進することにより、若手研究者の研究意欲を高める努力を行っている。また所内外の若手研究者を対象としたシミュレーション科学に関するセミナーや講習会などにも力を入れている。

5.5. 次期中期計画に向けたシミュレーション研究の発展の方向性

理論・シミュレーション研究センター等における研究、そしてそこでの成果を継続・発展する

形でスタートした3つの研究プロジェクト等においても、多くの成果を挙げてきており、シミュレーション研究は大きく前進したといえる。これらの成果をもとに、次期中期計画を立案する基盤が整った。

一方、研究プロジェクトを開始して約1年半を経過した現プロジェクト研究においては、約2年半後の中期計画の終了時までにはしっかりと成果を積み上げることが重要であり、そのためにシミュレーション科学研究部としては共同研究・連携研究の推進、スーパーコンピュータの増力など基盤整備を進める。現中期計画の終了時において研究プロジェクトは4年を経過することになり、それぞれのプロジェクトを総括し、次期中期計画においてそれらのさらなる発展を目指す。

新しく発足したシミュレーション科学研究部は、大学共同利用機関としての核融合科学研究所の中で、大型ヘリカル研究部と並ぶサイエンスプロジェクトを遂行する組織であり、国内外の共同研究を更に強化し、大規模シミュレーション研究によって、核融合実現に貢献するための組織的な研究を遂行することがその使命である。同時に、その研究過程において学術研究の視点は重要であり、研究者集団の組織的研究活動においても、それぞれの研究者の自発性に富んだ研究意識と、常に新しい研究テーマに挑戦する姿勢も必要である。次期中期計画において、核融合実現のための組織的なシミュレーション研究として LHD ニューメリカル・テスト・リアクター構築に向けた研究を推進し、またその過程において必須となる、広い領域にまたがる学術研究の集積により、新しい学問分野としてのシミュレーション科学の確立を目指す。同時に、シミュレーション科学の確立のためには、日本及び世界の研究コミュニティとの幅広い連携が不可欠であり、核融合科学研究所シミュレーション科学研究部は、大学共同利用機関法人における組織としてこれを強力に推進する。