

自然科学研究機構 核融合科学研究所

平成16年度外部評価報告書

2005年5月

核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

目 次

第1章 経緯と目的	1
第2章 LHD研究に関する評価	3
2. 1 総評	
2. 2 項目別の評価	
2. 3 まとめ	
第3章 シミュレーション研究に関する評価	17
3. 1 総評	
3. 2 項目別の評価	
3. 3 まとめ	
第4章 おわりに	27

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	核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員構成
添付資料3	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	外国人評価委員の評価レポート

資料編

1. 大型ヘリカル装置 (LHD) の研究成果 平成16年度
2. シミュレーション研究の成果 平成16年度
3. 炉工学研究センターの研究成果 平成16年度

第1章 経緯と目的

核融合科学研究所は平成16年度に自然科学研究機構共同利用機関法人の一員となり、その自然科学研究機構の設定した中期計画・年度計画に基づいて事業を実施することとなった。その中期計画の中で「I 研究機構の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置、1 研究に関する目標を達成するための措置、(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」において「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。」となっている。また、これに対応する年度計画（平成16年度）において「各専門分野において研究成果の内容及び公表の状況等など研究活動の資料、研究者等の大学や研究機関との交流の状況等をまとめ、外部委員を含む委員会で自己点検を行う。」と記述されている。

これに対応して核融合科学研究所では運営会議のもとに外部評価委員会を設置することが提案され、外部評価委員会規則（添付資料1）及び委員会の構成（添付資料2）を含め運営会議においてこれが認められた。外部評価委員会は、核融合科学研究所が世界の研究拠点としての役割を果たしている現状を考慮し、3名の著名な外国人研究者を評価委員会の委員に加え、日本の核融合研究コミュニティにおいて指導的立場にある日本人研究者17名を加え総計20名の所外の研究者のみでの構成とした。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、今回は法人化後初めての評価を行うことに鑑み、核融合科学研究所の研究の2本柱である大型ヘリカル装置（LHD）とシミュレーションの研究活動の両方をまず評価対象として設定し、これに対応してLHD部会とシミュレーション部会の2つの専門部会を設置し評価作業を行うこととした。評価委員会の委員長、副委員長、専門部会の部会長、幹事は運営会議において決定された。

今回の評価の目的は、平成16年度の研究状況を中心とした研究活動を同じプラズマ核融合の分野の所外の研究者により評価することにより、その結果を受けて一層研究活動が発展するよう今後の計画策定・遂行に反映させることであり、また核融合科学研究所としては、客観的な評価を受けることにより説明責任を果たすことも目的としている。評価結果については、外部評価委員会から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、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、平成17年6月末までに文部科学省に提出する自然科学研究機構年度計画（平成16年度）実績報告書の参考資料となる。共同利用機関法人評価委員会は年度毎の研究や教育の評価を行わないこととしているが、共同利用機関の共同利用・共同研究の特性を踏まえ業務や組織と密接に関連するものもあり、研究や教育の評価が含まれているものの共同利用・共同研究と不可分であるので、積極的に所外委員による評価を示すものである。また、印刷物やWEBホームページでの公開も予定している。

今年度の評価対象は、上述の通りLHDとシミュレーションの研究活動であり、これを第1回の評価委員会（平成17年1月29日）において研究所の担当者からビューグラフを用いての詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。なお、LHD研究との関連の深い炉工学研究センター

の研究活動についてもあわせて報告を受けた。その後、メールを活用した質疑応答、意見交換、さらに研究所からのLHDやシミュレーション研究、炉工学研究センターの研究成果（平成16年度）などに関する資料（資料編参照）の提供を受け、これらの説明や資料などを通じて総合的にLHDとシミュレーションの各研究活動を評価した。評価に当たっては、それぞれの部会において以下の評価の観点を設定した。

「LHD」に関する評価の観点

- (1) 平成16年度の達成目標に対する成果はえられたか
- (2) LHD実験テーマの設定や実験の進め方は適切か
- (3) 理論のテーマ構成とその進め方は適切か
- (4) LHD制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か
- (5) COEとしての役割を果たしているか
- (6) LHDに関する共同研究の進め方は適切か
- (7) 次年度の研究計画は適切か
- (8) その他

「シミュレーション」に関する評価の観点

- (1) 平成16年度の達成目標に対する成果はえられたか
- (2) シミュレーション研究テーマの設定は適切か
- (3) シミュレーション研究の進め方は適切か
- (4) シミュレーション手法の開発の進め方は適切か
- (5) COEとしての役割を果たしているか
- (6) シミュレーション研究に関する共同研究の進め方は適切か
- (7) 次年度の研究計画は適切か
- (8) その他

各委員からの評価レポートが出揃った段階で、第2回の評価委員会（平成17年3月14日）を開催し、研究所との更なる質疑応答を行うとともに、評価作業とそのとりまとめを進めた。更に第3回の評価委員会（平成17年5月13日）を開催し、最終報告書を取りまとめた。評価委員会の日程を添付資料3に示した。報告書は第1章 経緯と目的、第2章 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、および第4章 おわりに、の4章で構成されている。なお、外国人委員からの評価はそれぞれの委員の了解を得て、添付資料4にその原文と日本語訳を載せた。

第2章 LHD研究に関する評価

2.1節では総評として、世界の磁場核融合研究の現状とLHD研究の位置づけ、およびLHD計画の推進について述べる。2.2節では第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を記す。

2. 1 総評

「世界の磁場核融合研究の現状とLHD研究の位置づけについて」

太陽をはじめとする恒星は核融合反応により膨大なエネルギーを生成している。この地球上で核融合炉を実現するには、1億度以上の高温プラズマの生成・制御が必要であり、これはまさに人類の壮大なるチャレンジであると言えよう。

高温プラズマを保持する方式として磁場閉じ込めと慣性閉じ込めがある。前者は比較的密度の薄い (10^{20} m^{-3} 程度) プラズマを磁場で長時間 (数秒のオーダー) 閉じ込める方式であり、後者は大出力のレーザー等により超高密度 (10^{32} m^{-3} 程度) のプラズマを短時間 (10^{-11} sec 程度) 発生させる方式である。磁場閉じ込め方式にも直線系と円環状の場合に大別されるが、磁力線に巻きついたプラズマが磁力線をエンドレスと感じる円環状 (トーラスまたはトロイダルとも呼ぶ) の磁場配位の方が閉じ込め特性に優れており研究も進んでいる。ただしトロイダル系磁場核融合では、磁場の強さがトーラス中心部からの距離に反比例して弱くなっているため、プラズマが磁力線を横切るドリフト運動が生じる。これを補償するためトロイダル系では磁力線を振る必要がある。円環状のドーナツの表面に振じれた紐が巻き付いているような磁力線構造であり、まさに振じれた磁力線の網で高温プラズマを閉じ込めようとするものである。磁力線を振る方式として、磁場発生用コイル自身を振るヘリカル方式と、プラズマ中に電流を流し、その電流がつくる磁場と単純なトロイダル磁場との合成で磁力線を振るトカマク方式が代表的なものである。

核融合開発において、現在最も研究が進んでいるのはトカマク方式である。これは1960年代に旧ソ連で開発されたものであり、1970-80年代には日米欧でも大型トカマク装置が建設・運転された。現在は日欧ロ米中韓の6極の国際共同プロジェクトとして国際熱核融合実験炉ITERが設計され、今まさに建設がスタートしようとしている。

ヘリカル系はトカマクに次ぐプラズマパラメータを達成しており、かつまた将来の核融合炉に向けて幾つかの魅力的な要素を有している。その代表的な特徴として、閉じ込め磁場配位が外部コイルにより形成されるため、本質的に「定常」である点が挙げられる。トカマクでは振じれた磁力線を形成するために、プラズマ電流が必要となる。その結果、プラズマ電流を定常的に駆動させる必要や、プラズマ電流の崩壊・プラズマ特性への制約などへの対応が不可欠である。一方、ヘリカル系ではこれらの課題が無いまたは軽減されるという利点を有しており、定常核融合炉に向けた研究開発の意義は大きい。

ところで振じれたコイルをトーラス状に巻くことは、軸対称性を破ることになり、本質的に3次元の複雑な構造を対象とすることとなる。ヘリカル系の研究は、我が国でも先駆的・先

導的な研究が進められてきており、京都大学を中心に考案・開発されてきたヘリオトロン方式として大きく発展した。これは同方向に電流を流したコイルをヘリカルに捩じってトーラス状に巻いたものであり、ヘリオトロン-E装置（京都大学）での原理実証実験としての成果を踏まえ、大型ヘリカル装置（LHD）が核融合科学研究所（以下、核融合研と略す）に建設されることとなった。LHD装置は装置規模において、いわゆる大型トカマク装置と比肩するものであり、現在稼働中の世界最大のヘリカル装置である。またヘリカル系の有する「定常」の特性を最大限活かすべく、超伝導コイル装置として設計・建設されており、LHD装置の建設・運転は工学的にもその意義は大いにあると言える。

ヘリカル系磁場配位は、最適化配位の探求が様々な側面から進められてきている。例えば、磁力線の捩じれ構造に関しても、磁気シアを重視するのか磁気井戸効果を期待するのかにより、また連続巻きコイルかモジュラーコイルかにより、磁場配位やそれを形成するコイル形状の最適化が分かれる。磁気シア効果を期待した連続巻きのLHD装置に対して、欧州では磁気井戸およびモジュラーコイルを重視した研究が重点的に進められており、LHDと同規模のベンデルシュタイン7-X装置がドイツに建設中である。

ヘリカル系の磁場配位は、この二大装置に留まること無く、より高性能な可能性を有する磁場配位最適化の研究が、理論・実験の両面から世界中で精力的に進められている。中規模装置として、我が国ではコンパクト化を狙ったCHS（核融合研）と立体磁気軸化を図ったヘリオトロン-J（京都大学）が稼働している。欧州・米国・ウクライナやオーストラリアでもTJ-II（スペイン）、HSX（米国）、Uragan（ウクライナ）、H-1（オーストラリア）などが運転されている。また米国では軸対称性により近づけようとした準軸対称装置NCSX（プリンストン大）が建設中である。

「LHD計画の推進について」

学術審議会特定研究領域推進分科会の核融合部会では昭和61年2月14日に「大学における今後の核融合研究について（報告）」をまとめており、大学における新大型計画として、環状磁場系の外部導体系大型ヘリカル装置の建設を提案している。そこでは、プラズマ電流を必要としない利点等を活用して、環状系磁場閉じ込めプラズマの総合的理解への寄与が期待される、と謳っている。

LHD装置は平成2年から建設が開始され、平成10年3月に最初のプラズマが点火した。これは、超伝導コイル・プラズマ制御・各種加熱機器および先進計測装置などの技術開発を研究所を挙げて精力的に推進してきた賜物であると言って過言ではない。平成11年3月には核融合科学研究所研究組織等改善調査委員会において「外部評価報告書」がまとめられており、「装置の完成により初期段階の実験が成功裏に進み、目的をほぼ満足する結果を得たことを高く評価する」、と記されている。

平成10年3月の初期プラズマ着火以降、毎年4-6ヶ月間のプラズマ実験を実施しており、温度・密度やプラズマ閉じ込め時間等のプラズマパラメータは着実に伸びてきており高く評価できる。またプラズマ特性の解明および改善も進んできており、数多くの学術論文として結実している。これらの成果は、加熱機器や計測機器等の高性能化（加熱機器においては高出

力化と長パルス運転化、計測機器においては新型計測器の開発や高時間・高空間分解能化などが挙げられよう)に負う所が大きい。

その後、科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会の下に設置された核融合研究ワーキング・グループでは、今後の我が国の核融合研究のあり方について審議し、報告書を平成15年1月8日にまとめた。そこでは核融合エネルギーの実現を目指す核融合研究を、「ITERとの有機的連携を図りつつ推進すべき核融合炉を目指した開発研究」と「学理の探求に基づく当該研究分野の学問的体系化をめざす学術研究」という2つの側面を併せ持つ総合的な研究として捉えている。さらに今後の核融合研究の重点化・効率化を図るための方策として4つの重点化計画が策定された。LHD計画は、この重点化計画の一つとして取り上げられ、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、継続して学術研究を着実に進める事が必要であると、謳われているように、今後ますます当該分野における牽引車としての役割が期待されよう。

また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、大学共同利用機関である核融合研には、大学との強い連携・双方向性の強化等が求められている。具体的にはLHDを中心とした大型プロジェクト研究と、大学のセンターや講座レベルの装置での要素還元研究とが、有機的に連携して核融合の学術基盤研究として発展することが期待されよう。

これを具現化するものとして、核融合研では一般共同研究・LHD計画共同研究・双方向型共同研究の3種類の共同研究制度を構築した。ここで一般共同研究とは、幅広い共同研究を網羅するものとして核融合研設立時から制度化されているものである。一方、平成8年度より、LHDでの実験参画や共同企画をより積極的に推進すべくLHD計画共同研究が設立され、多くの研究成果を挙げてきている。さらに平成16年度からは、大学のセンターに設置された既存装置をコミュニティの共同研究装置として門戸を開放し、そこでの要素還元研究を活性化させるべく双方向型共同研究がスタートした。LHD及びCHS装置は、これら共同研究を推進する上での主要な装置として大いに貢献してきた。

2. 2 項目別の評価

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

- ・平成16年度は、プラズマパラメータについて、かなり厳しい初期目標を設定したが、様々な工夫と努力により、ほぼ平成16年度の目標として掲げた数値パラメータを達成したことは高く評価できる。(7名)
- ・今後は環状プラズマの総合的理解という観点や、研究成果の学術的貢献としての側面をもっと前面にだしてゆくことを期待する。(6名)
- ・プラズマ壁相互作用などの制御に基づく、ICRFによる1.3GJの長時間放電の実証は、LHDにおけるプラズマ制御や加熱工学の進展の賜物であり、世界水準の実績である点からも特

筆に値する。(6名)

- LID実験では、プラズマ周辺領域の制御に成功しており、16年度は先ずその第1歩として、周辺プラズマ制御に役立てて行く基礎を創った1年であると評価できる。新たな取り組みなだけに、今後の着実な一層の進展を期待したい。(4名)
- LHD実験の支援となるCHS実験は、HIBP計測の乱流輸送解析(ゾーナルフロー)等で顕著な成果を挙げた。また双方向型共同研究での貢献も大きく、その成果は高く評価できる。(3名)
- 4.3%のベータ値達成は、ヘリカル系としては世界最高記録であり高く評価できる。しかも当初の理論的予測とは異なる結果を示しており、理論研究の活性化をももたらしている。(2名)
- イオン温度として13.5keVを得たことは画期的である。(2名)
- 密度分布計測を周辺プラズマの低密度部分まで拡張する計測法の開発に成功したことは、今後の学術研究の足場をしっかりと与えた意味で、その意義は大きい。(1名)
- 核融合プラズマ物理への寄与として、国際ステラレータ比例則活動(ISS04)におけるLHD実験の主導的貢献が挙げられ、その平成16年度の研究成果を高く評価する。この分野では、LHD実験はヘリカル系のリーダーとして、世界の核融合研究に極めて重要な貢献ができるであろう。(1名)
- LHDのこれまでの成果は装置、加熱、制御、計測、各種共同研究が一丸となって進めてきた結果と考える。さらにこの路線で世界をリードして行って欲しい。(1名)
- 今後ともLHD実験らしい、他では真似のできないアカデミックな研究のフロンティアが引き続き開拓され、優れた成果を挙げていくことを期待する。(1名)
- プラズマ制御法の工夫によるプラズマ高性能化は着実に進展したが、コアプラズマの閉じ込め改善には至らなかった。しかし、その理由については考察がなされているので、今後が期待できる。(1名)
- NIFSの法人化後の新体制を新構想・新理念・具体的施策に基づき創り、着実にこれを立ち上げてきたことは、着実な研究基盤醸成が進展しているものと高く評価できる。(1名)
- LHD has undoubtedly emerged in 2004 as the fore front leader of the world fusion research. Indeed, the synergy of the advanced geometry of the magnetic field, the superconductive coils and the range of external heating sources has provided for the achievement of operation parameters relevant for a future fusion reactor. (2名)
- The world-record long pulse discharge obtained on LHD in December 2004 (with 1.3 GJ, 1905 sec, 680 kW) was especially noteworthy for the development of steady-state operation. (3名)

(2) LHD実験テーマの設定や実験の進め方は適切か

Are the themes of LHD experiments selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

- 核融合装置としてプラズマを高性能化していくためのテーマ設定であり、実験の進め方と

併せて妥当と判断できる。今後も引き続き実験者の意見を聞き、改善すべき点があれば対応し、より良いシステムに成長することを期待したい。(7名)

- パラメータ達成・パラメータ向上に向けた研究と併せて、LHDの所期の目的でもある、トラスプラズマの総合的な理解に向けた研究の活性化も強く求められている。特にトカマクとの相補性を見据えた研究の促進が望まれる。(6名)
- NIFS内部での新たな研究体制の構築は、着実・堅実なものであると評価できる。(1名)
- テーマに適した実験体制を全日本的な展開から組織しようとしている姿勢は妥当である。(1名)
- 実験においても、放電数を多くとる工夫がなされ、同時に装置開発や壁調整法の開発をしており、進め方は妥当である。(1名)
- 計画の基本構想の1つである、高エネルギー粒子の閉じ込め研究(アルファ粒子シミュレーション研究も含む)に向かうことも期待される。また大電力マイノリティイオン加熱における新しい非線形現象の発見というような、ともすれば地味なプラズマ物理分野のブレークスルーを創出し、幅・裾野広く学術の活性化と体系化を図ることも期待される。(2名)
- 超伝導装置であるという特徴を最大限生かした研究テーマとして、「定常化」が挙げられ、この研究が盛んになってきており、この点は高く評価でき、今後も高い加熱パワーでのより長時間運転の実績を挙げてゆくことを期待する。(1名)
- 核融合のためのプラズマ研究としてのみならず、強い非線形媒体である高温プラズマの学術としての体系化や、核融合以外の分野との積極的な学術交流・学術発信をはかることが求められよう。(1名)
- 新しい実験に挑戦する勇気と意欲を持って進めて行ってほしい。そのためには各種共同研究を活用し、NIFSの研究と有機的に結合させる事が重要であり、LHDで何を研究する事が要求されているかを考えて進めて欲しい。(1名)
- 今後、一層、実験と理論・シミュレーションの研究活動の融合を期待する。(1名)
- 時間分解能をもって分布計測ができるようになりつつあるように思いますが、その計測結果から飛躍的進展をもたらす新しい物理が十分見えてきていないので、更なる工夫と努力が必要だと感じる。(1名)
- これ迄に大小のトラブルも見られ、心配している。常に緊張感と冷静な判断を失わないで実験を進めて行ってほしい。(1名)
- The themes of LHD experiments are very well placed, especially, MHD studies at high beta have been pursued extensively. Also, the issue of the Local Island Divertor has been addressed questions of the efficient pumping scheme. (2名)
- The list of LHD experimental themes includes performance objectives, scientific objectives, and technological objectives. The emphasis is apparently on the first of these, which is appropriate for the mission of this facility and for its broad range of capabilities. (1名)

(3) 理論のテーマ構成とその進め方は適切か

Are the themes of the theory group selected properly? Is the way of procedure proper?

- ・ 計画立案の段階では、理論が設計指針の提供など、大変重要な役割を演じてきた。内寄せ磁場配位での粒子閉じ込め解析や径電場の評価などを実施して、実験結果との対応しており、実験と理論の関係も良いと評価できる。更に理論・シミュレーショングループとの連携を強めて、総合力をアップして行って欲しい。(7名)
- ・ 線形理論では予測していなかった内寄せ配位での高ベータプラズマの実験的達成をうけ、ここ数年はMHD研究に多くの精力をつぎ込んできた結果、ほぼ実験を説明できるところまで進んできており、大いなる成果を挙げてきた。(2名)
- ・ 炉心プラズマの輸送に関する研究やスクレイプオフ層やダイバータ部でのプラズマ輸送に関する研究は大変重要であるので、理論的側面の研究をより一層活性化させる必要があろう。(2名)
- ・ 実験が開始され、理論では予測されていなかった各種結果(例えば内寄せ外寄せ配位での特性、等々)が実験的に示されてきた現在、新たな長期的展望を示すことが期待されている。(1名)
- ・ 理論シミュレーションの成果は大変インパクトがあり、特に渦に関連するシミュレーション結果は、最近特に重要視されている「内部輸送障壁(ITB)」の生成メカニズムや、Hモード物理、トカマクのプロップとも関連し、注目すべき成果だと思われる。(1名)
- ・ 今後はLHDのデータ解釈を含む、更なる実験グループとの共同作業を通じて、シミュレーション結果と実験データとの接点を、更に追い求める必要があると思われる。(1名)
- ・ 物理学の発展を考えても当然なことだが、大切なことは実験も理論も相互に補いあって進展するはずであり、地道な進展が期待される。(1名)
- ・ 環状プラズマの総合的理解という観点から、JT-60等のトカマクとの連携を更に強化していき我が国における環状プラズマ理論研究の中核となることを期待したい。(1名)
- ・ The themes of the theory group in relation to the LHD experiments seem to have been appropriate. As experimental data from LHD experiment accumulate, there is a strong need for theoretical efforts in interpretation and prediction of experimental campaign. (2名)

(4) LHD制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か

Are the developments of the plasma control, heating devices, and diagnostics planned properly?

- ・ LHD制御・加熱・計測関連機器の開発は、適切かつ着実に進められていると評価できる。(7名)
- ・ 炉心プラズマ制御としては、LIDによる周辺プラズマ制御や、ダイバータ部のプラズマ対向材料の工夫などにおいて、適切に研究開発を進めている。今後も、炉心プラズマ閉じ込め特性の改善やプラズマ放電の定常化に向けた機器の性能向上などを見据えて開発を進めてゆくべきであろう。(3名)

- ・ プラズマ加熱（NBI加熱、ICRF加熱、ECH加熱等々）は、それぞれの特徴を生かし高出力化や定常化に向けて機器開発がなされている。NBI加熱では、正イオン源NBI適切に開発が進められている。（3名）
- ・ 電子加熱として、ECH系・更にはジャイロトロン発振器の更なる開発・発展と強化が重要であり、国内各所とのジャイロトロン利用と、対応したジャイロトロン開発強化を含めた相互連携を強化しつつ、プラズマパラメータを高めるための戦略的総合的取り組みを実行する等、今後更なる発展を期待したい。（1名）
- ・ 計測に対しては、先進的な開発が共同研究を活用して推進されており、多くの成果が出ていて、適切に進められていると考える。HIBPの信号が得られた事は長年の開発研究の成果である。今後も我が国が世界を牽引する成果をあげて欲しい。（3名）
- ・ プラズマ閉じ込め特性研究では、新しい計測器による新たな物理パラメータの測定が非常に重要である。今後もチャレンジングな計測器開発を所内外の研究者と連携して進めるべきであろう。（2名）
- ・ ITERにも適用可能な先進計測機器の開発をも視野に入れた、先進計測機器開発のプラットフォームとしての役割も望まれよう。（1名）
- ・ トムソン散乱計測装置の充実による、周辺プラズマ密度分布とプラズマ閉じ込め改善との相関は大変重要な研究課題であり、今後の更なる計測器活用による両者の相関の物理解明の進展が期待される。密度・温度勾配とプラズマ揺動・乱流輸送の問題は、最近のプラズマ輸送制御・改善に対する本質を与える可能性が高く、こうした重要課題への貢献も期待できよう。他方で、プラズマ半径方向電位計測に基づく、生成電場 $E(r)$ 、 $E(r)$ シアート、これら計測値パラメータの相関が大変本質的であろうと予想できるが、こうした計測法の進展を基に学術展開を更に進められると大きな学術貢献が期待できよう。（1名）
- ・ A large progress has been made improving plasma control, auxiliary heating and diagnostics on LHD. Yet, a lot remains to be done in future along these lines. Indeed, adding a perpendicular heating system appears to emerge as the first priority.（2名）
- ・ High Frequency heating methods (ECRH and ICRH) must be also further developed and implemented. The goal should be 1 MW of power with duration longer than 1 hour in order to investigate novel frontlines of plasma wall interaction studies relevant for future fusion reactor.（2名）
- ・ Although at the present stage the range of diagnostics seems adequate new ones such as CXRS, HIBP, turbulence measurements etc. have to be developed or transferred from the phased out CHS device , thereby reducing the costs.（3名）

(5) COEとしての役割を果たしているか

Is the responsibility as a COE in fusion plasma research adequately fulfilled?

- ・ 核融合科学研究所は共同利用研究機関としての自覚を持って運営されており、各種共同研究を計画・実施し、我が国のプラズマ・核融合コミュニティの発展に十分貢献している。

(6名)

- ・ 今後、さらに国際的にも世界の中核機関として認知されるべく、進展を期待したい。

(1名)

- ・ 共同研究の枠組みとして今年度より3本柱（一般、LHD計画、双方向型）となり、きめ細かく充実してきている。（3名）
- ・ NIFSが中心となってまとめている双方向型共同研究は、各大学のセンターの装置やインフラを有効活用する上で、大変重要な役割を果たしている。大学等の幅広い分野の研究者のより一層の参画が期待される。（3名）
- ・ LHD計画共同研究を進めていることは、比較的大型の実験機器を大学等の所外の研究者と共に開発し将来的にはLHDで共同実験する上で大変有効である。（2名）
- ・ 一般共同研究の相互交流型共同研究は、NIFSと大学との研究交流の活性化にとって大変意義深い。今後も益々、促進することが望まれる。（1名）
- ・ 一方、核融合研究は広範な学際的研究が不可欠であり、長期的視点に立脚した実験が特徴である。そのとき、COEとしての核融合科学研究所が、研究面だけでなく、大学等の全国共同利用機関として、核融合コミュニティの研究活動の方向性を先導する役割は極めて重要と言わざるを得ない。とくに大学における学術基盤の長期的構築に向けた貢献は大変貴重であり、かつ重要な意義を持つものである。（1名）
- ・ また、国際的な視点から、土岐コンファレンス等の国際会議の主催、LIMEなど国際ステラレータ協定に基づく国際共同研究への貢献など、日本の、そして世界のCOEとしての役割を果たしてきた努力を高く評価する。（1名）
- ・ 研究所固有の研究レベルとしてのCOEという位置づけと、大学共同利用研究機関としての本来のCOEとしての役割等、各種共同研究や、ハードの安定供給・確保・国内他機関の活性化を含めた、特に日本全体の各大学関連のプラズマ核融合研究の舵取り役を、NIFSは引き続き果たすべきであり、今までの実績に加え、今後の更なる取り組みが期待される。（1名）
- ・ 海外との研究交流は活発であり、国内のみならず国外からの研究者が、いわゆる『おのずと集まってくる』という素地ができており、多角的な研究交流が望める。このように、国内外の研究者の自然で活発な、かつレベルの高い活動の集合体がCOEそのものであり、ますますの充実を期待する。（1名）
- ・ COEには幾つかの定義があると思われる。世界のヘリカル系研究、トカマクを含むトロイダルプラズマ研究、核融合科学およびプラズマ科学の研究、に対するCOEが考えられる。ヘリカル系研究に関しては十分にCOEとしての役割を果たしており、トロイダルプラズマ研究に関してはJT-60との共同研究やITERとの有機的連携を図るなどして活性化が、また核融合科学・プラズマ科学に関してはさらに一層の努力が望まれよう。（1名）
- ・ LHD for the first time obtained many impressive parameters previously obtained at random on largest tokamaks. Therefore, the competitiveness of stellarators versus tokamaks has been proven. In summary, results of 2004 went beyond most ambitious expectations.（1名）
- ・ The LHD is the leading fusion plasma research device in world fusion effort. Therefore it is well

situated itself for being effective and powerful COE in fusion plasma research. (2名)

- It is also important to recognize that the necessity of continuing and stronger support of LHD project to perform more vigorously in adding heating systems and diagnostic systems. (1名)

(6) LHDに関する共同研究の進め方は適切か

Is the process for conducting the LHD coordinated researches proper?

- 従来からの一般共同研究、LHD共同研究に加え、双方向型共同研究が他に先駆け新たにスタートしたことは大いに評価できる。これらの多様な共同研究システムを活用し、LHDのみならず、国内の大型装置をコミュニティの“共有装置”として最大限に活用し、核融合研究が大きく進展することが期待できる。(7名)
- 本年度から始まった双方向型共同研究は、学術普遍化・要素還元研究的な学術成果が得られ始めており、他方でハードとしての実験装置の新提案も活発に進んでいる。これが、今後のLHD研究にどのように寄与するかが重要である。それぞれの共同研究の役割を明確にして、我が国の核融合研究を進展させる機能を果たして欲しい。(3名)
- LHDに関しては一般共同研究とLHD計画共同研究が主であるが、このシステムを活用して、外部の研究者が主体的に進める研究テーマ(例えば、外部チームがLHDのあるテーマを主体的に計画・実施する)を積極的に立ち上げる努力をした方がよい。さらには外部の人が筆頭著者である論文をもっと増やす努力をした方がよい。(2名)
- これまでは一般共同研究、LHDのための計画共同研究が共同研究を支えてきた。これはLHD研究に重要な貢献をすると共に、各研究機関の研究にも大きな効果をもたらした。正しく共同利用研究機関としての役割を果たしてきたと考える。(1名)
- 核融合研究では広い知識や技術が要求される。広い分野の英知を集める必要があり、コミュニティの範囲を超えて協力できる体制の構築、そのための広報・啓発を期待している。(1名)
- 共同研究を介した個々の大学の活性化・エンカレッジメントは、次世代の研究者の母集団を他分野に奪われずに確保するためには、極めて重大な意義と責任があり、そこで成される真に素晴らしい学術研究成果の創出こそは、NIFSと一体になった究極的な「共同研究の目的」である。その意味でも、「学術的・ソフト的・要素還元的」新規成果の進展と、他方ハード的新規装置の立ち上げは、これらハード・ソフト両輪に渡る共同研究を支えるNIFSの役割として、今後益々重要性が高まることが予想される。(1名)
- LHDに限った共同研究というのではなく、全体の共同研究を観ると、プラズマ放電テーマの予算が多く、核融合炉工学については十分な予算とはいえない。今後、例えば、国内の炉工学研究サイトを活かした双方向共同研究の立ち上げが望まれる。(1名)
- 双方向共同研究の一環として、球状トカマク計画が取り上げられ、双方向共同研究委員会で議論されているが、本計画の学術的目標、世界的な独創性なども含め、より広く国内外のコミュニティで議論して進めて行った方がよい。(1名)
- the coordination of research on LHD is definitely proper. However, the management structure is

more of the matrix type due to many, mostly historical reasons. To this end, it may appear prudent to simplify tasks of the leadership by making the structure more of the pile type scheme. (1名)

- The stronger integration of Japan's domestic fusion research themes into LHD's coordinated research would benefit both sides and strengthen LHD project. (2名)
- The LHD experiment has excellent collaborations with other helical experiments around the world. I was disappointed to see that no U.S. scientists were listed as participants in LHD experimental groups, but I think that the fault for missing this fine opportunity probably lies on the U.S. side. (1名)

(7) 次年度の研究計画は適切か

Is the 2005 research plan drawn out properly?

- 方向性は適切であり妥当な研究計画である (6名)
- 中長期展望を見た短期実験計画を組む事が重要である。 (1名)
- 16年度と17年度の目標の相違がより明確になると更に説得力が増すと思われる。 (1名)
- 加熱パワーの増力として、垂直入射のNBIを増力するのは大変有意義であるといえる。これは単に加熱パワーの増力という観点のみならず、ヘリカルリップルによる高エネルギー粒子の輸送などの影響を直接調べる上でも有効であろう。 (3名)
- 17年度計画は18年度19年度と、将来に大きく発展するバックアップ技術の周な準備も一方では必要であろうと考えられる。イオンに関する将来計画の立案が明示されている17年度計画に加えて、電子加熱に対する今後の計画は、次の評価時に示されるものと推察され、今後の展開に興味を惹かれる。 (1名)
- 計画について、より具体的な内容が必要である。例えば、入力エネルギーを増した長時間放電において、目標とするパラメータ範囲及びそれに関連する具体的な学術研究などを示す必要がある。 (1名)
- 「炉心プラズマに外挿できるパラメータ下」における物理の追求が求められており、その点から目標値の達成が求められています。現状では目標値にはまだ距離が大きいわけですが、これらの目標値達成のためにどのようなアプローチを取るのかについて、より明確に提示すべき。 (1名)
- It is also important to keep in mind a longer range of perspectives stretching over a period of say 10 years. To this end, some work along the lines of LHD upgrade should be started. (2名)
- The Material Center and Fusion Engineering Research Center would add important mission to the NIFS organization but it would be also focused so that the core competence of NIFS should be enhanced rather than defocused its main function and mission. (2名)
- The small helical device CHS has produced a number of excellent results and fine publications over the years. A recent example is the observation of zonal flows. (1名)

(8) その他

Other comments

- ・ 共同研究のプラットフォームとしてLHD装置を、今後もより一層、所内外に開放し研究を進める事が肝要である。真のCOEたるには、プラズマ核融合の分野内のみならず、他分野へ発信できる学術・知見・財産を長期的に培っていくと共に学術的体系化をめざした研究を推進する必要があるだろう。(2名)
- ・ 核融合科学研究所は人数的にも非常に大きな集団であり、各年代層を超えた活発な相互作用が可能であり、それぞれの年代の研究者が活力を失わずに連携し、今後もますます全体としての研究体制を活発に発展させていくことが期待される。(2名)
- ・ 今のLHDの成果は歴代所長以下、研究所全職員の地道な努力の賜物と考える。今後もこれまでの努力を無にしないように積み上げていってほしい。また、核融合科学研究所は我が国の多くの研究機関の中で環境・研究費・スタッフ・共同研究によるバックアップ等、非常に恵まれた研究所である。それに慢心する事なく、常に謙虚で、役割を自覚して、他分野の研究機関や国民から納得され、期待される成果を出して行ってほしい。(2名)
- ・ “若い人が魅力を感じる広領域のプラズマ・核融合研究にするには”の難題に対して、COE・核融合科学研究所においては何を成すべきか考えて欲しい。(1名)
- ・ CHS装置が平成17年度でシャットダウンすることを踏まえ、CHSでの知見の継承と発展、および若手研究者のチャレンジングな研究への登用、なども考慮すべきであろう。(1名)
- ・ NIFSには、個々の大学・センター等と緊密に協力し助けあって、「核融合を目指す学術基盤・人的基盤の確立」のために、更なる奮闘を共に進める中枢的役割を果たして戴きたく、今後もそうした活躍を引き続き期待したい。(1名)
- ・ LHDの中期的課題に関して、ITERやトカマクへの寄与、トロイダルプラズマの総合的理解が指摘されているが、どのような学術成果がどのように貢献できるのかについて、今後より具体的に示すことが求められよう。(1名)
- ・ また、LHD実験において、スケーリングできる成果を得て、ヘリカル型核融合炉の可能性を検討することも必要である。(1名)
- ・ LHD研究を長期的に大きく発展させるためには、頂点と同時にやはり裾野の部分が極めて大切であり、少々回り道になっても今からこれらに力を注いでおく必要があると思われる。(1名)
- ・ ITER誘致と関連して、大学等の核融合研究の取り組み体制が大きく変革していくなかで、全国共同利用機関としての核融合科学研究所が、将来のLHD実験に関し、どのような全体的ヴィジョンを持ち、それを展開していこうとしているのか、近い将来に、もう少し具体的な研究計画の提示が行われることを期待している。(1名)
- ・ 核融合研が法人化された後の外部評価としては第1回であるのでやむを得ないところがありますが、評価体制、評価の手順、評価実施期間、評価すべき対象・資料、などが必ずしも明確ではないので、本評価を毎年実施するのであれば、来年度以降は善処願いたい。(1名)

- ・ 核融合研の今後の研究に対して、路線を変更するのか、どこを強化すべきであるか、組織体制をどう修正するのか勧告できるようにするなど、本評価委員会の評価をコミュニティの実質的な財産として活用することが肝要である。(1名)
- ・ ITER連携室を新設し、研究所としてITERへの連携協力を図ってゆく体制を整備した点は評価できるが、ここで若手が主体的に活躍できるようにより活性化させる必要がある。(1名)
- ・ 若手研究者育成について、プロジェクト研究に集中させることのみ重点を置くのではなく、海外や国内他機関での共同研究についてもより積極的に推進すべきである。(1名)
- ・ There is a lot of relevance to ITER in LHD in terms of long pulse operation, divertor physics, improved confinement, high β studies, plasma wall interactions etc. Yet, it is important to pursue alternative concepts rigorously and relentlessly. LHD is definitely a major player in this strategy offering promising alternatives on the way to an economical thermonuclear reactor. (1名)
- ・ The similarity and difference between tokamak geometry and helical system could be explored in scientific understanding of turbulence and transport. (1名)
- ・ LHD has several physics issues in common with ITER—such as MHD stability, energetic particles, anomalous transport, impurities, etc.—and so it could be mutually beneficial for LHD scientists to be involved in the ITPA process. (2名)

2. 3 まとめ

核融合研究の世界の趨勢とLHD計画の位置づけ、LHD計画の策定・建設から現在までの成果、さらには大学共同利用機関としての核融合研の役割などを踏まえ、平成16年度のLHD研究の成果および核融合研の果たしてきた役割について評価を行った。

[平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか]

平成16年度の達成目標に対する成果という観点では、厳しいパラメータ目標を設定しているが、それに対して様々な工夫と努力の結果、目標として掲げた数値パラメータを達成したと評価できる。具体的には、プラズマ壁相互作用などの制御に基づく、ICRFによる1.3GJの長時間放電の実証に対して高い評価が与えられよう。また4.3%の高ベータ値や13.5 keVのイオン温度達成なども評価に値する。またLID実験では、プラズマ周辺領域の制御に成功しており、今後の着実な一層の進展を期待したい。一方CHS実験では、HIBP計測の乱流輸送解析(ゾーナルフロー)等で顕著な成果を挙げた。これらの成果をさらに発展させ、今後は環状プラズマの総合的理解という観点や、研究成果の学術的貢献としての側面をもっと前面にだしてゆくことを期待する。

[LHD実験テーマの設定や実験の進め方は適切か]

LHD実験のテーマ設定や実験の進め方についても評価した結果、核融合炉心プラズマの高性能化をめざしたテーマ設定となっており、実験の進め方と併せて妥当と判断できる、と評

価した。今後も引き続き実験現場の意見を聞き、改善すべき点があれば対応し、より良いシステムに成長することを期待したい。さらに併せて、LHDの所期の目的でもある、トカマクとの相補性を踏まえたトラスプラズマの総合的な理解に向けた研究の活性化が望まれよう。特に大型トラス装置として、ITERへの寄与を明確にした研究が益々重要になってこよう。なお共同研究のより一層の活性化、研究成果の学術的体系化・学術発信の促進を図ることは言を待たない。

[理論のテーマ構成とその進め方は適切か]

3次元複雑体系のヘリカル系において理論との連携は不可欠である。計画立案の段階では、理論が設計指針を提供するなど、大変重要な役割を演じてきた。実験結果の解釈においては、内寄せ磁場配位での高ベータプラズマ達成の理論的解析、および粒子閉じ込め解析や径電場の評価を進めるなど、実験との連携も適切に図られていると評価できる。今後も、更に理論・シミュレーショングループとの連携を強めて、総合力をアップして欲しい。環状プラズマの総合的理解という観点から、トカマクとの連携を強化していき我が国における環状プラズマ理論研究の中核となることを期待したい。

[LHD制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か]

LHD制御・加熱・計測機器の開発は、建設期においても堅実に開発が進められてきたが、その後も高性能化・高精度化を目指した開発が適切かつ着実に進められていると評価できる。今後も、炉心プラズマ閉じ込め特性の改善やプラズマ放電の定常化に向けて、プラズマ制御および加熱機器の性能向上などを見据えて開発を進めてゆくべきであろう。計測に対しては、先進的な開発が共同研究を活用して推進されており、多くの成果が出ていて、適切に進められていると考えられる。今後はITERにも適用可能な先進計測機器の開発をも視野に入れた、チャレンジングな計測器開発を所内外の研究者と連携して進めるべきであろう。

[COEとしての役割をはたしているか]

我が国の大学等における核融合研究を推進するにあたり、核融合科学研究所は共同利用研究機関としての自覚を持って運営されており、各種共同研究を計画・実施し、我が国のプラズマ・核融合コミュニティの発展に十分貢献している。特に共同研究の枠組みが今年度より一般、LHD計画、双方向型の3本柱となり、きめ細かく充実してきている。特に平成16年度にスタートした双方向型共同研究は、各大学のセンターの装置やインフラを有効活用する上で、大変重要な役割を果たしている。

[LHDに関する共同研究の進め方は適切か]

一般、LHD計画、双方向型という多様な共同研究システムを活用し、LHDのみならず、国内の大・中型装置をコミュニティの“共有装置”として最大限に活用し、核融合研究が大きく進展することが期待される。さらには、核融合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促す事により、核融合界からの学術的発信拠点として発展してゆくことが

望まれよう。

[次年度の研究計画は適切か]

次年度のLHDにおける研究計画の方向性は適切であり妥当であると評価される。例えばプラズマの高性能化と高エネルギー粒子の物理研究を目指した垂直入射のNBI増力の意義は大きい。今後は「炉心プラズマに外挿できるパラメータ下」における物理の追究をめざして、所期の目標値達成に向けた中長期の展望を見据えて取り組むことが益々重要になってこよう。

[その他]

共同研究のプラットフォームとしてLHD装置を、今後もより一層、所内外に開放し研究を進める事が肝要である。真のCOEたるには、プラズマ核融合の分野内のみならず、他分野へ発信できる学術・知見・財産を長期的に培っていくと共に学術的体系化をめざした研究を推進する必要がある。なお、核融合科学研究所は我が国の多くの研究機関の中で環境・研究費・スタッフ・共同研究によるバックアップ等、非常に恵まれた研究所であるので、それに慢心する事なく、常に謙虚で、役割を自覚して、他分野の研究機関や国民から納得され、期待される成果を出して行ってほしい。

第3章 シミュレーション研究に関する評価

3.1節では、総評として（1）シミュレーション研究の位置づけ、（2）理論シミュレーションセンターの役割、（3）平成16年度の研究成果、という3つの角度からの分析を述べる。

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節で評価のまとめを述べる。

3. 1 総評

「シミュレーション研究の位置づけ」

プラズマは、物質の運動と場の変動が不可分に結合する無限自由度系であり、解析的に表現できる構造が与える表象は極めて限られたものである。大規模な数値シミュレーションによって可視化されたプラズマの姿は、第一義的に〈複雑系〉であり、しばしば還元不可能性として現前する。とくに核融合の成否を決定するプラズマの閉じ込め特性は、いわゆる〈乱流〉によって左右されることから、この〈大自由度非線形ダイナミクス〉を物理的に理解することが核融合研究の中心的課題となる。プラズマの乱流は、荷電粒子の軌道のスケールからマクロな可視的スケールにいたる広大なダイナミックレンジをもち、それぞれの〈スケール階層〉は相互に複雑な連関を形成する。

このようなわけで、プラズマ物理の研究において数値シミュレーション（計算科学）はとりわけ重要である。しかも、数値シミュレーションの技法に関して特別な創意工夫が求められる。たとえば、ランダウ減衰のように無限次元性によって発現する現象を、有限回の手続きでしかない数値計算によってどこまで再現できるのかといった問題は、安易な妥協を許さない高度な近似方法を必要とする。他にも、高精度の安定性解析（スペクトル解析）やPIC（particle in cell）という粒子シミュレーション法などプラズマ物理から他分野へ波及した数値計算手法が多々ある。さらにプラズマのシミュレーションが必要とする極めて大規模な計算と可視化技術は、スーパーコンピュータ（ベクトル機）およびヴァーチャルリアリティー技術の開発を牽引する役割を担ってきた。

核融合科学研究所（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。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。

「理論シミュレーションセンターの役割」

核融合科学研究所理論シミュレーションセンターは、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。さらに、若手研究者の育成にも重要な役割を果たしている。プラズマ核融合分野におけるシミュレーション研究の高度化・複雑化は著しく、このような組織的研究がますます重要になるであろう。

プラズマのシミュレーションは一般に極めて大規模であることから、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。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。

シミュレーションは、プラズマ中で起こる多様な現象を一般的な視点から研究することによって、核融合科学を他の分野と接続する媒介項を見出す役割を担うであろう。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。

「平成16年度の研究成果」

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。すなわちマクロなスケールで起こる磁力線のトポロジーの変化と、イオンや電子などの軌道が関与するミクロなスケールでのエネルギー散逸機構が協力して起こる現象である。容易に繰り込めない特異摂動の例ということもできる。当該研究グループが掲げる連結階層のシミュレーションというテーマにおいて中心的な課題となるであろう。今後は、斬新なスキームの開発などに挑戦してもらいたい。

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は、上記の「無限次元性」に対するチャレンジであり、そ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。

3. 2 項目別の評価

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

- ・ 世界的に評価される成果を着実に挙げており、当該年度の目標は達成されていると判断される。(7名)
- ・ 磁場閉じ込め核融合プラズマの理解に関するシミュレーション研究においては、内寄せLHD配位の高ベータ実験結果を説明するMHD平衡・安定性研究、径電場と乱流輸送の効果、高エネルギー粒子とMHD揺動の相互作用などの物理研究においてIAEA国際会議等で多くの重要論文を発表し顕著な成果を得ている。(5名)
- ・ 複雑系の科学に関する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階層的理解を進めている。(6名)
- ・ 更に、大規模シミュレーションの推進として、高精度ジャイロ運動論 ヴラゾフコードなど大規模シミュレーションの方法論の改善、粒子コードの並列化につとめ、国際的、学際的な交流の拡大を推進している。(2名)
- ・ The theory/simulation work that was described in the presentation is all generally high-quality work. Among these results, I was particularly impressed with the studies on MHD helical stability with boundary modulations, on ITG anomalous transport, and on energetic particle phenomena. Some other nice pieces of theoretical work were the neoclassical prediction of the electron root for e/n-ITB formation, the simulations of the ion strike-point distribution for the Local Island Divertor, the new model for pellet ablation, and the theory for dust transport in toroidal plasmas. (2名)

(2) シミュレーションテーマの設定は適切か

Are the themes of simulation researches selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

- ・ 様々の時空間スケールがリンクした「連結階層」の問題はプラズマ物理の本質的な特徴であり、これをシミュレーションによって研究する意義は大きい。この種の学術的なキーワードを提示しながら、シミュレーションを支える数値手法を開発しつつ、核融合に直接的に関連する研究課題に取り組む姿勢は、学術とプロジェクト研究支援とをバランス良くテーマ設定しており、高く評価される。日本発の新規な方法論を確立し世界に普及させることを目指してもらいたい。(5名)
- ・ The work of the Theory and Computer Simulation Center (TCSC) is organized under the three

categories of fusion physics, self-organization science, and simulation science. All of these are highly topical and timely. Fusion physics includes topics such as MHD instability, energetic particles, anomalous and neoclassical transport, and divertor physics. They provide useful information for experimental work. Self-organization science concerns basic plasma processes, including topics such as reconnection, laser-plasma interactions, fluid dynamics, dusty plasmas, and atomic and molecular physics. More interactions with NINS and other institutes are desirable in order to benefit from the synergy of interdisciplinary approach. Simulation science includes the topics of high-performance computing methodology and virtual reality. (2名)

- The work of the TCSC and the Theory and Data Analysis Division (TADA) has become more integrated in recent years, especially with the movement of several scientists between the two groups (including one person now shared half-time in both groups). The Simulation research presentation showed an excellent table about how large-scale simulation studies are organized in matrix form, with five of the six research areas involving scientists from both theory groups. (1名)
- At the External Review Panel meeting, the question was raised why NIFS has two theory groups, instead of one. To conclude, I think that the present situation with NIFS having two theory groups is fine, because each of them has a distinct and worthwhile *raison d'être*. (1名)

(3) シミュレーション研究の進め方は適切か

Is the way to proceed simulation researches proper?

- 核融合プラズマの理解と基礎的プラズマ現象の解明を両輪とする研究推進がおこなわれており高く評価できる。(7名)
- 平成16年度の核融合プラズマの理解に関するシミュレーション研究の多くは核融合研のLHD実験の成果を動機としており、実験と理論との共同研究の顕著な成果である。(1名)
- 理論シミュレーショングループ内で、各自の専門性を活かした組織的な研究が大きな成果を挙げ、若手研究者の育成にも効果をあげている。研究が次第に高度化・複雑化する中で、このような組織的研究がますます重要になると思われる。(1名)
- 本グループの核融合プラズマ研究は、原理・原則をベースとした基礎研究と数値手法の厳密性を重視した研究スタイルに特徴がある。この立場は、複雑系としてのプラズマの研究を長期的視点に立ち広範囲の学術分野との連携を図りつつ推進する観点、および人材育成の観点からも重要であり、研究所設立の趣旨にも適合する。他方、実験的要請も取り入れた評価・予測研究は、理論と実験の有機的連携を通して、核融合プラズマ実験の推進及び物理解の大きな原動力となる。今後、LHD実験のみならず、ITERのITPA活動や様々な実験研究、それらを担当する機関との一層の連携が望まれ、日本全体の視点から基礎研究と評価・予測研究を適切にカバーする必要がある。(1名)
- ただし、全国的に見て核融合プラズマに係わる理論シミュレーション研究者の過半数が核融合科学研究所に集中している点を考慮すると、大型シミュレーション研究に加えて、理

論および小規模シミュレーションについても、より一層配慮することが望ましい。特に、計算科学の人材養成が、知識、技術の継承の上からも我が国の科学施策の重要な課題となっており、理論シミュレーションセンターがその役割を担うことが望まれる。(2名)

- Several of the simulation codes developed at NIFS have gained widespread recognition. As examples, let me mention the gyrokinetic Vlasov code for turbulent transport, the MEGA code for self-consistent energetic particle confinement, and the HINT code for 3D helical equilibria. The neoclassical transport codes have also been quite useful. (2名)
- The development and further enhancement of large-scale comprehensive simulation codes is a worthy venture, especially with the increases in computational power that have become available. It would be recommended that the simulation effort be complemented with focused analysis of underlying physical mechanisms by means of reduced codes and analytical theory, in order to provide stringent tests of the physics models and to develop the intuition and obtain recommendations on the performance of LHD. (2名)
- Comparison with experimental observations should also guide theoretical research. This has improved at NIFS in recent years, but more could be done. (1名)

(4) シミュレーション手法の開発の進め方は適切か

Is the way to develop the simulation technique proper?

- 方法論を発展させ、科学の一分野をリードしようとしており評価できる。(1名)
- コーディングの技術のみならず、高精度ジャイロ運動論ヴラソフコードの開発に見られるような、理論的な基礎を固めつつ計算手法を開発する研究は、研究所の高い学術的ポテンシャルを証明するものであると同時に、長期的には研究所に強い競争力を与えるものと考えられる。(2名)
- 数値的な評価が困難な新古典拡散や電場形成の第一原理シミュレーションも長期的視点で取り組んでおり、又、MHD分野においても理論的視点の強化と新しい数値計算スキームが導入されている。研究テーマの設定とコンシステントな手法開発といえる。(1名)
- このように、多様なシミュレーション手法の開発を進め、現在保有する大型シミュレーション研究用解析装置の性能を十分に発揮している点では適切であるが、可視化技術については成果が見えにくい側面がある。更に、あえて望むなら、トーラスプラズマを総括的に記述し、且つ、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と、その結果の共同利用が期待される。(4名)
- The NIFS simulations use advanced techniques. Several large-scale codes have been parallelized for high vector parallel performance: the electrostatic particle simulation code, the gyrokinetic-Vlasov simulation code, the full-particle electromagnetic simulation code, and the delta-f Monte Carlo transport code. Highly efficient vector optimization rates were reported (exceeding 98%). (2名)
- The Plasma Simulator SX-7 supercomputer, installed in 2003, has been an excellent facility for

plasma physics simulations. However, progress in the development of supercomputers is very rapid, and therefore NIFS should begin thinking about a successor supercomputer in the near future. (1名)

- The virtual reality (VR) work is slightly lagging behind in spite of its great potential. In the past, this line has contributed greatly to the output of the center in many useful applications outside the fusion area such as three dimensional medical tomography. (1名)
- The report about using VR technology for three-dimensional medical tomography is potentially interesting. Is the VR facility actually being used to help design the FFHR LHD-type reactor? (1名)

(5) COEとしての役割を果たしているか

Is the responsibility as a COE in simulation research adequately fulfilled?

- 国際的、学際的交流を活発に行っており、日本の理論・シミュレーション研究の拠点として十分な役割を果たしている。(7名)
- ただし、現在の核融合分野の理論・シミュレーションの人材の多くがNIFSに集中していることも事実であり、核融合分野における基礎研究の重要性を広く普及させる活動と共に長期的な人材育成の観点から資源配分の考察と大学との一層の連携を期待したい。(1名)
- One recent measure of the excellence of the NIFS theory/simulation research is the fact that at the 2004 IAEA Fusion Energy Conference, arguably the most high-profile international meeting in fusion science, NIFS theorists were selected to present four oral papers and one poster paper. In addition, NIFS theorists were co-authors on another poster paper and also on the theory overview oral paper on zonal flow physics (which was the first-ever theory overview talk in the history of this series of conferences). NIFS can be very proud of having done so well with selections for invited theory papers at last year's IAEA conference. (2名)
- The real progress has been made after the LHD went into operation providing for novel experimental results and seeking for theoretical explanations. To this end, the follow-up work on the experimental findings has been excellent. However, in future it is natural to expect more in the form of predictions and recommendations. The theoretical work on future devices will also benefit the status of the center within NIFS. (1名)
- Also, the educational mission of NIFS is being fulfilled in the area of theory and simulations. (1名)

(6) シミュレーションに関する共同研究の進め方は適切か

Is the process for conducting coordinated researches in the simulation research proper?

- 国内外との様々な共同研究があり、かつ他分野との交流も進めており、概ね適切である。(5名)

- ・ ただし、核融合科学研究所以外の研究者との共同研究の成果が見えていないことも事実であり、実験系研究者や周辺分野とのより一層の共同研究、機構内連携で分子科学や天文との連携研究およびレーザー連携に基づくレーザープラズマのシミュレーション研究、更に、国内における燃焼プラズマ研究や数値トカマク実験研究のアクティビティを考慮した従来の枠組みにとらわれない連携の枠組み等、一層の共同研究の活発化が望まれる。(4名)
- ・ The TCSC and TADA groups are actively involved in collaborative research. The collaborations, workshops, and joint research have been very productive. Also, through the annual Toki conference and other programs (JIFT and so on), NIFS has become one of the major meeting places for the world fusion community. (2名)
- ・ The TCSC and TADA groups share responsibility for organizing the US-Japan Joint Institute for Fusion Theory, which arranges visiting professors, exchange visits, and workshops in both countries; I commend them for their excellent work. (1名)
- ・ The table in the Simulation research presentation indicated that large-scale simulation studies involve not only scientists from both the TCSC and TADA groups, but also theorists from other universities (except for the area of Periphery and Divertor). (1名)

(7) 次年度の研究計画は適切か

Is the 2005 research plan drawn out properly?

- ・ 着実な研究の進展を図っており、概ね適切である。(6名)
- ・ 更に、LHDでのHモード実現に向けた指導原理の提示や、LHDやCHSの実験データ解析に対する、大規模シミュレーションの活躍を望みたい。(1名)
- ・ 連結階層モデルの構築を目指すならば、それにつながる研究を今後一層取り入れていくことが望まれる。(1名)
- ・ The research proposed for 2005 appears to be mostly a continuation of existing research efforts. Although not much detail was given, I am confident that the proposed work and new initiatives are worth pursuing because of the quality of the prior research work. (2名)
- ・ Yet, it appears prudent to take a few bold steps exploiting the new infrastructure of NINS. Also, the focus might shift from the interpretation of the LHD campaigns to the guidance aiming at the performance improvement. This has to be done in well-established and close collaboration with leaders of the experimental team. Also, the effort to provide an input to the post LHD development should be included in the programme. Novel material studies may become a part of the research program as well given the plan to establish the World Material Center in Toki. (1名)
- ・ From the LHD experimental presentation it was clear that there are several very interesting observations that pose a challenge for theoretical understanding. (1名)

(8) その他

Other comments (such as relation to ITER)

- 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印象的であった。(1名)
- 核融合研のシミュレーショングループはプラズマ・核融合における世界のトップクラスの地位を維持しているが、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の整備等、一層の研究施設の充実が望まれる。また、バーチャルリアリティも核融合研がいち早く着目して開発してきたものであるが、新しく魅力的なものが他研究機関においても開発されるようになっており、この面での優位性を保つべく、引き続き努力が必要である。(1名)
- 更に、分子科学研究所の NAREGI 等を利用した連結物理複合型シミュレーション手法の一層の発展も考えられよう。(1名)
- Very interesting results were described during the presentation on Simulation Research. In fact, for future External Review Panel meetings, I would encourage extending the schedule from half a day to at least one full day and having several theory/simulation presentations in order to cover all the research in more depth and breadth. (1名)
- During the presentation on Simulation Research, no mention was made of any relationships to ITER. It would seem that at least some of the NIFS theoretical work—e.g., MHD stability, energetic particles, anomalous transport, and impurity transport—could contribute to ITER physics, perhaps through the ITPA process. (2名)
- There is no need to complicate the structure of command of different theoretical divisions in order to avoid unnecessary bureaucracy. Therefore, to retain or even to simplify the present structure appears prudent. (1名)
- The TCSC and TADA web sites are fairly informative. Listing the names of post-doctorals and graduate students is commendable. It appears that both web sites need to be generally updated. The TCSC web site is easy to find, because it is listed on the NIFS home page; the TADA web site is not as easy to find initially. (1名)
- In the NIFS organization chart (presented in the LHD experimental talk), it is noticeable that neither of the two theory groups has a deputy director. The appointment of such a person for each group would help offload some of the administrative burden from the two directors. (1名)
- In conclusion, NIFS can be very proud of the outstanding theory/simulation research carried out by the TCSC and TADA groups. I highly commend this work. (1名)

3. 3 まとめ

[平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか]

核融合科学研究所のシミュレーション研究は、世界的に評価される成果を挙げており、同

研究所が掲げた平成16年度の目標は十分達成されている。MHD平衡・安定性、径電場と乱流輸送の効果、高エネルギー粒子とMHD揺動の相互作用に関する研究などは、磁場閉じ込め核融合プラズマの理解を進めるうえで重要な貢献を成したといえる。また、磁気再結合プロセスに関するシミュレーションなどは、複雑系に関する基礎研究として学際的な価値をもつものである。さらに、高精度ジャイロキネティックヴラゾフコードの開発や粒子コードの並列化を行い、シミュレーション技法の面でも世界をリードしつつある。

[シミュレーションテーマの設定は適切か]

当該研究グループはプラズマにおける〈連結階層〉の問題を主要な研究テーマとして掲げている。様々な時空間スケールが相互作用する連結階層の問題は、プラズマ物理の本質的な特徴であり、これをシミュレーションによって研究するというテーマ設定は学問的に妥当である。この種の学術的なキーワードを提示して研究のアイデンティティを模索すると同時に、具体的にはシミュレーションを支える種々の数値手法を開発し、核融合に直接的に関連する研究課題に取り組んでいる。このようなテーマ設定とグループ運営は、基盤的学術研究とプロジェクト研究とのバランスに配慮したものとして、高く評価される。

[シミュレーション研究の進め方は適切か]

当該研究グループは、原理・原則に忠実な基礎研究と数値手法の厳密性を重視した研究スタイルに特徴がある。この立場は、複雑系としてのプラズマの研究を長期的視点に立ち広範囲の学術分野との連携を図りつつ推進する観点、および人材育成の観点からも重要であり、研究所設立の趣旨にも適合する。他方、実験的要請も取り入れた評価・予測研究は、理論と実験の有機的連携を通して、核融合プラズマ実験の推進及び物理理解の大きな原動力となる。具体的にはLHD実験研究とシミュレーション研究の融合による成果を挙げており、研究所内で十分な研究協力がおこなわれていることが見てとれる。今後はさらに広範な核融合プラズマ実験と連携した評価・予測研究の発展が望まれる。また、大規模シミュレーション研究に加えて、理論および小規模シミュレーションの分野でも、一層の発展が望まれる。

[シミュレーション手法の開発の進め方は適切か]

大規模シミュレーション研究の推進のためには、独創的なシミュレーション手法の開発が必須である。当該研究グループが開発した高精度ジャイロキネティックヴラゾフコードなどは、理論的な基礎を固めつつ計算手法を開発する研究の成果であり、長期的には研究所に強い競争力を与えるものと考えられる。技術的にもベクトル化を一層進めるなどして、現在保有する大型シミュレーション研究用解析装置の性能を十分に発揮している。可視化技術の重要性は論を待たないが、その成果がわかりにくいとの指摘がある。学界への成果の公表・発信に工夫が求められる。

[COEとしての役割を果たしているか]

当該研究グループは、国際的、学際的交流を活発に行っており、日本の理論・シミュレーション

ョン研究の拠点としての役割を果たしている。現在の核融合分野の理論・シミュレーションの人材の多くが核融合科学研究所に集中していることから、長期的人材育成および大学との協力のあり方について、今後も研究者コミュニティと不断の議論をおこなってゆく必要がある。

[シミュレーションに関する共同研究の進め方は適切か]

NIFS共同研究や日米協力などの枠組みを利用した様々な共同研究がおこなわれている。2004 IAEA Fusion Energy Conferenceにおいて発表された論文の多数が、内外の研究者との共同研究であったことにも、その実績が見てとれる。また、他分野との交流も進めている。今後は、実験系研究者や周辺分野とのより一層の共同研究、機構内連携で分子科学や天文との連携研究およびレーザー連携に基づくレーザープラズマのシミュレーション研究、更に、国内における燃焼プラズマ研究や数値トカマク実験研究等、一層の共同研究の活発化が望まれる。

[次年度の研究計画は適切か]

次年度以降も、継続的な研究の進展をねらった研究計画が立てられている。とくに実験プロジェクトと連携した研究の発展に内外から強い期待がある。また、連結階層シミュレーションの斬新なモデルやスキームの開発にも期待が寄せられている。

[その他]

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、不断の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。

第4章 おわりに

当外部評価委員会が評価すべき対象は、研究活動から共同研究体制や組織など多岐にわたるが、今回は法人化後初めての評価であることに鑑み、核融合科学研究所の研究の2本柱であるLHDとシミュレーションの研究活動の両方をまず評価対象とした。第2章、第3章で述べたごとく、いずれの研究も活発に展開されており、これからの更なる発展が期待される。

本委員会としては今後の外部評価の対象として、核融合科学研究所の大きな使命である共同研究・共同利用や各研究センターでの研究の成果などを考えている。

○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

(設置)

第1条 核融合科学研究所の研究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、20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。

(庶務)

第7条 委員会の庶務は、管理部研究連携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。

核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員構成

	氏 名	職 名	所属部会
委員長	吉田 直亮	九州大学応用力学研究所教授	LHD部会長
	Michael Tendler	Professor, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden	シミュレーション&LHD
	小川 雄一	東京大学高温プラズマ研究センター長	LHD幹事
	岡島 茂樹	中部大学工学部教授	LHD
	長 照二	筑波大学プラズマ研究センター長	LHD
	日野 友明	北海道大学大学院工学研究科教授	LHD
	高村 秀一	名古屋大学大学院工学研究科教授	LHD
	佐藤 浩之助	九州大学応用力学研究所 附属炉心理工学研究センター長	LHD
	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	LHD
	二宮博正	日本原子力研究所那珂研究所 炉心プラズマ研究部部长	LHD
	畠山 力三	東北大学大学院工学研究科教授	LHD
	Gyung-Su Lee	Director-General, Korean National Fusion R&D Center, Korea Basic Science Institute	LHD
副委員長	吉田 善章	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授	シミュレーション部会長
	大澤 幸治	名古屋大学大学院理学研究科教授	シミュレーション幹事
	笹尾 真実子	東北大学大学院工学研究科教授	シミュレーション
	福山 淳	京都大学大学院工学研究科教授	シミュレーション
	岸本 泰明	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授	シミュレーション
	三間 圀興	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長	シミュレーション
	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	シミュレーション
	James W. Vandam	Director of Institute for Fusion Studies in the University of Texas at Austin	シミュレーション

核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

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17年1月29日（土）13:00～18:00

場 所：中日パレス「コスモス」

出席者：

◎吉田 直亮	Michael Tendler	△小川 雄一	岡島 茂樹
長 照二	高村 秀一	佐野 史道	二宮 博正
畠山 力三	G. S. Lee		
○吉田 善章	□大澤 幸治	笹尾 真実子	福山 淳
岸本 泰明	三間 罔興	渡邊 國彦	James W. Vandam

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17年3月14日（月）13:30～17:30

場 所：核融合科学研究所管理棟4階第2会議室

出席者：

◎吉田 直亮	△小川 雄一	高村 秀一	佐藤 浩之助
二宮 博正	畠山 力三		
○吉田 善章	□大澤 幸治		

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17年5月13日（金）13:40～17:30

場 所：核融合科学研究所管理棟4階第2会議室

出席者：

◎吉田 直亮	△小川 雄一	岡島 茂樹	長 照二
日野 友明	高村 秀一	佐藤 浩之助	佐野 史道
二宮 博正			
○吉田 善章	□大澤 幸治	笹尾 真実子	三間 罔興
渡邊 國彦			

◎委員長（LHD部会長）

△LHD幹事

○副委員長（シミュレーション部会長）

□シミュレーション幹事

Review Form for the LHD project**NAME: Michael Tendler****DATE:2005-02-10**

(1) Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

LHD has undoubtedly emerged in 2004 as the fore front leader of the world fusion research. Indeed, the synergy of the advanced geometry of the magnetic field, the superconductive coils and the range of external heating sources has provided for the achievement of operation parameters relevant for a future fusion reactor. Specifically, long pulse operation lasting over 30 minutes thereby taking full advantage of the helicity of the confining magnetic field and very high value of $\beta \approx 4\%$ considered unattainable recently and now obtained routinely are the lucid highlights of the 2004 results.

(2) Are the themes of LHD experiments selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

Indeed, studies of MHD phenomena at high β beta have been pursued very rigorously, both experimentally and theoretically. Furthermore, the issue of the Local Island Divertor LID has been addressed demonstrating the efficient pumping provided by LID. Moreover, experiments carried out employing the LID and fuelled by pellets offer a possible route to improved confinement already born out by resulting strongly peaked density profiles. In addition, steep temperature profiles also emerge at the plasma edge ($0.7 < \rho < 1$) under given conditions. These results are highly topical and timely within the framework of fusion research. To put it mildly, it is proceeding very well.

(3) Are the themes of the theory group selected properly? Is the way of procedure proper?

The LHD data and theory group has addressed a wide range of important theoretical studies. Obviously, since more novel data is obtained and accumulated there is a stronger need for theoretical support and interpretation. Moreover, the impact on experimental program focused on predicting performance and improving parameters must be amplified. Based on LHD success, the theory group has to set new trends in fusion research instead of following them provided by others. Furthermore, in case of success it should provide input for scientific and engineering designs of post LHD devices.

(4) Are the developments of the plasma control, heating devices, and diagnostics planned properly?

A large progress has been made improving plasma control, auxiliary heating and diagnostics on LHD. Yet, a lot remains to be done in future along these lines. Indeed, adding a perpendicular heating system appears to emerge as the first priority. This step will definitely benefit MHD studies at high β . It is also bound to increase the ion temperature T_i and to improve confinement thereby bringing to light the suppression of turbulence by the electric field shear. High Frequency heating methods (ECRH and ICRH) must be also further developed and implemented. The goal should be 1 MW of power with duration longer than 1 hour in order to investigate novel frontlines of plasma wall interaction studies relevant for future fusion reactor. Although at the present stage the range of diagnostics seems adequate new ones such as CXRS, HIBP, turbulence measurements etc. have to be developed or transferred from the phased out CHS device , thereby reducing the costs.

(5) Is the responsibility as a COE in fusion plasma research adequately fulfilled?

To reiterate, LHD is a fore front runner of the world fusion research. This is due to the excellence in design and engineering of this device. Even attempts to follow remain unsuccessful so far. Hence, there is a large responsibility to exploit this device to the fullest. During 2004, LHD delivered a lot of novel results breaking the ground of new ranges of operation parameters obtained on the same machine and even during the same discharge. Furthermore, LHD for the first time obtained many impressive parameters previously obtained at random on largest tokamaks. Therefore, the competitiveness of stellarators versus tokamaks has been proven. In summary, results of 2004 went beyond most ambitious expectations.

(6) Is the process for conducting the LHD coordinated researches proper?

Given the success, the coordination of research on LHD is definitely proper. However, the management structure is more of the matrix type due to many, mostly historical reasons. To this end, it may appear prudent to simplify tasks of the leadership by making the structure more of the pile type scheme. Second, it remains a major task of funding agencies to support the effort in order to accelerate already achieved momentum of development. Third, more effort should be spent on public relations not only within Japan, but also internationally. Last, but not least numerous Japanese fusion community should be encouraged to focus its effort on LHD in the capacity of the most relevant to fusion device in operation in Japan. Also, other world communities should be invited to contribute more than it is the case at present.

(7) Is the 2005 research plan drawn out properly?

The research plans for 2005 are drawn properly within the framework of the available budget. One may think in terms of acceleration provided the budget will be increased.

It is also important to keep in mind a longer range of perspectives stretching over a period of say 10 years. To this end, some work along the lines of LHD upgrade should be started. The plan to establish the World Material Centre on the basis of NIFS seems very topical and timely employing the traditions of the region. Yet, the expansion should not go too fast in order to maintain the character of the region. Last, the collaborations with other institutes of NINS should be included in the planning with emphasis on the simulation research centre activities.

(8) Other comments (such as relation to ITER)

There is a lot of relevance to ITER in LHD in terms of long pulse operation, divertor physics, improved confinement, high β studies, plasma wall interactions etc. Yet, there are also important well known differences. Since, there is no guarantee that a future fusion reactor will be necessarily of the tokamak type it is important to pursue alternative concepts rigorously and relentlessly. LHD is definitely a major player in this strategy offering promising alternatives on the way to an economical thermonuclear reactor.

「LHD」に関する評価の観点

NAME: マイケル・テンドラー

DATE:2005-02-10

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

LHD は世界の核融合研究分野で最前線を率いる存在として、2004年、確実に頭角を現した。高度な磁場配位、超伝導コイル、および種々の外部加熱源、これらがあいまって将来の核融合炉に関わる運転パラメータ達成への足がかりとなった。2004年の実験結果で最重要項目として挙げられるのは、閉じ込め磁場のヘリカル特性を存分に利用した30分以上に及ぶ長時間運転、そして最近まで到達不可能と考えられていた $\beta \approx 4\%$ という高ベータ値の達成であろう。

(2) LHD実験テーマの設定や実験の進め方は適切か

高ベータ値でのMHD現象に関する研究は実験的にも理論的にも厳密に遂行された。更にローカルアイランドダイバータ(LID)に関しては、LIDの効率的な排気システムを実証し、その課題が示された。またLIDを使用しペレットで燃料供給する実験では、強くピークした密度分布を生じさせたことにより実証された閉じ込め改善に至るルートを示している。加えて一定の条件下では、周辺プラズマ($0.7 < \rho < 1$)で急峻な温度勾配が現れている。これらの結果は時宜にかなったもので、核融合研究の分野で話題性も高い。言い換えれば非常に上手く進行している。

(3) 理論のテーマ構成とその進め方は適切か

LHDデータおよび理論グループは、多岐に渡る重要な理論研究を発表した。新しいデータが取得され、集積されるにつれて、それらに対する理論的立証または解釈の必要性が高まるのは明確である。更に性能予測、およびパラメータ改良に焦点をあてた実験プログラムにもたらす影響度も、確実に増している。LHDの成功を受けて、理論グループは他者の敷いた道歩くのではなく、グループ自ら核融合研究における新しい流れを築くべきだと考える。またそれがうまく行った場合、LHDの後続に関する科学的工学的設計へも進むべきである。

(4) LHD制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か

LHD制御・加熱・計測関連機器における改善・改良には目覚ましいものがある。とは言えこれらに関しては、なすべきことが多く残されている。とりわけ垂直加熱システムの導入が最優先事項であろう。これは高ベータ実験におけるMHD研究に、大変有益なステップとなるだろう。同様にイオン温度 T_i の上昇および閉じ込め改良がなされるであろう。これにより、電界シヤーによる乱流抑制の解明にも繋がる可能性がある。高周波加熱(ECRHおよびICRH)についても更なる開発・実施が必須となる。未来の核融合炉に関わるプラズマ壁相互作用の最前線の新しい研究をするにあたり、目標は1時間超の時間に及ぶ1MWのパワー投入であろう。現段階では今の計測機器で十分かもしれないが、CXRSやHIBP、乱流計測などの新装置を開発するか、もしくは経費削減の為に終了予定のCHSからの計測器の移転導入をするべきである。

(5) COEとしての役割を果たしているか

繰り返しになるが、LHDは世界的な核融合研究の最前線をリードする装置であり、これは卓越した装置設計および工学技術によるものである。現在に到るまで、同様な開発に成功した例は世界に存在しない。従って、LHDを十分に活用するという重要な責務が課せられる。2004年度期間中LHDは数多くの新記録を樹立し、同装置の過去の動作パラメータを塗り替えた。更にLHDは大型トカマク装置で得られていた多数の重要なパラメータを初めて得た。ゆえに、トカマクと競争できるステラレータの力が証明された。これらを要約すると、2004年度の結果は最も強く望まれていた期待をすら上回るものである。

(6) LHDに関する共同研究の進め方は適切か

実験成功から考えて、LHD共同研究の進め方は確かなものである。しかし管理構造については、主に歴史的経緯により縦横構造となっている。この点では、まず積み上げ構造的にし、リーダーシップを持って行う任務の簡素化を図るのが適切だと考える。次に、これまで通り予算配分を行う行政の主な役割は、既に確立された発展の流れを加速させる為、その努力を支援する事である。第三に、国内・国外とも広報活動に一層の努力を費やすべきである。最後に述べる案件についても重要度が高い。つまり、日本国内で稼動中で核融合装置に最も関連性が高いという認識のもと、国内核融合コミュニティに対してLHDに的を絞った研究を奨励すべきである。また、世界のコミュニティについても今以上に参加を呼びかけ、貢献を促すべきである。

(7) 今後の研究計画は適切か

2005年度研究は規定の予算限度内で適切に計画されている。予算が増加されるなら、一層の研究の加速も考えられる。また長期計画—例えば10年越しに及ぶ展開—についても視野に入れておくことが重要である。このためLHD後継機について、徐々に検討を開始してもよいと考えられる。NIFSを基盤にしたワールドマテリアルセンターの構想は地域の伝統を引き継ぎ、話題性にも富んでいる。が、地域の特性を保持する為、決して過大事業に至らしめてはならない。そしてNINS所属の他の機関との協力についてであるが、これらはシミュレーションセンターの研究活動に重点をおいた計画を含むべきである。

(8) その他

長時間運転、ダイバータ物理、閉じ込め改善、高ベータ研究、プラズマ壁相互作用…等、LHDにおけるITERとの関連性は数多く存在する。が、逆に周知の相違も存在している。未来の核融合炉がトカマク型を採用する保障は無く、その代替となる概念を精力的かつ継続して発展させて行くことが重要である。LHDは経済的な熱核炉を実現する上で非常に有望視されており、トカマクの代替装置としても重要な位置を占めている。

Review Form for the LHD project

NAME: Gyung-Su Lee

DATE:2005-02-17

(1) Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

During year 2004 period, LHD project achieved concrete results to demonstrate its role as one of the leader of world fusion research. Utilizing superconducting magnet system and powerful auxiliary heating system as well as its configuration flexibility, LHD project demonstrated long-pulse operation capability with physics parameters relevant for studying fusion reactor regime. Therefore, the reviewer firmly believes that the results achieved by LHD project is more than satisfactory and would like to commend all staff members for their achievements.

(2) Are the themes of LHD experiments selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

The themes of LHD experiments are very well placed, especially, MHD studies at high beta have been pursued extensively. Also, the issue of the Local Island Divertor has been addressed questions of the efficient pumping scheme. Moreover, experiments carried out employing the LID and fuelled by pellets offer a possible route to improved confinement already born out by resulting strongly peaked density profiles. In addition, steep temperature profiles also emerge at the plasma edge under given conditions. These results are highly topical and timely within the framework of world fusion research.

(3) Are the themes of the theory group selected properly? Is the way of procedure proper?

The themes of the theory group in relation to the LHD experiments seem to have been appropriate. As experimental data from LHD experiment accumulate, there is a strong need for theoretical efforts in interpretation and prediction of experimental campaign. The theory group did perform very well on these directions, with support from excellent computing capacity as well as strong staffs. It is however, to recommend that the co-work arrangement with simulation group need to be reviewed and try to find stronger ties between two competent groups for better and efficient execution of theory for LHD as well as fundamental plasma simulation.

(4) Are the developments of the plasma control, heating devices, and diagnostics planned properly?

After the last review of LHD project, the progress in the development of the control system, heating and diagnostic systems is very impressive. It is also noted that the direction for developmental path is well planned in accordance with experimental theme of LHD projects. Having stated that, it is prudent to recommend that further developmental plan of NBI, ICH would be implemented with timely fashion. It is also important to supplement fluctuation diagnostics for detailed studies of turbulence and transport in helical system.

(5) Is the responsibility as a COE in fusion plasma research adequately fulfilled?

The LHD is the leading fusion plasma research device in world fusion effort. Therefore it is well situated itself for being effective and powerful COE in fusion plasma research. During year 2004, the responsibility of LHD as a COE in fusion plasma research was fulfilled more than adequately. However, it is also important to recognize that the necessity of continuing and stronger support of LHD project to perform more vigorously in adding heating systems and diagnostic systems.

(6) Is the process for conducting the LHD coordinated researches proper?

The reviewer considers that coordination of research on LHD is proper to produce important scientific results that we witnessed. However, the innovation on the process could be pursued to focus on specific research theme further. The stronger integration of Japan's domestic fusion research themes into LHD's coordinated research would benefit both sides and strengthen LHD project. It is also recommended to extend LHD's collaboration effort to the world fusion community so that the scientific contribution of LHD could exert stronger impact.

(7) Is the 2005 research plan drawn out properly?

The reviewer finds that the research plans for 2005 are drawn properly within available resources. In this occasion, it is important to recognize that a mid-term and longer range research plan of LHD and beyond would need attention when LHD project produces important results. The Material Center and Fusion Engineering Research Center would add important mission to the NIFS organization but it would be also focused so that the core competence of NIFS should be enhanced rather than defocused its main function and mission.

(8) Other comments (such as relation to ITER)

The findings from LHD experiment and theoretical work have strong implication to the world fusion program including ITER project. In this line of thinking, the importance of collaboration through international effort such as ITPA should be emphasized further. So the similarity and difference between tokamak geometry and helical system could be explored in scientific understanding of turbulence and transport.

「LHD」に関する評価の観点

NAME: ギュン・スー・リー

DATE:2005-02-17

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

2004年度中、LHDプロジェクトで具体的な成果を収め、世界の核融合研究を率いる一機関としての役割を発揮した。超伝導コイルシステムと強力な加熱システムおよび磁場構造の柔軟性を利用して、LHDプロジェクトは核融合炉領域の研究に関連する物理パラメータで、プラズマの長時間維持を実証した。よって、LHDプロジェクトで到達した結果は予想以上のものであると確信しており、その成果について作業に携わった関係者すべてに賞賛の意を表したい。

(2) LHD実験テーマの設定や実験の進め方は適切か

LHD実験テーマは賢明に選択されており、特に高ベータ値でのMHD研究は広範囲にわたって行われている。また、ローカルアイランドダイバータの課題は効率的な排気スキームについて疑問を投げかけている。またLIDを使用しペレットで燃料供給する実験では、強い中心ピークの密度分布により実証された閉じ込め改善に辿り着くルートを示している。加えて一定の条件下では、プラズマの端で急峻な温度勾配が現れている。これらの結果は世界の核融合研究において時宜にかなったもので、話題性も高い。

(3) 理論のテーマ構成とその進め方は適切か

LHD実験に関連した理論のテーマ構成は適切であると考ええる。LHD実験のデータが蓄積される度、理論研究に対して実験成果の解析や予測を求める要求が高まってくる。理論グループは優れた計算能力とそれを操作する人材を得て、これらに上手く対応した。とは言えシミュレーショングループとの研究協力には見直す余地があり、両グループ間の絆を強める努力が必要である。このことにより、両グループはLHDおよび基礎プラズマシミュレーションに対して今以上に効果的に理論研究を実行できると考える。

(4) LHD制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か

前回のLHDプロジェクト評価以来、制御システム・加熱および計測システムにおける発展が目覚ましい。開発の方向性もLHDプロジェクトの実験テーマに基づき、よく計画されている事に注目したい。これを受けて、NBIやICHの今後の開発計画に関しても、時宜を得た実施が望まれる。またヘリカルシステムの乱流および輸送を詳しく研究するため、揺動計測を強化することも重要である。

(5) COEとしての役割を果たしているか

LHDは世界の核融合研究界を先導する核融合プラズマ研究装置である。よって非常に効果的であり、核融合プラズマ研究分野で強力なCOEとしての地位を築いている。2004年度中、核融合プラズマ研究においてLHDはCOEとしての役割を存分に発揮した。しかし、加熱および計測システムをさらに増強して、LHDプロジェクトをより一層発展させるには、継続してより強力なサポートをする必要がある事を認識しなければならない。

(6) LHDに関する共同研究の進め方は適切か

LHD 共同研究により、重要な科学的成果が適切に得られていると考える。しかしながら、特定のテーマを更に掘り下げて研究できるよう、工夫の余地があろう。日本国内核融合研究のテーマを LHD 共同研究に統合することは、大学及び研究所の双方に役立つであろうし、LHD プロジェクトの強化にもなるだろう。LHD の科学的貢献度を更に高める目的で、国内のみならず、海外の核融合コミュニティにも同装置に関する共同研究活動を進めることが望まれる。

(7) 今後の研究計画は適切か

2005 年度の研究計画は、予算に応じて適切に作成されていると思われる。LHD プロジェクトが重要な成果を挙げる今を機に、LHD 及びその他の中期・長期研究計画を検討する必要性を認識すべきである。マテリアルセンター及び炉工学研究センターは NIFS 組織に重要な役割を加えるが、NIFS の主な役割と使命をより一層強化すべきであり、余り発散すべきではない。

(8) その他

LHD 実験および理論の成果は、ITER プロジェクトを含む世界の核融合研究計画に強い影響を与えている。このことを受け、ITPA などの国際活動を介した研究協力の重要性が、更に強調されるべきだろう。トカマクとヘリカルシステムの類似点と相違点が乱流と輸送を科学的に理解することを通して探求できるだろう。

Review Form for the LHD project

NAME: James W. Van Dam

DATE:2005-02-25

(1) Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

Excellent experimental results were obtained last year. These results were reported at the 2004 IAEA Fusion Energy Conference (Vilamoura, Portugal). An impressive number of experimental papers from NIFS were selected for oral presentation at this prestigious conference: five on LHD (including an overview talk), two on CHS, one on JFT-2M, and one on the international stellarator data base. In addition, nine more NIFS experimental papers were selected for poster presentation, as well as two oral and four poster papers in the area of fusion technology. Theory papers from NIFS had a similarly strong showing.

The LHD experimental presentation at the External Review Panel meeting was very interesting—so interesting, in fact, that I would have liked to hear several talks about the experimental results.

The world-record long pulse discharge obtained on LHD in December 2004 (with 1.3 GJ, 1905 sec, 680 kW) was especially noteworthy for the development of steady-state operation.

(2) Are the themes of LHD experiments selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

The list of LHD experimental themes includes performance objectives, scientific objectives, and technological objectives. The emphasis is apparently on the first of these, which is appropriate for the mission of this facility and for its broad range of capabilities.

In order to assess the experimental plans, it might be helpful for future External Review Panels to see the run-time allocations on the machine. (This is normal procedure at advisory committee meetings for U.S. experiments.)

(3) Are the themes of the theory group selected properly? Is the way of procedure proper?

The strong theory/simulation effort befits the status of NIFS as a world-leading fusion research institution.

See further comments in Simulation Research review form (below).

(4) Are the developments of the plasma control, heating devices, and diagnostics planned properly?

Heavy ion beam probe, charge exchange recombination spectroscopy, and beam emission spectroscopy—all of which are valuable diagnostics—will be developed and installed in the near future.

(5) Is the responsibility as a COE in fusion plasma research adequately fulfilled?

As an institution, NIFS celebrated its fifteenth anniversary last year. During these 15 years, the Institute has made splendid scientific progress, for which it is to be heartily congratulated. The construction and operation of the world's largest helical plasma experiment is an outstanding success.

(6) Is the process for conducting the LHD coordinated researches proper?

The LHD experiment has excellent collaborations with other helical experiments around the world. I was disappointed to see that no U.S. scientists were listed as participants in LHD experimental groups, but I think that the fault for missing this fine opportunity probably lies on the U.S. side. The NSTX and MAST spherical torus experiments are very interested in the application of electron Bernstein waves; perhaps LHD could initiate joint discussions. The new World Academy of Materials Science that will be located near NIFS is an interesting development. Perhaps collaborations on fusion materials studies would be useful, although it might require additional budget resources.

(7) Is the 2005 research plan drawn out properly?

The small helical device CHS has produced a number of excellent results and fine publications over the years. A recent example is the observation of zonal flows. This machine allows flexibility for studying specific physics issues and then feeding the results back to LHD. It is unfortunate that budget constraints will force its termination after next year.

(8) Other comments (such as relation to ITER)

Changes in the LHD organizational structure are occurring at a reasonable pace. I appreciated that the LHD experimental presentation was structured so as to answer each of the External Review Panel questions. LHD has several physics issues in common with ITER—such as MHD stability, energetic particles, anomalous transport, impurities, etc.—and so it could be mutually beneficial for LHD scientists to be involved in the ITPA process. The Fusion Engineering Research Center deserves more time for its own review at a future meeting of the External Review Panel. Again, I congratulate the NIFS experimental program on outstanding research results, and look forward to the future continuation of this excellent program.

「LHD」に関する評価の観点

NAME: ジェームズ W. ヴァンダム

DATE:2005-02-25

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

昨年は素晴らしい実験結果を達成した。これらについては 2004 年 IAEA 核融合エネルギー会議 (Vilamoura, ポルトガル) で報告された。著名な国際会議の場で、NIFS からは目を見張る数の実験報告が口頭発表として採択された。その内訳は総合報告を含む LHD 関連の発表が 5 件、CHS に関するものが 2 件、JFT-2M との共同研究についてが 1 件、そして国際ステラレータデータベースに関する発表が 1 件となっている。加えてポスター発表として 9 件の NIFS 実験報告が選ばれている他、核融合技術分野においては口頭発表が 2 件、ポスター発表が 4 件の実績となっている。NIFS からの理論研究論文についても同様に強い印象を与えていた。

外部評価委員会議での LHD 実験発表は非常に興味深いものであり、事実、いくつもの実験結果について知りたいと思わせる内容であった。

2004 年 12 月に LHD で達成された世界記録となる長時間放電 (1.3 GJ, 1905 sec, 680 kW) は、定常運転への発展性という観点から一際注目に値する。

(2) LHD 実験テーマの設定や実験の進め方は適切か

LHD 実験テーマ一覧には性能的、科学的、そして技術的目標が明記されている。最も強調されているのは性能的な目標であり、この施設の使命および幅広い可能性を考慮すると適切な判断である。実験計画を評価するにあたり、装置における実験時間の割り振りを見ることができれば、先々の外部評価に役立つのではないかと思う。(米国の実験に対する評価諮問委員会議の場では一般的である。)

(3) 理論のテーマ構成とその進め方は適切か

理論シミュレーションに関する強力な研究活動は、世界規模の核融合研究機関として NIFS の地位向上に貢献している。

詳細についてはシミュレーション研究評価 (別添) を参照

(4) LHD 制御・加熱・計測関連機器の開発の進め方は適切か

重イオンビームプローブ、電荷交換再結合分光法、およびビーム発光分光法などの重要な計測機器が近い将来開発され、導入されるだろう。

(5) COE としての役割を果たしているか

研究機関として、NIFS は昨年 15 周年を迎えた。ここに到るまで同研究所は目覚ましい科学的進歩を遂げた。これについては心から賞賛に値する。世界最大のヘリカルプラズマ実験装置を建設し、稼働させた事実は傑出した成功である。

(6) LHDに関する共同研究の進め方は適切か

LHD 実験は世界中のヘリカル実験との間に優れた協調性を保ち、実行されている。LHD 実験グループの参加者として米国科学者が一人も含まれていないのは残念であるが、この貴重な機会を逃した理由は米国側の事情によると推測する。NSTX および MAST 球状トーラス実験は電子バースタイン波を使用するという点で非常に興味深い。LHD グループはこの事について共同討議を始めれば良いのではないだろうか。

NIFS 近郊に新規設立される世界マテリアルサイエンスアカデミーは、非常にユニークなものである。核融合マテリアルに関する共同研究も有益なのだろうが、それには追加予算が必要となるだろう。

(7) 今後の研究計画は適切か

小規模ヘリカル装置 (CHS) は優れた結果を数多く産出し、長年に渡って価値ある論文を発表してきた。

近年の例を挙げると帯状流 (ゾーナルフロー) の観測である。この装置は特定の物理的論点を研究する上で、非常に柔軟性があり、そこで得られた結果は LHD に反映される。予算上の制限により、来年度以降、同装置が廃止に追われるのは非常に残念である。

(8) その他

LHD 組織構造の変更は合理的に進められている。

LHD 実験に関するプレゼンテーションが、外部評価委員の質問に答える形で構成されていた事は非常にあり難かった。

LHD は ITER に共通するいくつかの物理的課題をもっている。例えば MHD 安定性、高エネルギー粒子、異常輸送、不純物などが挙げられる。よって LHD 研究者の ITPA (国際トカマク物理活動) への参加・協力は、双方にとって有益となるだろう。

炉工学研究センターは今後の外部評価委員会において、同センターに関する自己評価にもう少し時間的ゆとりを与えられるべきだろう。

繰り返しになるが、NIFS の実験プログラムが卓越した研究結果に繋がった事に祝いの言葉を述べたい。

また、これらの素晴らしいプログラムが、この先も継続して実行される事を心より期待している。

Review Form for the simulation research

NAME: Michael Tendler

DATE:2005-02-20

(1) Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

In general, the simulation research centre has carried out high quality work during this period. Indeed, free boundary MHD helical stability studies with emphasis on boundary modulations, Ion Temperature Gradient mode turbulence, tearing mode and reconnection studies and energetic particle behaviour are among the highlights of the 2004 activity. Neoclassical simulation code addressing the LHD configuration in particular and the stellarator geometry in general yields very important results in obtaining novel features of transport barriers recorded on LHD and CHS. Among new lines of research, one should mention first attempts to develop the theory for dust transport in toroidal plasma.

(2) Are the themes of simulation researches selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

The themes of the simulation research centre consist of fusion physics, self-organisation science and simulation studies. All of these are highly topical and timely. Fusion physics addresses MHD stability, magnetic reconnections, high-energy particles and neoclassical and anomalous transport. They provide useful information for experimental work. Self-organisation activity addresses basic plasma physics including laser plasma interactions studied experimentally at ILE, space physics, atomic and molecular physics. More interactions with NINS and other institutes are desirable in order to benefit from the synergy of interdisciplinary approach.

(3) Is the way to proceed simulation researches proper?

Codes developed by the centre have gained a lot of confidence from the community. Among the major achievements one should mention gyrokinetic Vlasov code for anomalous transport, the MEGA code for self – consistent energetic particle confinement, HINT code for 3 D helical equilibrium and last, but not least the neoclassical transport code. Yet, it will be beneficial in order to enhance the impact on the LHD experiment to develop also simpler analytical and reduced code approaches, thereby focussing on the underlying physical mechanisms. This might enable the staff to develop the intuition and obtain recommendations on the performance of LHD.

(4) Is the way to develop the simulation technique proper?

The simulation technique is proper and moreover advanced. Most of the large-scale codes are parallelized yielding a high vector performance of the order of 98 %. The novel SX –7 supercomputer taken into operation in 2003 is one of the most powerful ones employed all over the world. To this end, the simulation centre is well in position to contribute to the upgrade of the LHD device and should attend to this issue as soon as possible. The virtual reality work is slightly lagging behind in spite of its great potential. In the past, this line has contributed greatly to the output of the centre in many useful applications outside the fusion area such as three dimensional medical tomography.

(5) Is the responsibility as a COE in simulation research adequately fulfilled?

Beyond the shadow of a doubt, the simulation centre represents the cutting edge in fusion research. Many members of the team have made their high international reputations entirely within NIFS thereby contributing to the high standards established there. The real progress has been made after the LHD went into operation providing for novel experimental results and seeking for theoretical explanations. To this end, the follow –up work on the experimental findings has been excellent. However, in future it is natural to expect more in the form of predictions and recommendations. The theoretical work on future devices will also benefit the status of the centre within NIFS. It is noteworthy within the context the high rate of acceptance of theoretical papers at the latest IAEA conference.

(6) Is the process for conducting coordinated researches in the simulation research proper?

Many theorists from NIFS are involved in numerous international collaborations. Moreover, many if not most of the internationally acclaimed theorists have visited NIFS and exchanged ideas, results and methods with the counterparts from NIFS. This has become possible due to the annual Toki conferences and other meetings organised by NIFS, extensive exchange programs wisely and generously funded by JSPS and other funding agencies in Japan and many other tools. Indeed, NIFS has become one of the major meeting places for the world fusion community. Furthermore, the presence of LHD adds up momentum to the productivity of these exchanges.

(7) Is the 2005 research plan drawn out properly?

The research proposed for 2005 is primarily the continuation along the lines of 2004. Yet, it appears prudent to take a few bold steps exploiting the new infrastructure of NINS. Also, the focus might shift from the interpretation of the LHD campaigns to the guidance aiming at the performance improvement. This has to be done in well – established and close collaboration with leaders of the experimental team. Also, the effort to provide an input to the post LHD development should be included in the programme. Novel material studies may become a part of the research program as well given the plan to establish the World Material Centre in Toki.

(8) Other comments (such as relation to ITER)

Many codes developed at NIFS such as MHD stability, high-energy particles and anomalous transport are highly relevant for ITER. Yet, there is no mentioning on their application to ITER. Hence, the application of these codes to ITER is definitely beneficial, specially due to the benchmarking of these codes to LHD.

There is no need to complicate the structure of command of different theoretical divisions in order to avoid unnecessary bureaucracy. Therefore, to retain or even to simplify the present structure appears prudent.

「シミュレーション」に関する評価の観点

NAME: マイケル・テンドラー

DATE:2005-02-20

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

当該期間中にシミュレーション研究センターが行った研究活動は、総合的に判断して高く評価されるものである。殊に境界変調、イオン温度勾配駆動型 (ITG) 乱流、ティアリング・モード、磁気リコネクション研究、及び高エネルギー粒子の振舞いに焦点を絞った自由境界 MHD ヘリカル安定性研究は、2004 年度活動の最重要ポイントに挙げられる。LHD 配位や一般的なステラレータ構造を記述する新古典論に基づくシミュレーションコードにより、LHD および CHS で得られた輸送障壁の新しい特徴を得るという、非常に重要な結果に繋がった。また新規研究として、トロイダルプラズマ中のダスト輸送に関する理論開発に着手した点は、注目されるべきである。

(2) シミュレーション研究テーマの設定は適切か

シミュレーション研究センターの課題は核融合物理、自己組織化の科学、およびシミュレーション研究により構成されている。これらは全てが時代に即した分野であり、周囲の関心を集めるものである。核融合物理は MHD 安定性、磁気リコネクション、高エネルギー粒子、新古典論的及び異常輸送などを記述し、実験を行う上で有益な情報を提供している。自己組織化研究は ILE で実験研究中のレーザープラズマ相互作用、宇宙物理、および原子分子物理学を含む基礎プラズマ物理を展開している。以後、共同利用機関として NINS やその他機関とより活発な交流活動の場を設け、相互アプローチによる相乗効果の利点を更に生かしていく事が望まれる。

(3) シミュレーション研究の進め方は適切か

研究センターで開発されたコードは各方面から確かな信頼を得ている。数々の実績を収めてきた中で、異常輸送用ジャイロキネティック-ヴラソフコード、自己無膠着高エネルギー粒子閉じ込め用 MEGA コード、3Dヘリカル平衡用 H I N T コード、そして同じく重要な新古典論輸送コードを特に評価したい。とは言え LHD 実験に及ぼす影響をさらに増大させるには、基礎となる物理メカニズムに着目し、より簡潔で理論的な簡易コードの開発が今後は役立つだろう。これにより研究員の洞察力が養われるとともに、LHD 性能改善への手がかりを得ることにもなる。

(4) シミュレーション手法の開発の進め方は適切か

シミュレーション技術は適切かつ優れている。ほぼ全ての大規模コードが並列化され、ベクトル計算で約 98% の高効率を記録されている。2003 年に導入された新しい SX-7 型スーパーコンピュータは、最も強力なマシンとして世界中に普及している。このため、シミュレーションセンターは LHD 装置のアップグレードを十分にサポートできる立場であり、それについて早急に着手すべきであると考えられる。バーチャル・リアリティに関しては、優れた潜在能力を持ちつつも、他に遅れを取っている感が拭えない。過去において、同技術は 3D 医用トモグラフィ（断層撮影）など核融合以外の分野における数多くの有益な応用技術機器に対する、中心的役割として大きく貢献してきた。

(5) COEとしての役割を果たしているか

シミュレーションセンターが核融合研究の最先端を行っているのは明らかである。センター員の多くが高い国際評価を確立し、その結果、NIFSでの高い水準を築くことに貢献している。LHD実験で新しい実験結果を得て、その理論的解明を探索することで、シミュレーション研究の本格的な発展を遂げている。このことから、実験成果に関する理論考査は非常に優れていた。しかしながら、予測およびアドバイスといった形態のシミュレーションに、今後は期待が寄せられるのは必須である。将来の装置に関する理論研究なども、NIFSにおける同センターの位置付けに大きく寄与するだろう。今年度(2004年)開催されたIAEA会議で、理論研究論文が広く受容れられた点は注目に値する。

(6) シミュレーション研究に関する共同研究の進め方は適切か

NIFSの理論研究者の多くは様々な国際的共同研究に従事している。更に、国際的に認知された理論研究者もこれまで数多くNIFSを訪問し、NIFS理論研究者とアイデア、結果、または方法論について意見を交わしてきた。これはNIFSが主催する土岐コンファレンスや他の会議を通し、実現が可能となった。JSPS、および国内支援団体が賢明かつ盛大に支援する大規模交流プログラム、他各種多様な手段についても同様で、前者の実現に大きく寄与している。事実、NIFSは世界中にある核融合コミュニティの主な会合場所として認識されている。

(7) 今後の研究計画は適切か

2005年度について提案されている研究は、基本的に2004年度を継続するものである。しかしながら、NINSという新しい構造基盤を活用し、多少思い切った手段を取るのが賢明だと考えられる。また、焦点がLHD実験の解釈から性能改善に向けた提案をする方へ移る方が良いであろう。これは実験チームの代表者と協力して、実行する必要がある。また、LHD後継機に関わる情報を提供する作業についても、計画の中に含めるべきである。土岐市に開設予定のワールドマテリアルセンターの一件もあり、新しい材料研究が研究プログラムのひとつとなり得るかもしれない。

(8) その他

MHD安定性、高エネルギー粒子、及び異常輸送など、NIFSで開発されたコードの多くがITERに関連がある。しかしながら、ITERへの適用については言及されていない。特に、これらコードがLHDにおいて確認できるので、ITERへのそのコード適用は非常に有益である。無用な官僚主義を排除するため、異なる理論部門における指揮構造の複雑化は避けなければならない。よって、現状構造の維持もしくは簡素化するのが賢明である。

Review Form for the simulation research

NAME: James W. Van Dam

DATE: 2005-02-25

(1) Is a satisfactory result achieved according to the year 2004 goal?

Very interesting results were described during the presentation on Simulation Research. In fact, for future External Review Panel meetings, I would encourage extending the schedule from half a day to at least one full day and having several theory/simulation presentations in order to cover all the research in more depth and breadth.

The theory/simulation work that was described in the presentation is all generally high-quality work. Among these results, I was particularly impressed with the studies on MHD helical stability with boundary modulations, on ITG anomalous transport, and on energetic particle phenomena. Some other nice pieces of theoretical work were the neoclassical prediction of the electron root for e/n-ITB formation, the simulations of the ion strike-point distribution for the Local Island Divertor, the new model for pellet ablation, and the theory for dust transport in toroidal plasmas.

(2) Are the themes of simulation researches selected properly? Is the way to proceed the experiments proper?

The work of the Theory and Computer Simulation Center (TCSC) is organized under the three categories of fusion physics, self-organization science, and simulation science. Fusion physics includes topics such as MHD instability, energetic particles, anomalous and neoclassical transport, and divertor physics. Self-organization science concerns basic plasma processes, including topics such as reconnection, laser-plasma interactions, fluid dynamics, dusty plasmas, and atomic and molecular physics. Simulation science includes the topics of high-performance computing methodology and virtual reality.

The work of the Theory and Data Analysis Division (TADA) consists of the application and construction of theoretical models for LHD and other fusion plasmas (according to the "Research Topics" page of the TADA web site). A more detailed delineation may be inferred from the TADA "Members" web page, which uses stability, heating, core plasma, transport, and equilibrium as the research categories. These are the classic categories for fusion plasma studies and hence are appropriate. However, the TADA scientists listed under "Plasma Heating Analysis" are actually working on anomalous and neoclassical transport, so this category may be a misnomer. In fact, I don't find any papers on plasma heating analysis in the 2004 list of theory publications.

The work of the TCSC and the TADA has become more integrated in recent years, especially with the movement of several scientists between the two groups (including one person now shared half-time in both groups). The Simulation research presentation showed an excellent table about how large-scale simulation studies are organized in matrix form, with five of the six research areas involving scientists from both theory groups.

At the External Review Panel meeting, the question was raised why NIFS has two theory groups, instead of one. Historically, the roles of the two groups have been different. The TADA group focuses on the theoretical understanding of helical plasma behavior and provides predictions and "postdictions" (i.e., data analysis) specific to LHD. This sort of theory support for the experiment is quite appropriate since TADA is a division within the LHD project department, The TCSC group, on the other hand, has had a somewhat independent status

within NIFS, which has allowed it to address a broad range of scientific problems, united by the common theme of being addressed through advanced simulations. In recent years there has been a growing convergence between TADA and the fusion research activities of TCSC. By and large, the complexity science and virtual reality simulation science areas of TCSC remain fairly distinct from fusion science. However, these two theoretical areas may be able to build bridges to research being conducted at other (non-fusion) institutes within the NINS parent organization; atomic and molecular dynamics is one such possible topic. To conclude, I think that the present situation with NIFS having two theory groups is fine, because each of them has a distinct and worthwhile *raison d'être*.

(3) Is the way to proceed simulation researches proper?

Several of the simulation codes developed at NIFS have gained widespread recognition. As examples, let me mention the gyrokinetic Vlasov code for turbulent transport, the MEGA code for self-consistent energetic particle confinement, and the HINT code for 3D helical equilibria. The neoclassical transport codes have also been quite useful.

The development and further enhancement of large-scale comprehensive simulation codes is a worthy venture, especially with the increases in computational power that have become available. I would recommend that the simulation effort be complemented with focused analysis of underlying physical mechanisms by means of reduced codes and analytical theory, in order to provide stringent tests of the physics models.

Comparison with experimental observations should also guide theoretical research. This has improved at NIFS in recent years, but more could be done. In the LHD list of publications for 2004, two of the 27 TADA theory publications had experimentalists as co-authors, and nine of the 92 LHD experimental papers had theorists as co-authors. Of the 53 TCSC publications last year, eight had experimentalists as co-authors. One of the four NIFS theory invited talks at the 2004 IAEA Conference had experimental co-authors. I was pleased that at several points the LHD research presentation referred to theory-experiment comparisons (pages 38, 42, 43, 45, 47-48, 49, 54, and 55); in addition, this presentation described some experimentally relevant theoretical results (pages 71, 72, 75, 76, 77, and 78) not covered in the Simulation Research presentation. Theory, modeling, and simulations can be quite useful to help quantitatively interpret and even guide the fine LHD experimental work. Fundamental theory/simulation research can also be applied to concrete problems (e.g., reconnection in the Earth's magnetotail or laboratory reconnection experiments). I was also delighted to see that two co-leaders of the LHD experimental groups are theorists (from NIFS and Kyoto).

(4) Is the way to develop the simulation technique proper?

The NIFS simulations use advanced techniques. Several large-scale codes have been parallelized for high vector parallel performance: the electrostatic particle simulation code, the gyrokinetic-Vlasov simulation code, the full-particle electromagnetic simulation code, and the delta-f Monte Carlo transport code. Highly efficient vector optimization rates were reported (exceeding 98%).

The Plasma Simulator SX-7 supercomputer, installed in 2003, has been an excellent facility for plasma physics simulations. However, progress in the development of supercomputers is very rapid (cf. the faster machine to be installed at Nagoya University in March), and therefore NIFS should begin thinking about a successor supercomputer in the near future.

The TADA web site has a page with directions for using an Athlon cluster. Does this imply that a cluster is also available at NIFS for theoretical computations?

The CompleXcope virtual reality facility was installed in 1997. The question arises whether this system is still up to date. Last year one paper on VR work was submitted for publication and one talk was given at an international workshop. For better exposure, the VR papers should be published also in English. In the most recent NIFS Annual Report (2003-2004), there are two reports about VR work, but neither has any recent references to NIFS publications. However, the report about using VR technology for three-dimensional medical tomography is potentially interesting. Is the VR facility actually being used to help design the FFHR LHD-type reactor?

(5) Is the responsibility as a COE in simulation research adequately fulfilled?

One recent measure of the excellence of the NIFS theory/simulation research is the fact that at the 2004 IAEA Fusion Energy Conference, arguably the most high-profile international meeting in fusion science, NIFS theorists were selected to present four oral papers and one poster paper. In addition, NIFS theorists were co-authors on another poster paper and also on the theory overview oral paper on zonal flow physics (which was the first-ever theory overview talk in the history of this series of conferences). NIFS can be very proud of having done so well with selections for invited theory papers at last year's IAEA conference.

Many of the members of the TCSC and TADA theory groups have "grown up" in their scientific careers entirely at NIFS. The Institute is to be commended for having nurtured and developed a very strong cadre of theoretical scientists. The theory/simulation effort at NIFS is well respected internationally.

Viewed together, the TCSC and TADA constitute the largest fusion plasma theory effort in Japan. The TCSC has 14 regular staff scientists, three post-docs, and 14 graduate students (according to their web site). The TADA Division has 12.5 regular scientists on staff, plus two post-docs and three graduate students. The publication of papers by the two groups is commensurate with their size. The list of publications for the TADA Division (included in the LHD publication list) showed that 27 papers were published last year (where I include also #2 on the LHD list). The list of publications for the TCSC showed that 53 papers either had been published or have been accepted for publication during 2004, with another 19 papers submitted to journals. Also, 21 papers were reported at international conferences and workshops (including the IAEA Conference). Presumably many more presentations were also given at meetings in Japan.

Also, the educational mission of NIFS is being fulfilled in the area of theory and simulations. In particular, the TCSC has a large number of graduate students (14). Note that TCSC and TADA have four international graduate students, which speaks well for the NIFS reputation of training in research. Last year, NIFS also held a theory Summer School (attended by 17 students) and the Toki Lectures on Simulation Science/Asian Winter School (attended by 21 students).

(6) Is the process for conducting coordinated researches in the simulation research proper?

The TCSC and TADA theory groups are actively involved in collaborative research. The collaborations, workshops, and joint research have been very productive; this can be seen from the international co-authorship on four of the five NIFS theory papers at the 2004 IAEA Conference. Last year, there were seven international visiting scientists (two from the USA and five from China) who worked at NIFS in theoretical research, in addition to five Japanese adjunct visiting scientists. Presumably some NIFS theorists also went to institutions in other countries as visiting scientists. The two theory groups at NIFS share responsibility for organizing the US-Japan Joint Institute for Fusion Theory, which arranges visiting professors, exchange visits, and workshops in both countries; I commend them for their excellent work.

The table in the Simulation research presentation indicated that large-scale simulation studies involve not only scientists from both the TCSC and TADA groups, but also theorists from other universities (except for the area of Periphery and Divertor). In the list of TADA publications, 22 of the 27 papers had co-authors from outside NIFS (including international co-authors), with the average number of outside co-authors being 2.7. In the list of TCSC publications, 25 of the 53 published papers had co-authors from outside NIFS (including international co-authors), with the average number of outside co-authors being 2.4. External co-authorship, therefore, is healthy.

Within the framework of the new combined National Institutes of Natural Sciences, NIFS has a real opportunity to conduct collaborative research with other NINS member institutes through its expertise in high-performance numerical simulations.

(7) Is the 2005 research plan drawn out properly?

The research proposed for 2005 appears to be mostly a continuation of existing research efforts. Although not much detail was given, I am confident that the proposed work is worth pursuing because of the quality of the prior research work.

In terms of new initiatives, I observed the following: the use of the two-fluid model for analyzing pressure-driven instabilities; simulation of non-perturbative energetic particle modes; use of the Earth Simulator computer and development of a Landau-Fluid code for transport simulations; and interfacing the open particle simulation code with an MHD code.

From the LHD experimental presentation it was clear that there are several very interesting observations that pose a challenge for theoretical understanding. Let me mention a few examples: the healing of magnetic islands in the plasma, spatial structure and time evolution of nonlinear pressure-driven MHD modes, power threshold for edge transport barrier, determination of the last closed flux surface, and zonal flow and the geodesic acoustic mode.

(8) Other comments (such as relation to ITER)

During the presentation on Simulation Research, no mention was made of any relationships to ITER. It would seem that at least some of the NIFS theoretical work—e.g., MHD stability, energetic particles, anomalous transport, and impurity transport—could contribute to ITER physics, perhaps through the ITPA process.

The TCSC and TADA web sites are fairly informative. Listing the names of post-doctorals and graduate students is commendable. It appears that both web sites need to be generally updated. The TCSC web site is easy to find, because it is listed on the NIFS home page; the TADA web site is not as easy to find initially.

In the NIFS organization chart (presented in the LHD experimental talk), it is noticeable that neither of the two theory groups has a deputy director. The appointment of such a person for each group would help offload some of the administrative burden from the two directors.

(Trivial comment: At future External Review Panel meetings, please alphabetize the lists of publications by first-author's name and eliminate duplicate listings.)

In conclusion, NIFS can be very proud of the outstanding theory/simulation research carried out by the TCSC and TADA groups. I highly commend this work.

シミュレーション研究に関する評価の観点

NAME: ジェームズ W. ヴァンダム

DATE:2005-02-25

(1) 平成16年度の達成目標に対する成果は得られたか

シミュレーション研究について、大変興味深い結果がプレゼンテーションで発表された。これらを受けて、今後の外部評価委員会を半日から1日に延長する事を提案したい。その上で、全研究をより深く広範囲にカバーできるよう、複数の理論シミュレーション研究についてプレゼンテーションできるとよい。

プレゼンテーションの場で発表された理論シミュレーション研究のレベルは総じて非常に高い。数々の結果を前にして、私自身は境界変調をとまなう MHD ヘリカル安定性に関する研究, ITG 異常輸送、および高エネルギー粒子現象に感銘を受けた。その他に理論研究の分野で素晴らしかったのは e/n-ITB 形成の電子ルートに関する新古典論予測、ローカルアイランドダイバータのストライクポイント分布シミュレーション、ペレットアブレーションに関する新モデル、そしてトロイダルプラズマのダスト輸送に関する理論であった。

(2) シミュレーション研究テーマの設定は適切か

理論シミュレーションセンター(TCSC)は核融合物理、自己組織化の科学、およびシミュレーション科学の三分野で構成されている。核融合物理には MHD 不安定性、高エネルギー粒子、異常および新古典的輸送、そしてダイバータ物理が含まれる。自己組織化の科学(self-organization science)とは基礎プラズマ過程に関するものであり、再結合、レーザープラズマ相互作用、流体力学、ダストプラズマ、および原子分子物理といったテーマが盛り込まれている。シミュレーション科学では高性能計算方法やバーチャリアリティを扱う。

理論データ解析部門(TADA)では、LHD や他の核融合プラズマ (TADA ウェブサイトの「研究トピック」を参照) に関する理論モデルの構築と適用を行っている。より詳しい内容に関しては、TADA 職員の個々のウェブサイト上より参照できる。そこでは安定性、加熱、コアプラズマ、輸送、平衡などを取り扱っている。これらは核融合に関する古典的分野であり、よって適切なものだと考える。けれど、『プラズマ加熱解析』に所属している TADA の研究者達は、実際には異常および新古典輸送に関する研究を行っており、同分野に所属しているのは誤りであるかもしれない。事実、理論研究に関する 2004 年度論文リストを見ている限り、プラズマ加熱解析に関する論文は一つも目にしていない。

TCSC および TADA の業務が近年統合され、二部門間 (両部門兼任職員も含む) で研究者の移動があった。シミュレーション研究に関するプレゼンテーションは素晴らしく、途中、理論グループ両部門からそれぞれ研究者が参加し、5-6つの研究分野を挙げて、いかに大規模なシミュレーション研究が計画されているのかを縦横の表で示されていて賞賛に値する。

外部評価委員会において、NIFS が何故二つの理論グループを有しているのか質問が挙がった。歴史的に言えば各グループの役割は異なっていた。TADA グループはヘリカルプラズマの振る舞いに関する理論的理解に注目し、LHD に特有な現象の予測および解釈 (つまりデータ解析) を行っている。この分野の実験に関する理論サポートは、TADA が LHD 研究系に属する部門であることから極めて理に適ったものである。他方、TCSC グループは NIFS 内で所謂独立的な立場を取っており、様々な科学的問題に取り組むことが可能であった。両部門は高度なシミュレーション技術を用いて取り組む共通テーマの下に統合された。近年、TADA と TCSC の核融合研究活動において近づきつつある。一般的に、複雑性の科学と TCSC ヴァーチャリアリティシミュレーション科学分野は、双方とも核融合科学からかなり離れている。しかしながら、これら二部門の理論分野の研究は、やがて NINS 機構内の他機関で行われる研究との橋渡しになるかもしれない。例えば原子分子過程がその一つに挙げられる。結論として、NIFS が 2 つの理論グループを持っている現状は、それぞれが互いに明確でかつ協調できていることから適切であると考えられる。

(3) シミュレーション研究の進め方は適切か

NIFS で開発されたシミュレーションコードの中には世界的な知名度を得たものもある。例をあげると乱流輸送用のジャイロキネティック-ヴラゾフコード、自己無撞着閉じ込め用 MEGA コード、そして三次元ヘリカル平衡用の HINT コードなどが挙げられる。新古典論輸送コードも非常に有益である。実用化される計算機の能力が高まるにつれ、大規模総合型シミュレーションコードの開発と発展は望み豊かな事業である。今後のシミュレーション研究について、以下の内容を推奨したい。それは、物理モデルの厳密なテストを行う為に、簡約化コードと解析理論を使って基盤となる物理メカニズムを集中的に分析することと相補的に行うことである。

実験観測との比較も理論研究の指針となるべきである。これは近年 NIFS で改善されているのだが、まだまだ善処の余地がある。2004 年度の LHD に関する論文リストにおいて、27 件の TADA 理論系論文のうち 2 件には、共同著者として実験家が執筆に加わった。92 件の LHD 実験論文のうち 9 件には、共同執筆者として理論研究者が加わった。去年発行された TCSC 論文に到っては、8 人の実験家が共同著者だった。LHD 研究プレゼンテーションが理論実験比較(PP38, 42, 43, 45, 47-48, 49, 54, and 55)を参照していた事には感銘を覚えた。加えてこのプレゼンテーションは、シミュレーション研究プレゼンテーションではカバーされていないが、実験的な関連をもつ理論結果(PP 71, 72, 75, 76, 77, and 78)を紹介していた。

理論、モデリング、そしてシミュレーションは定量的解釈を行うこと、及び精密な LHD 実験への指針を与えるにも非常に有益である。基礎的な理論・シミュレーション研究もひいては具体的な問題に適用でき得るだろう(例えば地球磁気テイルの再結合、あるいはラボでの再結合実験)。

また、(京都と NIFS から) LHD 実験グループにおいて二人のリーダーが理論研究者だったのは大変喜ばしい。

(4) シミュレーション手法の開発の進め方は適切か

NIFS シミュレーションは最新の技術を使用している。大規模コードは高度にベクトル並列処理を行うために並列化されており、静電粒子シミュレーションコード、ジャイロキネティック-ヴラゾフシミュレーションコード、完全粒子電磁シミュレーションコード、および Δ -f モンテカルロ輸送コードなどがある。非常に高いベクトル最適化効率が報告されている (98 %超)。

2003 年に導入されたプラズマシミュレータ SX-7 スーパーコンピュータはプラズマ物理シミュレーションを実行する上で素晴らしい設備である。しかしながら、スーパーコンピュータの技術進歩は非常に速く (事実、名古屋大学では三月により高速な機器が設置される予定)、NIFS も近い将来後続機器について考慮し始めるべきである。

TADA ウェブサイトには Athlon クラスターの使用方法が掲載されている。これは理論計算用に NIFS でもクラスターが利用可能なことを意味しているのか?

CompleXcope バーチャルリアリティ設備は 1997 年に導入された。このシステムが未だ時代に即した内容であるかは疑問とされるところである。昨年、出版用に投稿されたヴァーチャルリアリティ関連の論文は一件で、国際ワークショップの場で提供された話題も 1 件であった。より高い公然性を得る為に、ヴァーチャルリアリティ関連の英語版論文も発表されるべきだと考える。最新の NIFS 年間報告(2003-2004)において、ヴァーチャルリアリティ関連の報告は 2 件であった。しかし、いずれの論文も近年の NIFS 出版物には出典していない。とは言え三次元医用トモグラフィ(断層撮影法)を用いたヴァーチャルリアリティ技術に関する報告は、根本的に興味深い内容である。当のヴァーチャルリアリティ設備は FFHR LHD 型核融合炉の設計を補助する目的で、実際使用されているのだろうか?

(5) COEとしての役割を果たしているか

近年のNIFSにおける理論シミュレーション研究は傑出した内容である。

このことは、核融合科学分野の国際会議で最高の知名度を有する2004年度IAEA核融合エネルギー会議において、NIFS理論研究者の提出した研究報告のうち4件が口頭発表に、1件がポスター発表に選ばれたことから推測できる。加えてNIFS理論研究者は他のポスター発表用論文、そしてジャーナルフロー物理に関する総合報告用の口頭発表論文の共同著者となっている。(ちなみに総合報告の口頭発表は、同種の国際会議史上初めてである。) 昨年のIAEA会議における理論研究論文について、NIFSから多く採択されたことは誇るべきものだったといえる。

TCSCおよびTADAグループには「NIFSで育った」、つまりこれまでNIFSでのみ研究活動を行ってきた研究者が数多く在籍する。同機関は中核となる有能な理論学者の育成を委ねられている。NIFSにおける理論シミュレーション分野での尽力は世界的にも高く尊重されている。

TCSCとTADAを合わせて見た場合、日本国内で最大の核融合プラズマ理論研究に携わっている。同グループのウェブサイトによれば、TCSCは14名の常任研究者、3名の博士課程修了者、および14名の大学院生を有している。TADAグループには12.5名の常任研究者、2名の博士課程修了者、および3名の大学院生が在籍している。また、論文出版は両グループの規模に相応しい。LHD論文リストに含まれるTADAグループの論文リストを見ると、昨年は27本の論文が出版された(ここで私はLHDリストに#2を加えている)。対するTCSCグループの論文リストからは、53本の論文が出版されたか、もしくは2004年度中に出版が承認されている。これに加えて機関紙への投稿が19件、記録されている。また、21本の論文が(IAEA会議を含む)国際会議やワークショップの場で発表されている。この上に、日本国内で更に多くの論文が発表されたはずである。

また、NIFSの教育的任務も理論シミュレーション分野で履行されている。特にTCSCは14名という多数の大学院生を迎え入れている。TCSCとTADAには4名の外国人大学院生が在籍しており、彼らは総じてNIFSの指導に好意的な意見を寄せていることにも注目したい。昨年、NIFSは理論研究サマースクールを実施し、17名の学生が参加している。また、土岐シミュレーション科学講座/アジアウインタースクールには21名の学生が参加した。

(6) シミュレーション研究に関する共同研究の進め方は適切か

TCSCおよびTADA理論グループは共同研究に積極的に参加している。研究協力、ワークショップ、および共同研究は非常に意義のある内容であった。これは、2004年度IAEA学会で紹介された5件のNIFS理論研究論文のうち、4件が共同著作によるものである事からも理解できる。昨年は7名の外国人客員研究員(米国から2人、中国から5人)および5名の邦人実験助手の合計12名がNIFSで理論学研究に従事した。これを受けて、恐らくNIFSからも他国の研究機関へ客員研究員として派遣された理論研究者がいるものと推測できる。NIFSの二つの理論グループは日米核融合共同研究を組織する責任を共有しており、ともに客員教授、交換訪問、または両国でのワークショップ開催などをアレンジしている。これらに関し、彼らの業務内容は素晴らしいものであると考える。

シミュレーション研究発表で提示された表を参照する限り、大規模シミュレーション研究にはTCSCおよびTADAグループの研究者のみならず、他大学からの理論研究者(周辺およびダイバータ分野は除く)も関わっている。TADA論文リストを見ると、27論文のうち22が外部研究機関(国際共同著書を含む)に在籍する研究者との共同著書であり、共同著者の外部研究機関比率は平均で2.7人となる。TCSC論文リストでは53論文のうち25件がNIFS外部機関研究者との共同著書となっており(外国人共同研究著者も含む)、共同著者の外部研究機関比率は平均で2.4人となる。よって外部共同著書の割合は適切であると言える。

新規に統合された自然科学研究機構の枠組みにおいて、NIFSには高性能数値シミュレーション技術を通して他のNINS研究機関と共同研究を実施する機会が与えられた。

(7) 今後の研究計画は適切か

2005 年度研究計画について、ほとんどが既存の研究活動を延長継続しているように見受けられる。詳細があまり記載されていなかったが、提案された業務はこれまでの研究活動のレベルを見ている限り、追求する価値のあるものだと確信している。

新規計画としては、圧力駆動型不安定性の解析に用いる二流体モデルの使用、非摂動型高エネルギー粒子モード、地球シミュレータコンピュータの使用と輸送シミュレーション用ランダウ流体コードの開発、そして MHD コードと開放型粒子シミュレーションコードの結合に注目している。

LHD 実験報告から、理論解析への挑戦を提起した興味深い観測結果がいくつも見られた。例を挙げてみると、プラズマ中の磁気アイランドの修復、非線形圧力駆動型 MHD モードの空間構造と時間発展、プラズマ周辺での輸送障壁に対する加熱パワー閾値、最外殻磁気面の決定、および帯状流（ゾーナルフロー）と測地的音響モードなどである。

(8) その他

シミュレーション研究発表中、ITER への関連性が全く示唆されていなかった。NIFS 理論研究にも MHD 安定性、高エネルギー粒子、異常輸送、不純物輸送など、例えば ITPA (国際トカマク物理活動) を通じて ITER 物理に貢献できるものもあるのではないかと思う。

TCSC および TADA のウェブサイトは非常に情報豊かな内容になっている。博士課程修了者と大学院生の氏名を紹介しているのが素晴らしい。が、両サイトとも定期的な更新が必要であろう。TCSC ウェブサイトは NIFS トップページから紹介されていることもあり、発見しやすくてよい。TADA ウェブサイトの URL は最初見つけるのが難しい。

NIFS 組織図 (LHD 実験報告で提示されていたもの) を見ていると、両理論グループに副長がないという事に気がついた。副長を任命することにより、両グループ部門長にかかる管理責任も軽減されると考える。

(その他：今後の外部評価委員会において、第一著者の氏名で出典をアルファベット順に並べ、重複した題名は削除してほしい)

結論として、TCSC および TADA グループによる理論シミュレーション研究は傑出しており、NIFS にとって誇れるべき内容である。これらの研究を総じて高く評価する。

大型ヘリカル装置（LHD）の研究成果
平成 16 年度

核融合科学研究所

目 次

1	概要	3
1.1	はじめに	3
1.2	大型ヘリカル装置計画における重点研究課題	3
1.3	基調となる背景	4
1.3.1	運営協議会将来計画検討小委員会報告 「核融合科学研究所将来計画について」	4
1.3.2	科学技術・学術審議会／核融合ワーキング・グループ報告	6
1.3.3	中期目標・中期計画	6
1.4	平成16年度LHD実験研究計画	7
1.5	支援研究、基礎研究および産業応用について	8
	1) CHSを用いた支援研究	
	2) 基礎プラズマ研究	
	3) ヘリカル炉設計研究	
	4) 産業応用など	
2	研究実施体制の改革	10
2.1	大型ヘリカル研究部の改組	10
2.2	共同研究カテゴリー別の役割	10
	1) 一般共同研究	
	2) LHD計画共同研究	
	3) 双方向型共同研究	
2.3	共同研究実施体制	13
	1) LHD実験実施の流れ	
	2) 平成16年度の実験テーマ枠設定とグループ体制	
3	平成16年度の研究成果	17
3.1	大型ヘリカル装置(LHD)実験	17
3.1.1	平成16年度第8サイクル実験経過	17
3.1.2	平成16年度の重点課題から	20
	1) イオンサイクロトロン共鳴加熱による定常プラズマ保持	
	2) 周辺プラズマ制御による閉じ込め改善の試み	
	3) プラズマ分布計測性能の向上	
3.1.3	プラズマ物理実験研究からの成果	28
	1) 高密度	
	2) 粒子・不純物輸送	
	3) 高 β	

4)	磁場平衡配位の MHD・閉じ込めへの影響	
5)	低磁場実験	
6)	高電子温度	
7)	波動加熱物理	
8)	高イオン温度	
9)	電場と輸送障壁	
10)	高エネルギー粒子閉じ込め	
3. 1. 4	装置工学実験研究からの成果	4 1
1)	LHD 超伝導コイルの健全性確認	
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 機械的擾乱の診断	
3)	LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定	
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	
5)	超伝導コイル電源の電流制御	
6)	バランス電圧測定によるコイル位置精度評価	
7)	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	
8)	まとめ	
3. 1. 5	今後の計画に向けた準備研究	4 8
1)	LHD ヘリカルコイルの過冷却改造計画	
2)	低エネルギー中性粒子ビームによる加熱・計測計画	
3. 2	CHS 実験	5 0
3. 3	理論・データ解析研究	5 4
1)	はじめに	
2)	16年度の研究成果	
3. 4	基礎プラズマ実験	6 3
1)	研究の目的	
2)	平成16年度の成果	
3. 5	ヘリカル炉設計研究	6 5
1)	研究の目的	
2)	研究の特徴	
3)	平成16年度の成果	
3. 6	産業応用など	6 7
1)	はじめに	
2)	産学官連携研究の経緯	
3)	平成16年度の成果	
3. 7	ITER 連携	6 9
4	まとめと次年度計画	7 2

1 概要

1. 1 はじめに

大型ヘリカル装置（以下「LHD」という）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、計画がスタートした。

LHD計画では、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いる。

大学共同利用機関法人である核融合科学研究所において推進されているLHD計画は、これまで全国の大学等の研究者の積極的な参加を得て研究活動が進められてきた。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などを目標に学術研究を進めることが必要であると位置づけられている。これには大学共同利用機関法人として共同研究の一層の充実が必要不可欠である。研究機会を増やす施策として、共同研究は核融合科学研究所共同研究（一般共同研究）、LHD計画共同研究、双方向型共同研究の3つのカテゴリーへ拡大させた。

本報告書は、LHDを中心とした大型ヘリカル研究部が全国の大学等の研究者と共同で進めてきた平成16年度研究の成果についてまとめたものである。LHDが持つ物理（ヘリオトロン磁場配位）と装置工学（大型超伝導コイル）の両面の特長が、高温プラズマの定常保持に大きな伸長を図った16年度の実験によって実証された。LHDの定常性に優れた能力は、安定して短い間隔でのプラズマ実験をも可能としており、実験開始以来、今年度までの7年間で5万回を超えるプラズマ放電を実施し、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いる。

1. 2 大型ヘリカル装置計画における重点研究課題

LHDの設計時に課された重点研究課題の骨子は実験開始後7年を経て、研究の進展がはかられた今も、成果の評価を行うに当たって基本とすべきものである。

ヘリカル型方式は閉じ込め磁場を外部コイルで形成するもので、他に比べ定常運転に優れた方式と言われている。そこで、LHD実験において、以下のような重点研究課題を研究、開発することにより、この方式による定常核融合プラズマの閉じ込めが可能であることを実証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%以上の高い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、炉心プラズマでの 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。

1. 3 基調となる背景

1. 3. 1 運営協議会将来計画検討小委員会報告「核融合科学研究所将来計画について」

核融合科学研究所の将来計画について検討するため、平成 14 年度に核融合科学研究所運営協議会の下に、将来計画検討小委員会が設置された。その報告が平成 15 年 2 月 5 日の第 60 回核融合科学研究所運営協議会で承認された。ここに LHD に関連する部分を抜粋して記述する。(全文は <http://www.nifs.ac.jp/committee/ACRM/future-plan2/f-report60.html>)

1) 概要

○トロイダルプラズマの高性能化と閉じ込め特性の総合的解明に向けて、炉心プラズマに外挿できる所期の目標のプラズマパラメータ領域におけるヘリカル方式プラズマの物性ならびにトカマクとの異同を体系的に理解する。これによって、理想的な核融合炉心プラズマの実現に向けた精度の高い科学的予言力を獲得する。その遂行にあたっては、LHD 及び CHS 等これに必要な装置を用いた研究を、大学等との共同研究で進める。その際、

(1) ITER への寄与と関連、及びトカマクとの双方向的な共同研究の重視、

(2) 新しい閉じ込め磁場配位に基づく国内外の装置との連携、
にも留意しつつ学術研究を行う。

○ 核融合研究の新規展開と学術基盤の発展のためにレーザー核融合との連携協力を行う。

これらの研究の遂行にあたってはコミュニティの研究者の参画を得て、課題の精査を行い、具体的実験計画を立案し、連携・共同研究により推進する。また、実験データの公開を一層進めるとともに、広く利用出来る実験データベースを構築する。

2) LHD の中期的課題

現在までの実験成果および現時点で整備されている研究基盤を活用、改良し、中期計画として以下のテーマ等について研究を行う。開ヘリカルダイバータのもとで先に 1. 2 で述べた (1) から (5) の課題についてトカマクと同等の性能の達成を目指す。

(1) 加熱・計測の充実による高精度閉じ込め研究

プラズマ加熱機器の改良等によりプラズマ性能の充実を図り、炉心プラズマに外挿できる所期の目標であるプラズマパラメータ領域において以下の研究を進める。

・電場等の制御により輸送障壁を実現する。トカマクとの異同を調べることによりトロイダルプラズマの輸送における径電場の役割を明らかにする。また、磁気島生成と消滅のプラズマパラメータ依存性を明らかにすると共に、外部摂動磁場等による制御を行う。

・磁場配位の実時間制御を可能にするシステムを構築するなどして高 β プラズマを実現し、その MHD 安定性を明らかにする。これらの研究は、新古典テアリングモード、抵抗性壁モード等と強い関連があり、ITER の実験計画に対するヘリカルプラズマからの重要な寄与となる。

・各種加熱法により生成された高エネルギーイオンの閉じ込め機構の解明を行い、軌道損失の改善の方策を探る。

・ITER の先進計測をも視野に入れた高性能計測法の開発を行う。

上述の観点において、各種ヘリカル系並びにトカマク等の磁場配位の相違（正／負の磁気シア、磁気井戸／磁気丘）に注目した総合研究を行うことにより、トロイダルプラズマの総合的な理解

を図る。

(2) 開ヘリカルダイバータ特性の研究と定常化実験

(1)の研究を通じて得られた高性能ヘリカルプラズマの定常保持を試みる。中性粒子制御と閉じ込めへの影響及び、広いエルゴディック領域を通過してダイバータ板に達する熱・粒子束の輸送とダイバータ部での熱粒子制御の観点から、開ダイバータ配位（局所アイランドダイバータを含む）を用いた研究から始め、同時に、将来の閉ダイバータ配位化のためのデータを収集するなど段階的に進める。熱・粒子制御などについて、LHD/CHS、Heliotron J、トカマク等の磁場配位の相違を考慮し相補的な研究を行う。将来の W7-X のアイランドダイバータ実験との対比を行えるようデータベースの充実を図る。

3) 運営協議員会中期方策検討ワーキンググループ報告「LHD および CHS 実験研究について」

上記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中期方策検討ワーキンググループが設置され、実行されるべき具体案を報告している。この報告が平成 15 年 3 月 10 日の第 61 回核融合科学研究所運営協議員会で承認された。ここに LHD に関連する部分を以下に抜粋して記述する。（全文は <http://www.nifs.ac.jp/committee/ACRM/future-plan2/f-report61.html>）

LHD 実験で今後明らかにすべき最も重要な課題は、炉に必要な高ベータ領域（交換型 MHD 不安定性が線形不安定な領域）において、無次元量（ベータおよび衝突頻度）が炉心プラズマと同等のプラズマがこれまで通り ISS95 比例側を十分上回る高閉じ込め性能を維持できるか、また、密度に関する良好な閉じ込め特性が炉心プラズマと同程度に高い密度領域まで維持できるかということである。即ち、中期計画第一期において軽水素及び開いたダイバータの条件下で取り組むべき目標は次の 2 つである。

(1) 高ベータプラズマ(平均ベータ 5%程度)で、高閉じ込め性能 (ISS95 比例側の 1.5 倍程度)の実現。

(2) 平均密度 $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ 以上の高密度での Sudo スケーリングを越える密度限界値の達成と平均密度 $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ 程度の高密度、低衝突領域 ($\langle v^{**} \rangle < 1$) での高閉じ込め性能 (ISS95 比例側の 1.5 倍程度)の実現。

このためには、これまで通り、メルシエ不安定領域においても不安定性による閉じ込めの劣化が回避され、かつ、プラズマ周辺部での MHD 安定性を確保するとともに、無衝突領域においても良好な新古典輸送特性と高エネルギー粒子高閉じ込め特性が実現される必要がある。

(1) の課題は圧力駆動型 MHD 不安定性が運転領域にどのような制限を与えるかという観点から、(2) の課題は、外部磁場装置における密度限界の決定機構の解明という観点から、トラスプラズマを総合的に理解するために重要であり、ITER の運転領域設定とも関連性が深いと考えられる。

核融合科学研究所が LHD を建設し、世界のヘリカル型装置による核融合研究を先導したことと、これまでに LHD、CHS で達成した研究成果は高く評価できるが、実験成果のチェック&レビューを早急に行うべきである。LHD での実験は、開始以来 5 年（注：平成 15 年現在）でまだ実験すべき多くの課題が残されている。LHD で行う主な実験をするためには、更に 10 年程度は必要と判断される。その間になすべき研究は、LHD が目標とするヘリカル型核融合炉を目指した学術研究であり、トカマク型装置との対比は常に意識されるべきである。核融合科学研究所の研究を一

層発展させるためには、新たな経費の注入が求められるであろうが、現在の核融合研究をとりまく状況は、新たな予算の獲得が容易ではなくなっている。研究は、常にチェックアンドレビューを厳しく行いながら進め、経費を最大限に有効に活用することが求められている。更に、コミュニティ全体との連携協力を密にしながら進めることも求められている。

1. 3. 2 科学技術・学術審議会/核融合ワーキング・グループ報告

平成13年度より学術を中心とした核融合科学の将来の在り方を検討するために科学技術・学術審議会、学術分科会、基本問題特別委員会のもとに、核融合研究ワーキンググループが設けられ、最終報告が平成15年1月8日になされた。ここにLHDに関連する部分を抜粋して記述する。(全文はhttp://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/030302.htm)

核融合エネルギーの実現を目指す核融合研究を

- ・ ITER との有機的連携を図りつつ推進すべき核融合炉を目指した開発研究
- ・ 学理の探求に基づく当該研究分野の学問的体系化を目指す学術研究

という2つの側面を併せ持つ総合的な研究として捉え、国の定める核融合研究開発基本計画と整合性を取りつつ展開することが必要である。

その結果、重点化すべき課題は、トカマク、炉工学、レーザー分野に絞り込まれ、これに既存の研究計画の研究評価の結果からヘリカル(LHD)を加えて、4つの重点化の柱が策定された。これらの重点化計画を推進する場合、大学共同利用機関である核融合科学研究所において推進されているLHD計画が、当該分野の学術研究の発展に果たす重要な役割にも注目しなければならない。LHDは、我が国で発案されたヘリオトロン磁場配位を採用することにより、無電流環状プラズマによる核融合炉を目指して造られた磁場閉じ込め装置である。LHDを共同研究重点化装置として活用することによって、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て進めることが必要である。

LHDについては、現有資源として高性能プラズマの生成による環状プラズマの普遍的性質の探求を進めITERを含む環状プラズマへの学問的寄与を明確にするという所期の目的達成のために研究を継続する必要がある。

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。

LHDの一層の活用のためには、LHDの研究計画を立案するシステムの工夫、共同研究委員会の機能改革等、共同研究の推進機能を強化する方策を検討することが必要である。また、炉心プラズマに外挿可能な無電流プラズマ装置としての特徴を生かした環状プラズマの閉じ込め改善、定常プラズマ実験等の分野で、トカマク計画との連携を強める必要がある。

1. 3. 3 中期目標・中期計画

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、核融合科学研究所は他の4つの機関(国立天文台、基礎生物学研究所、生理学研究所、分子科学研究所)と大学共同利用機関法人自然科学研究機構を構成することになった。文部科学省が設定した中期目標に沿って、法

人が中期計画を定めて活動することが求められる。核融合科学研究所の中期計画は、先に述べた運営協議委員会将来計画検討小委員会報告「核融合科学研究所将来計画について」、運営協議委員会中期方策検討ワーキンググループ報告「LHD および CHS 実験研究について」及び科学技術・学術審議会/核融合ワーキング・グループ報告を元に作成された。自然科学研究機構の中期目標および中期計画は以下のホームページに記載されている。

http://www.nins.jp/kanren_hourei/tmokuhyo.pdf

http://www.nins.jp/kanren_hourei/tkeikaku.pdf

このうち、LHD に関わる中期計画の記述は以下の通りである。

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。

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。

1. 4 平成 16 年度 LHD 実験研究計画

LHD は実験開始後 7 年を経て、付帯する設備が順次、整備され、多くの共同研究に供されている。年度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、1. 3 で述べた目標を志向するプログラムのアプローチと整合した研究計画の策定が必要である。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」に代表される、前節に要約された LHD に課せられた研究目標を十分鑑み、平成 16 年度の LHD 実験研究計画の骨子を以下とした。

LHD の性能を最大限に発揮させるため、今年度は特に次の事項を中心に研究を進める。

(1) LHD にイオンサイクロトロン共鳴加熱用アンテナを設置する。これにより、入力加熱パワーがメガワット級で放電持続時間が数分台の長時間放電を目指し、関連する学術研究を行う。

(2) 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周辺プラズマの基礎データの取得に努める。

(3) プラズマ制御法を工夫し、LHD プラズマの高性能化を目指す。

自然科学研究機構全体の年度計画については、ホームページ http://www.nins.jp/kanren_hourei/04keikaku.pdf に記載されている。

平成 16 年度の実験（第 8 サイクル）は平成 17 年 1 月 20 日に終了したが、そこでは、上記の計画に対して、以下の結果が得られた。

（1）LHD にイオンサイクロトロン共鳴加熱用アンテナを設置し、入力加熱パワーがメガワット級の放電持続実験を行った。1 MW で 2 分間放電を維持してプラズマと壁との相互作用等の学術研究を行い、平成 16 年度の目標を達成した。更に、入力加熱パワーが約 0.7 MW のプラズマを 31 分 45 秒生成することに成功した。入力エネルギーは 1.3 GJ に達した。

（2）トムソン散乱計測装置などを整備し、プラズマの詳細な密度分布を得ることができた。特に、プラズマの高性能化に必要な周辺プラズマの密度分布が取得可能となり、周辺プラズマを制御することによってプラズマの閉じ込め改善を図る研究に寄与することができた。

（3）ローカルアイランドダイバータを用いて周辺プラズマの制御研究を行い、ヘリカル型の装置としては始めて能動的に周辺プラズマを制御することに成功した。平成 17 年度も引き続き、プラズマ制御法を工夫して LHD プラズマの高性能化を目指す研究を行う。

1. 5 支援研究、基礎研究および産業応用について

1) CHS を用いた支援研究

CHS 実験は、LHD 実験の進展を支援するものとして、特に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いる。プラズマの計測設備においては、世界的にも唯一の特徴である二台の重イオン・ビーム・プローブを用いて、プラズマ中の揺動スペクトルの測定とその長距離相関を精密に測定し、プラズマの乱流輸送の最近の議論の中心とも言える帯状流 (Zonal Flow) の存在を実験的に証明することができた。この帯状流の研究は、ITER の閉じ込め性能に関する議論においても重要な課題と認識されており、ヘリカル系閉じ込め研究に限定されない、トカマクをも包含したトラス閉じ込め研究全体に対して大きなインパクトを与えたものと言える。また閉じ込め改善の研究においては、境界部輸送障壁の研究を中心とした進展が図られている。特に境界部での密度勾配の上昇 (Hモードとしての閉じ込め改善) と同時に、中心部での電子温度の上昇が観測されており、境界部と内部とで同時に輸送改善が得られたことは、今後のヘリカル系閉じ込め研究に新しい方向性を与えるものと言える。さらにプラズマの基本性能を高める努力としては、CHS 装置のプラズマエネルギーの最高値を平成 16 年度に更新し、また 106 GHz のジャイロトロンを用いて、高密度での高温プラズマの生成も実現した。

2) 基礎プラズマ研究

プラズマ基礎研究として、プラズマ中の粒子・運動量輸送を理解するため、プラズマの動的振る舞いに関する研究を行っており、有限粘性プラズマにおける自己組織化流れの発生と渦形成に関する詳細な実験を実施している。実験は直線型磁化プラズマ発生装置 HYPER-I を用いて行っている。同装置は 2.45 GHz の高周波を用いた大口径・高密度プラズマ生成を特徴としており、磁場配位の簡単さや測定機器のアクセスの良さを利用して、共同実験や大学院生教育など複数の実験が同時進行している。2次元ポテンシャル計測を可能とし、時間発展や外部からの能動的制御実験など詳細なデータを蓄積して、粘性渦と流れ構造形成の全体像に迫りつつある。また、広範囲に及ぶプラズマ基礎研究のネットワークのハブとして、「プラズマ科学のフロンティア研究会」を主催し、3日間にわたり 91名の参加を得た。

3) ヘリカル炉設計研究

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。今年度は、これまでの FFHR2 の炉サイズを増やし、閉じ込め磁場を下げ、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 および FFHR2m2 の設計を実施した。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イクスルーが十分に可能であることが分かった。また、熔融塩 Flibe ブランケットについ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、核的特性および熱構造解析を実施した。

4) 産業応用など

核融合研究で培われた高度な科学的知識および技術成果を社会へ還元することを目的として、平成 16 年度より発足させた連携研究推進センターが中心となって実用化を目指す研究開発を産業界と共同で進めている。特に、プラズマのエネルギー閉じこめの基礎知識と大電力マイクロ波技術を基礎とし、等温断熱式マイクロ波炉を発案した。陶磁器およびファインセラミックスの焼成など、窯業プロセスを従来のエネルギー多消費型から環境負荷低減型へ転換し、省エネルギー化、低コスト化、高付加価値化を目指す研究開発を行っている。平成 16 年度には世界初のマイクロ波連続炉を試作開発した。

2 研究実施体制の改革

2. 1 大型ヘリカル研究部の改組

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、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である。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）」に対応できる組織でなければならない。これらの要件に含まれるが、大型ヘリカル研究部は、特に、従来の建設期の組織を実験に対応した組織に改組する必要があった。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（以下「研究所」という。）の組織」について検討するため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を誕生させた。具体的には研究系体制を、これまでの担当ハードウェアに応じた構成から、実験テーマに則したものとし、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研究系とした。新組織では、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 共同研究カテゴリー別の役割

平成16年度から双方向型共同研究を実施した。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炉心理工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、これまで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することとした。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ると考えている。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、この新しい共同研究体制は核融合研究の一層の進展に役立つものと期待している。図2.2-1に3つの共同研究カテゴ

リーの機能を示す。

1) 一般共同研究

LHD 実験計画に関わり、一般共同研究が広く公募されている。大きな研究課題枠は実験に関わる共同研究として(1-1) 閉じ込め改善とプラズマ周辺制御、(1-2) コアプラズマの輸送と MHD 特性、(1-3) 高周波加熱物理と定常プラズマ維持、(1-4) 粒子ビーム加熱プラズマの高性能化、(1-5) 装置工学実験の5つがあり、さらに中期的な課題を達成するための方策を実現するための共同研究課題枠として(2-1) 本体システム物理・技術、(2-2) 超伝導技術、(2-3) 高周波加熱技術、(2-4) 高エネルギービーム技術、(2-5) 計測技術がある。これらに加えて(3) 理論共同研究も LHD 共同研究にとって極めて重要である。

LHD 実験では平成 14 年度の第 6 サイクルからテーマ制を導入した。テーマ制を採用したことにより、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なりつつあると考えている。これに伴い、本カテゴリーに申請する場合に以下のことが必要となった。

(1) 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。

(2) 申請時に記載して頂く LHD 実験の提案内容は、LHD 実験で実行可能なものに限られる。計測機器、マシンタイム、実験条件等によっては実行できない場合があるので、特に新規の場合、申請前に所内世話人と公募の担当者が十分相談にのることとした。共同研究委員会で採択の可否を決定する前に、LHD 実験会議で申請書を検討し、コメントを記載することとした。

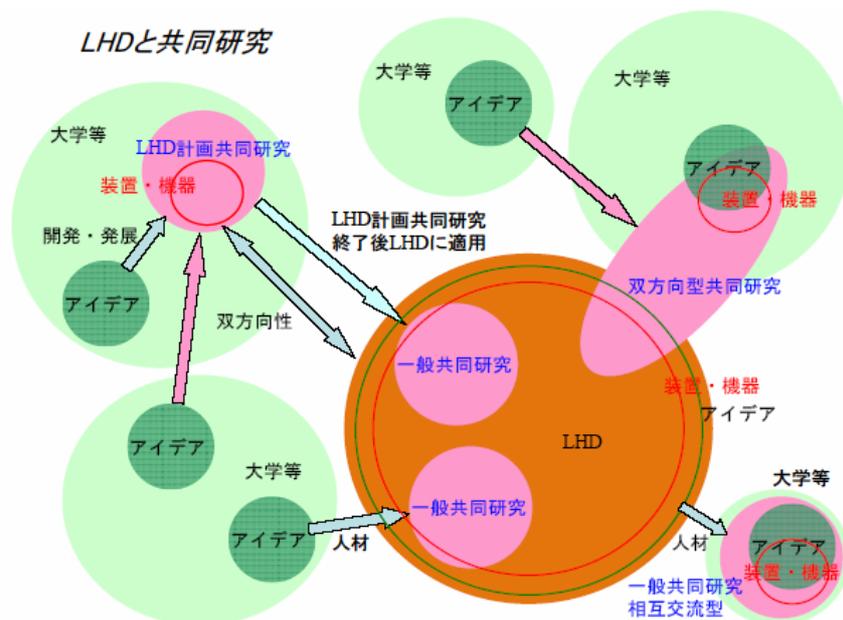


図 2.2-1 3つの共同研究の役割

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目的に、これらを LHD 実験に適用・集約するために必要な研究を大学等で実施するための共同研究であり、平成 8 年度から実施されている。従って、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 計画共同研究の成果を基に LHD で実験を行って、あるいは LHD に適用すること

が原則である。現在は、LHD 計画共同研究の研究課題として、例えば、LHD 計画を推進する上で将来 LHD タイプの炉が成立するかどうかの問題等、LHD の実験や運転以外のところでも LHD 計画推進の活動・研究を行う必要があり、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する方向に向かっている。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することにし、さらに広く、LHD 計画の推進に貢献できる研究課題が応募されるものと期待される。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る。

3) 双方向型共同研究

これからの核融合研究の発展に向けて、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各大学が研究課題を分担することが求められている。この際、個々に研究の目標を定めるのではなく、核融合科学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・自律性にに基づき各大学と分担、連携して進めることが求められている。その結果、共同研究の枠組みの中で各大学に必要な研究者を派遣することが可能になるなど、全体としてバランス良く研究が進展することができる。そのため、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。具体的には、筑波大学に於ける電位形成のプラズマ閉じ込めに及ぼす研究、京都大学に於ける磁場分布制御による輸送・安定性研究、大阪大学に於けるレーザーによる高速点火研究、九州大学に於ける定常運転研究、という 4 つの重要研究課題である。この双方向型共同研究により、プラズマの高性能化に必要となる物理を解明するため、本研究所や大学・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、平成 16 年度は 2 回開催された。双方向型共同研究委員会は、双方向型共同研究に公募、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機能を持っており、平成 16 年度はこれらの機能が十分に果たされた。双方向型共同研究として、43 件の研究課題を採択している。特に、研究の企画に関連して、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炉心理工学研究センターのトライアム 1 M 計画を終了し、新装置、「プラズマ境界力学実験装置」の建設を検討するため、双方向型共同研究委員会の下に「九州大学プラズマ境界力学実験装置検討会」を設置した。検討会は 4 回開かれ、双方向型共同研究委員会に検討結果の報告書を提出した。双方向型共同研究委員会では、この報告書を受けて議論、検討し、「プラズマ境界力学実験装置」の建設を推進すべきであるとの結論に至った。即ち、九州大学の新装置及び我が国にある既設の同型の小型装置を用いた研究を、核融合科学研究所を中心とした双方向型共同研究の枠組みの下で密接な連携を図りつつ推進し、我が国の大学・国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。

2. 3 共同研究実施体制

1) LHD 実験実施の流れ

LHD の実験の実施計画は 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、メンバーは図 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、理論・シミュレーション研究センター長、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。

実験計画実施の流れを図 2.3-2 に示す。共同研究として申請されたものと合わせて、年度始めにその年の実験テーマを募集し、それによって次節で述べるが、実験テーマ枠の見直し、テーマの採択と割り振り、リーダーの決定などを行う。テーマ枠リーダーはサブリーダーと協力して、そのテーマ枠内の実験テーマを勘案し、実験計画を立てる。これらの実験計画を集め、LHD 実験会議における全体的な整合性と合理性を勘案した調整作業によって年間実験スケジュールを策定する。実験実施については担当実験責任者（主幹と主幹代理）が当日の安全や緊急対応を含めた責任を持ち、テーマ枠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実験研究の遂行に当たる。通常、実験責任者は 9 時から 18 時 45 分までの 1 日の実験日を通して担当し、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行かない場合は LHD 実験会議において所期の目標に照らし合わせてもっとも生産的になるよう変更調整を行う。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。

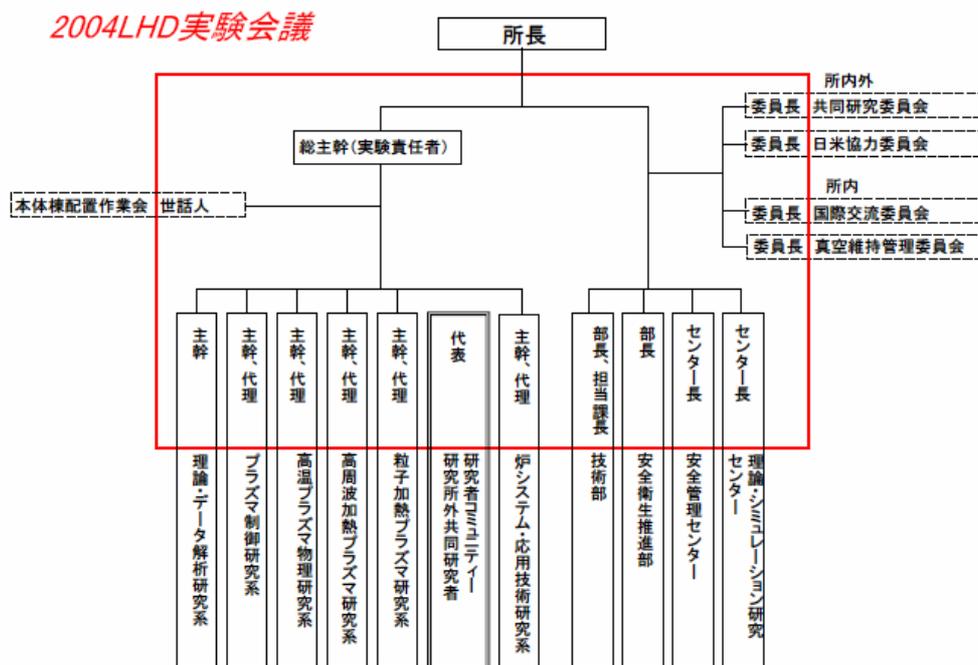


図 2.3-1 LHD 実験会議の構成

実験実施スケジュール

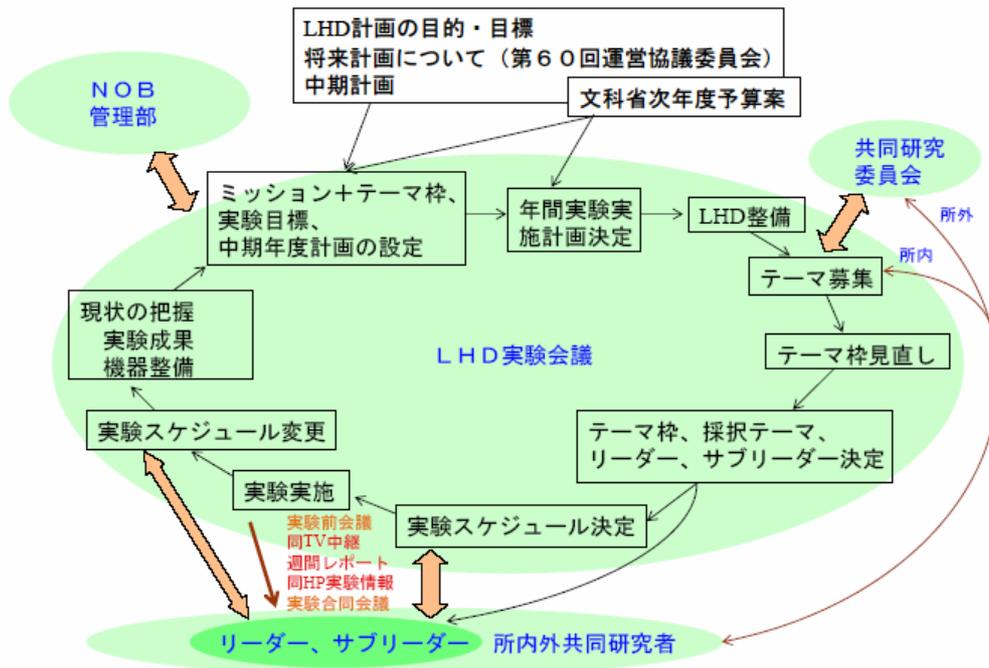


図 2.3-2 実験計画の流れ

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、所内所外、国内国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 1 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、機器設置等については、必要とするかなり前から、所内世話人に相談すると共に、技術部と技術的な打合せをするよう求めている。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」を用意していると同時に、種々の手続きは 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、通常そのように行われている。

現地での実験参加による共同研究の遂行への対応に加えて、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。SUPER 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、SUPER 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ラ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。

実験実施の流れ

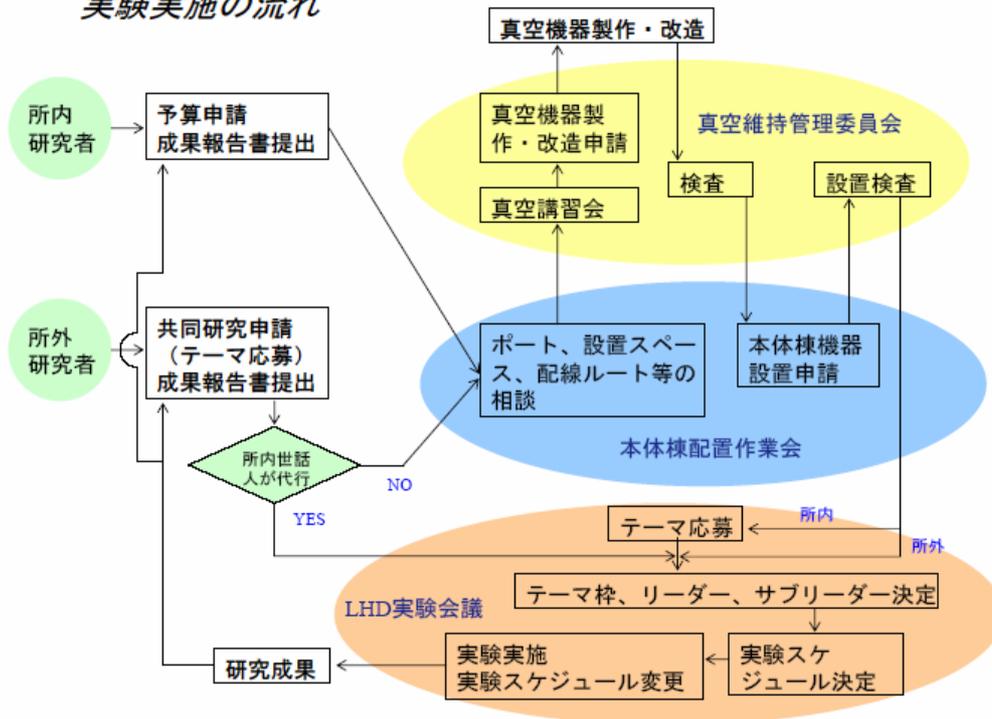


図 2.3-3 実験実施の流れ

2) 平成 16 年度の実験テーマ枠設定とグループ体制

LHD 実験では平成 14 年度の第 6 サイクルからテーマ制を導入し、2 サイクル毎に見直しをすることとしている。平成 16 年度からは、LHD のミッションを、責任を持って達成するため、テーマ+ミッション制を實際上採用しており、今後も続けていく予定である。第 6 及び第 7 サイクルの実験テーマは 18 のテーマ枠に分類されていたが、平成 16 年度の第 8 サイクルでは、実験の効率化に配慮して 13 のテーマ枠に再編した。また、テーマ枠の再編に伴って、テーマリーダーとサブリーダーも殆ど全員代わっている。平成 16 年度は、13 のテーマ枠のうち、所外からリーダー、サブリーダーにそれぞれ 4 名が就任している。13 のテーマ枠の内、4 つのプラズマ実験系に各々 3 つのテーマ枠が、炉システム・応用技術研究系に 1 つのテーマ枠が配分されており、特にミッション色の強い研究はその研究系が主体となって取り組むが、各テーマ枠への参加についての垣根はなく、研究者の発想に基づいて組織横断的に参加できる。実験テーマの申請総数は 216 件であり、そのうち所外からの申請は 34 件である。所内研究者の多くは複数の実験テーマを申請しているため、実効的な所外からの寄与は全体の 30%程度に当たる。平成 16 年度の実験テーマ枠とグループ体制を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 平成 16 年度実験テーマ枠とグループ体制

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	大藪修義 長山好夫	高密度	宮沢順一	田中謙治		18(2)
		粒子制御と閉じ 込め改善	森崎友宏	竹永秀信 (原研)	坂本隆一	32(11)
		粒子・不純物輸送	増崎貴	庄司主		24(3)
高温プラズマ 物理	川端一男 山田弘司	高 β	榊原悟	大館暁		10
		磁場平衡配位の MHD・閉じ込めへ の影響	諫山明彦 (原研)	渡邊清政	成嶋吉朗	31(7)
		低磁場実験	稲垣滋	舟場久芳		5
高周波加熱 プラズマ	大久保邦三 武藤敬	高電子温度	久保伸	吉村泰夫		5
		定常	武藤敬	坂本瑞樹 (九大)	中村幸男	20(1)
		波動加熱物理	長崎百伸 (京大)	下妻隆	関哲夫	19(4)
粒子加熱 プラズマ	金子修 居田克己	高イオン温度	池田勝則	森田繁		14
		電場と輸送障壁	石井亀男 (筑波大)	横山雅之	吉沼幹朗	14(1)
		高エネルギー 粒子閉じ込め	笹尾真美子 (東北大)	村上定義 (京大)	長壁正樹	12(2)
炉システム 応用技術	三戸利行 今川信作	装置工学実験	高畑一也	伊瀬敏史 (阪大)	力石浩孝	12(3)

3 平成 16 年度の研究成果

大型ヘリカル装置実験を中心に、大型ヘリカル研究部と共同研究者が行った、平成 16 年度の研究成果について述べる。特に所外共同研究者の貢献によるところは青字で表示し、名前をあげさせていただいた。全ての共同研究を網羅した内容には紙面の都合上、なっていないことをお詫びするとともに、ご参画いただいた全ての共同研究者に御礼申し上げます。

3. 1 大型ヘリカル装置 (LHD) 実験

3. 1. 1 平成 16 年度第 8 サイクル実験経過

LHD は例年、大略として年度上半期を機器の保守や改造に当て、下半期においてプラズマ物理および装置工学実験のための運転を行っている。この運転キャンペーンをサイクルと呼んでおり、平成 16 年度は第 8 サイクルとなる。

第 8 サイクルは平成 16 年 7 月 26 日の真空排気から始まり、8 月 11 日からの約 1 ヶ月の超伝導コイルの冷却と、それと平行したグロー放電洗浄による壁コンディショニング (九州大学: 吉田直亮教授)、冷却完了後の励磁試験を経て、9 月 17 日から翌平成 17 年 1 月 20 日までプラズマ実験が実施された。第 8 サイクルにおける運転は順調に進み、2 月 18 日には室温までの加温が終了した。図 3.1.1-1 に実験運転の経過をガントチャートで示す。

プラズマ実験は 17 週間、57 日にわたって行われ、この間 7398 回のプラズマ放電を実施した。通常、3 分に 1 回、プラズマ放電を行っており、この高繰り返しを可能とする能力は定常性と直結している。大型装置では運用の柔軟性に欠け、ともすれば実験効率が低下しがちであるが、LHD では超伝導コイルによって定常的に発生される磁場に加えて、排気や加熱装置、そして除熱についても効率の高い運用に耐える工夫がなされている。また、各種実験機器の同期やインターロック動作、データ処理システムも定常運転に対応できる能力を持っている。

これらの基盤に合わせて、長時間運転に関連したプラズマ加熱装置の定常運転化をはじめとする装置工学技術からプラズマと壁の相互作用に関する物理学に至る広い範囲の学術研究の積み重ねを活かす環境が整い、この第 8 サイクルでは高温プラズマの長時間保持を最優先課題として位置づけ、実験研究に取り組んだ。主たる進展はプラズマ真空容器内に 3 対の高周波アンテナを設置し、これによるイオンサイクロトロン共鳴加熱の定常化をはかったことによる。この結果、磁場強度 2.75 テスラにおいて、プラズマの温度は 2000 万度、密度は 7-8 兆個 (1 立方 cm 当たり) の高温プラズマを 31 分 45 秒に亘り連続して閉じ込め、保持することに成功した。

定常プラズマ保持に加えて、革新的な排気法であるローカルアイランドダイバータを用いた周辺プラズマ制御とプラズマ分布計測性能の向上の 2 点を高温プラズマの長時間保持に次ぐ優先課題として第 8 サイクル実験を実施し、所定の成果が得られた。さらに、この他にも LHD 実験計画であげられた所期の目的に合致した、高いベータや無衝突領域にあるプラズマの挙動の理解について大きな進展が見られた。

図 3.1.1-2 に第 1 サイクルからの加熱性能と蓄積エネルギーの進展を、図 3.1.1-3 にプラズマ温度と放電保持時間の進展を示す。順調に推移してきているが、これには加熱機器の増強とそれに見合った排気や燃料供給および除熱機構の改良に寄るところが大きい。現在の LHD とその付帯装置の性能を表 3.1.1-1 にまとめる。また、プラズマパラメータを第 7 サイクルから第 8 サイクルへの進展と所期の目標を合わせて表 3.1.1-2 に比較する。パラメータの伸びは研究の進展の一指標に過ぎないが、実験対象の拡がりを意味しており、学術研究の範囲および機会が拡大されてきたこと

を象徴している。

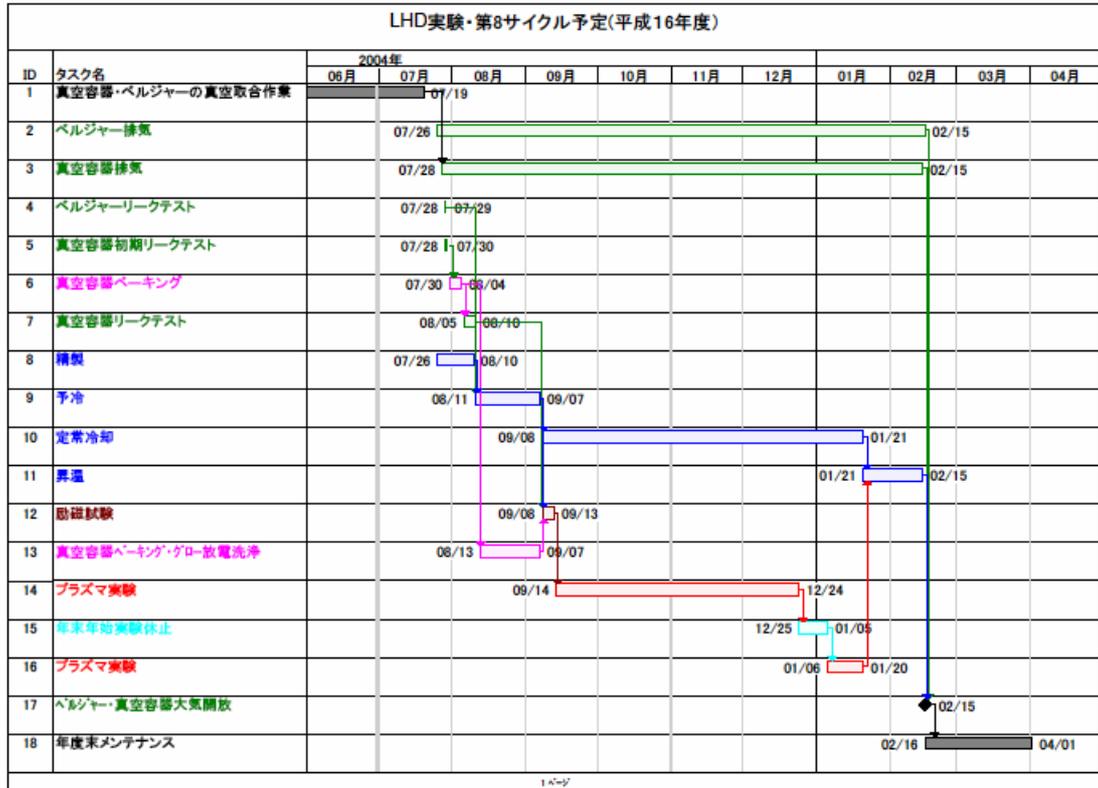


図 3.1.1-1 LHD 実験第8サイクル経過

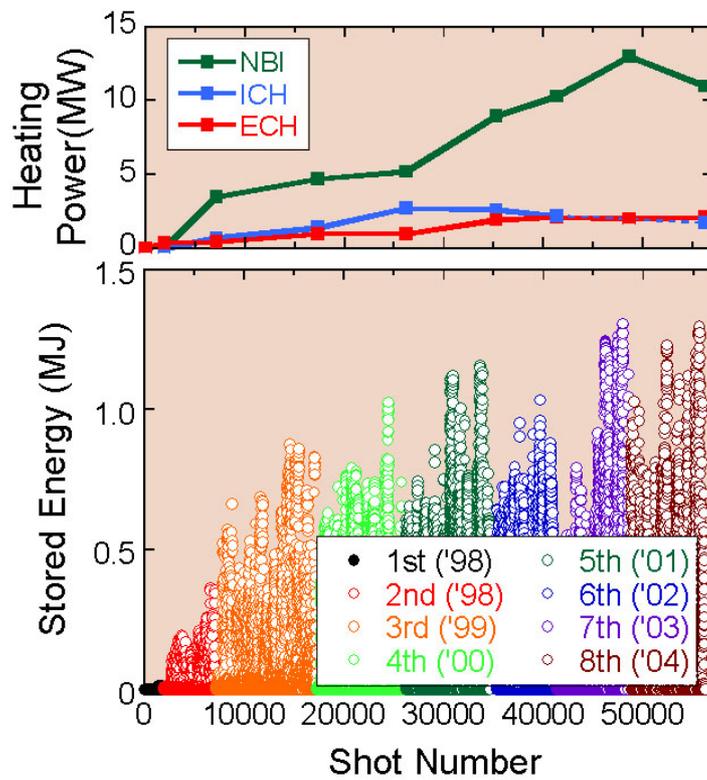


図 3.1.1-2 加熱パワーと蓄積エネルギーの進展

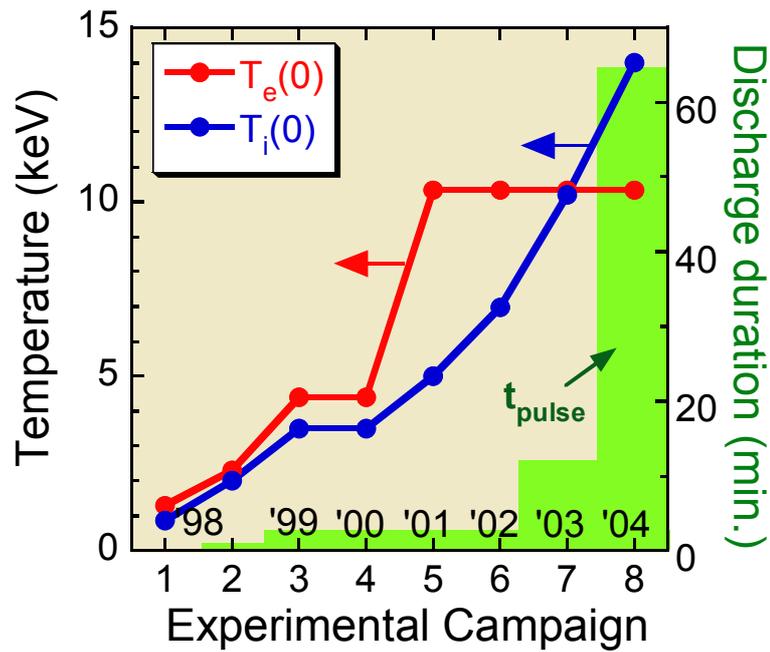


図 3.1.1-3 温度と放電保持時間の進展

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		2.8 T ($R_{ax}=3.6$ m 時)	3.0 T ($R_{ax}=3.75$ m 時)
加熱装置	中性粒子入射加熱(NBI)	接線入射 3 機 パワー 13 MW エネルギー 180 keV	パワー 15 MW
	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 25-100 MHz	パワー 3 MW
	電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH)	7 系統 パワー 2.1 MW 周波数 82.7, 84, 168 GHz	パワー 10 MW
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 10 Hz 定常 3mmφ 10 発/プラズマ放電	

表 3.1.1-2 プラズマパラメータ

	第 7 サイクル (平成 15 年度)	第 8 サイクル (平成 16 年度)	所期目標 (*1)
核融合三重積 (keV10 ¹⁹ m ⁻³ s)	2.2	2.1	5-10
(中心イオン温度 (keV))	(0.95)	(0.7)	(5)
(中心イオン密度 (10 ¹⁹ m ⁻³))	(6.2)	(8.0)	(10)
(エネルギー閉じ込め時間(s))	(0.36)	(0.37)	(0.1-0.2)
(維持時間 (s))	(0.3)	(7.5)	
中心電子温度(keV)	10	10	10
(線平均密度(10 ¹⁹ m ⁻³))	(0.5)	(0.5)	(2)
中心イオン温度 (keV)	10	13.5	10
(線平均密度(10 ¹⁹ m ⁻³))	(0.35)	(0.3)	(2)
β 値 (%)	4.1	4.3	5
(磁場 (T))	(0.45)	(0.45)	(1-2)
放電保持時間 (s)	756	3900 ⇔ 1 hr. 5 min.	3600
(加熱パワー(kW))		(110) 1905 ⇔ 31 min. 45 sec. (680)	(3000)

(*1) 中心磁場 4 T、NBI 加熱パワー20 MW、ICRF 加熱パワー 12 MW、ECH 加熱パワー 10 MW

3. 1. 2 平成 16 年度の重点課題から

1) イオンサイクロトロン共鳴加熱による定常プラズマ保持

今年度の重点課題として設定された定常実験には最も多くのマシンタイムが当てられ、精力的に実験がおこなわれた結果、世界的に注目されるデータが得られた。LHD では長時間プラズマ保持実験において、イオンサイクロトロン加熱を主に用い、ECH 加熱と NBI 加熱を補助的に用いて、700 kW の平均加熱入力で安定に 31 分 45 秒の間、プラズマを保持することに成功した(九州大学:坂本瑞樹助教授)。プラズマへの入力エネルギー値として 1.3 GJ を達成し、これはフランスの Tore Supra 装置がもっていた 1.07 GJ を超えて、新しい領域に入ることとなった。高性能プラズマを長時間閉じ込めることは最近の核融合研究の重要課題となっているが、トカマク装置においても、keV オーダーの温度のプラズマ閉じ込め実績は 6 分程度にとどまっている。今回 LHD 装置がトカマク装置の領域を超えて定常プラズマ保持の領域を拡大したことは、閉じ込め磁場形成にプラズマ電流を必要としないヘリカル系装置の定常核融合炉への優位性を改めて示したと言えよう。また、高エネルギーイオンを磁場と垂直方向に加速してプラズマを加熱するマイノリティイオン加熱モードでのイオンサイクロトロン加熱法を用いてこれを達成したことは、過去において速度空間における粒子損失問題を指摘されてきたヘリオトロン磁場方式で、高エネルギーイオンの閉じ込め性能が優れていることを示すことにもなった。

今サイクルは定常実験の目標として以下の値が設定されていた。すなわち、プラズマパラメー

タ領域の拡大として

- ・加熱パワー500 kW、時間幅 1000 秒を目標とする。
- ・数年以内に 1 MW、1000 秒（入力エネルギー値 1 GJ）を目指す。

今年の結果として、これらの値を大幅に超えることに成功した。定常実験では長時間運転に適したプラズマを高周波で加熱するイオンサイクロトロン加熱法による加熱実験を重点的に行った。結果として、真空容器内に設置されたアンテナ（図 3.1.2-1）からの高周波電磁波を主力として約 700 kW を入力することにより、プラズマの温度は 2000 万度、密度は 7-8 兆個（1 立方 cm 当たり）の高温プラズマを 31 分 45 秒に亘り連続して保持することに成功した。この長時間運転には、閉じ込め磁場の最適化、ダイバータ機構の理解に加えて、プラズマと壁の相互作用における原子分子過程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。

今回の実験結果は具体的には以下の各種装置の改良や実験手法の開発により達成された。

- ・ 定常加熱機器の性能向上
 - ICRF 加熱の全般的性能向上（東京大学：高瀬雄一教授、笠原寛史氏、京都大学岡田浩之助手、KAERI（韓国）：J.G.Kwak 氏）
 - ECH の伝送路改良
 - NBI のイオン源改良による長パルス安定入射
- ・ ダイバータの除熱性能の改良
- ・ 磁気軸スweepによる熱流束の空間分散に成功



図 3.1.2-1 LHD のプラズマ真空容器内に設置された高周波アンテナ

以下にこれらの内容を述べる。

1.1) 加熱の性能向上について

定常実験では、ICRF 加熱、ECH 加熱、NBI 加熱を組み合わせる実験を行った。そのうち 8 割程度の入力エネルギー値を ICRF 加熱が担っており、これを主加熱装置として実験を行った。ECH 加熱は放電中に数回発生するダスト状固形物落下時のプラズマ維持の安定性を増すために効果が

あり、NBI はプラズマをトーラス外側にスイングしたときの密度上昇抑制とヘリウムプラズマ中の水素イオン比の維持に効果的であった。ICRF 加熱はマイノリティイオン加熱モードで運転しており、ヘリウムプラズマ中の水素イオン密度の安定維持が必要条件である。

ICRF 加熱装置は第 7 サイクル（平成 15 年度）では、プラズマ実験を行わず、1 年間をかけてアンテナ、発振器、伝送路を含めた全ての機器の全面改修を行い、今サイクルに向けた実験準備を行って来た。アンテナでは第 6 サイクル（平成 14 年度）に LHD 真空容器内でアーキングによる水漏れ事故が発生しているため、そのための対策を種々施した。また高周波発振器は定常運転用の発振器を 2 台から 4 台に増強し、安定に安全に運転できるように整備を行った。同軸伝送路も内外導体共に水冷構造にして冷却能力を向上させた。これにより長時間運転による伝送路の熱伸びの影響を小さく抑えることが出来た。

ECH 加熱は定常運転用のジャイロトロン管の安定運転が可能になり、また真空排気型の導波管伝送路の冷却と排気系を改良したことにより、安定に定常 100 kW レベルの入射が可能になった。NBI 加熱は 2 台のイオン源の冷却構造を長パルス仕様に変更したことにより、イオン源 1 台あたり 500 kW/25 秒の入射が約 6 分間隔で安定に行えるようになり、2 台のイオン源を交互に使用することにより、3 分間隔での入射が可能となった。

これらの加熱機器の性能向上と LHD 真空容器内の受熱板であるダイバータ板の温度上昇を抑えることに成功したことで、長時間プラズマ維持に成功した。

1.2) 長時間放電実験

第 8 サイクルでは 8 日間の定常実験を行い、平成 16 年 12 月 9 日に目標を達成することに成功した。図 3.1.2-2 に 31 分間のプラズマ維持に成功した放電を示す。平均加熱パワーは 680 kW で、ICRF (520 kW) と ECH (100 kW) を定常的に入射している。NBI は約 3 分間隔で 25 秒間の繰り返し入射を行った。

中心イオン温度は 2 keV 以上であり、電子温度は 1.5-2 keV 程度に維持されている。電子密度はガスパフにより自動制御したパラメータであり、おおよそ $0.7-0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に保たれている。時々 0.5 程度まで減少しているのは、NBI 加熱により入射パワーが増加し、自動制御の範囲を超えた環境変動により密度が減少したものである。

第 6 サイクル（平成 14 年度）までの ICRF 加熱では標準磁場配位（磁気軸 3.6 m）において 2 分以上の運転をおこなうとアンテナ近傍のトーラス内側のダイバータ板が 300°C 以上に局所的に上昇し、ダイバータ板や壁からの脱ガスによると見られるプラズマ密度上昇がおこり、放射崩壊して放電が終了していた。今サイクルは、アンテナやダイバータ板の温度をモニターしながら、温度上昇を抑えるように運転をおこなった。トーラス内側（図 3.1.2-2 の $T_{\text{div}}(3\text{I-U})$ ）のダイバータ板の温度上昇を抑えるには磁気軸を 3.7 m 以上にする外側シフトが有効であるが、この場合は、トーラス上方向のダイバータ板の温度 ($T_{\text{div}}(4.5\text{U-I})$) の上昇が大きく、またアンテナのサイドプロテクタの温度上昇も大きくなるため、磁気軸 3.65 から 3.7 m 近傍で磁気軸のスイングを行うことにした。最終的には磁気軸を 3.67 から 3.7 m の間に往復動作させ、スクレイプ層からダイバータに出てくる熱粒子束を分散させて温度上昇を抑えることに成功した。図 3.1.2-2 の最下段に磁気軸の位置とダイバータの温度上昇が飽和していることが示されている。2 本のダイバータ温度の変化は磁気軸の変化と同期し、位相が反転している。また、4.5 U のダイバータ温度は NBI の

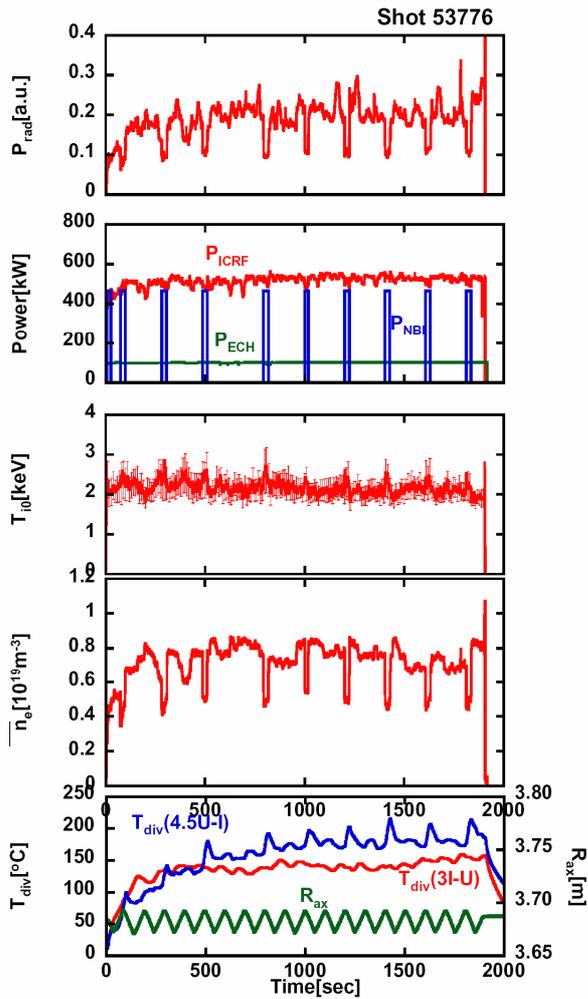


図 3.1.2-2 長時間放電波形

入射に同期してより大きく上昇しており、LHD のダイバータ熱流束の空間分布がこの磁気軸変化により大きく変化していることがわかる。

1.3) 長時間放電のためのダイバータ板の改良と熱負荷分散および壁コンディショニング

第 8 サイクルに長時間の高入力エネルギー放電が可能となった理由として、定常加熱装置の改善に加えてダイバータの除熱性能の向上と熱負荷分散に成功した点が挙げられる。これには以下の 3 つの要素があげられる。これらの総合的な実験環境の向上があり、長時間プラズマ維持が実現されたといえる。

(1) プラズマからの熱流束を受ける受熱板を改良し、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。温度上昇の顕著な受熱板位置に高速イオン束の集中が起きていることが粒子軌道計算との比較によって確認された。これにより、熱負荷の大きい場所を同定することができた。

— 熱伝導率の良い高性能受熱板を一部の熱負荷の大きい位置に設置した。

— 受熱板と冷却配管の間に、熱伝導率の良い、ガスの噴出し難いスーパーカーボンシートを挟むことにより、受熱部から冷却配管までの高熱伝導率を実現した。

(2) 受熱板上の熱負荷が特定の場所に集中しないよう分散させ、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。

— 受熱板にプラズマが当たるよう、閉じ込め磁場を最適化 (プラズマ主半径を 3.67 から 3.70 m とした) そして、より分散するように

— 放電中、プラズマの当たる位置を時間的に変化させた

(磁気軸スイング、熱負荷の大幅な分散が可能になった)

(3) 壁コンディショニングの手法を改善

壁調整のため、プラズマに面した壁にボロン、チタン等をコーティングし、壁から鉄などの不純物やガスが放出され難くした (日本原子力研究所: 木津要氏)。

1.4) LHD の長時間実験データの位置付け

図 3.1.2-3 に今回の LHD の実験データをプラズマ維持時間とプラズマ入力エネルギー値のグラフに示す。図には高温プラズマを閉じ込めた大型装置のデータが主に示してあり、100 秒以上の

データは、LHD と ATF 以外は超伝導トカマク装置で、数分から数時間のデータが示されている。JET や JT-60 のデータは高加熱入力で数 10 秒の実験である。LHD の実験データが世界の大型装置に比べても長時間運転の新しい領域に進んでいることがわかる。第 8 サイクル実験で実施された長時間プラズマの入力エネルギー値は 1.3 GJ に達した。この値は今までフランスの Tore Supra 装置が持っていた実験結果の 1.07 GJ を上回る値になった。

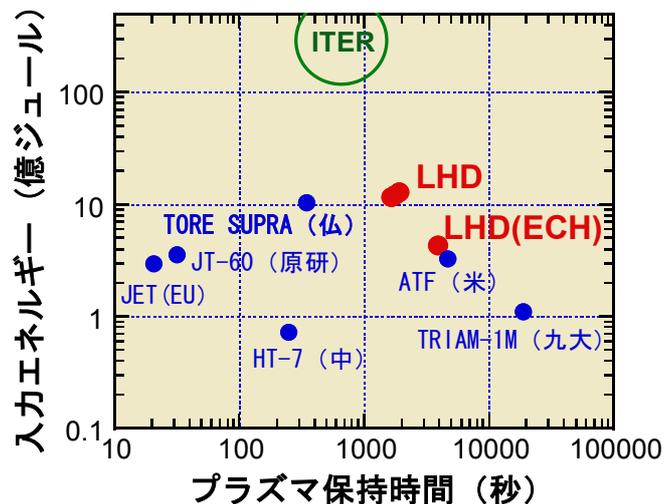


図 3.1.2-3 定常プラズマ達成パラメータ領域

今後は、より高い加熱入力で 2 GJ 以上の入力エネルギー値を実現し、学術的に世界にインパクトを与える実験をめざす予定である。そのために除熱能力を向上させたダイバータ板を設置し、また ICRF 加熱による高エネルギー粒子のため損傷する可能性が有る部位をカーボン板で保護する等の対策を施す予定である。

今回の長時間実験により、プラズマ電流を必要としないヘリカル型閉じ込め装置が、定常核融合炉へ高いポテンシャルを持つことを示すことが出来たといえる。また特筆すべきは、この実験は ICRF 加熱で実現したことでもある。イオンの閉じ込めに問題があると話題になり易いヘリオトロン配位で、磁場に垂直方向加速のマイノリティイオン加熱モードで、このデータを達成したことは特に意義深いものがある。

定常実験において計測データのデジタル処理の需要が急激に増加してきたが、Compact PCI や WE7000 といった実時間デジタルライザや CAMAC デジタルライザ系での定常放電中でのサブショットという概念を取り入れた繰り返し運転モードが順調に稼動し、最大 84 GB/ショットという世界に例を見ない大容量データを処理することができた。

2) 周辺プラズマ制御による閉じ込め改善の試み

ローカルアイランドダイバータ (LID : Local Island Divertor) は、排気装置を備えたダイバータ室を有する本格的な「閉ダイバータ」である。磁気島を利用した効果的な周辺排気により高温ダイバータを実現し、ヘリカルプラズマの閉じ込め改善を目指している。前サイクルまでに行われた実験で、アイランド・セパトトリックスに沿ったフローの形成、高い排気効率の実現等、LID

が、物理設計で期待された基本性能を有し、周辺プラズマ制御に有用であることが示されている。

LID 配位ではその良好な粒子制御性により、リサイクリングの極めて低い状況を実現することが可能である。今サイクルは、この LID の効果を積極的に利用するオペレーションを試みることで、特徴的な分布構造を持つ 2 種類の放電を得ることができた。どちらの放電も、粒子供給停止後の密度が急激に減衰する過程で、中心付近の圧力分布の急峻化が観測されている。両放電は、その現象が現れる密度領域が、 10^{18} m^{-3} 台前半、および 10^{19} m^{-3} 台後半と大きく異なっている。前者はガスパフ停止後の低密度領域で ECH による中心加熱を行うことにより、図 3.1.2-4 に示すような中心温度が 10 keV 弱の ITB 的な電子温度分布を持つ放電である。ITB はヘリカルダイバータ配位でも得られているが、LID 配位では極めて容易に形成することが可能で、その再現確率も非常に高い。LID は ITB の形成に有利な配位ということができる。一方、ペレットを連続入射した後の高密度領域では、LID による周辺排気により、通常の高密度放電では見られない強い「再加熱」が起こり、蓄積エネルギーの増加とともに密度分布が中心部で尖頭化する現象が見出された (図 3.1.2-5)。このような、非常に強い密度の尖頭化はこれまでいかなるオペレーションでも得られておらず、LID 配位に特徴的な分布ということができる。この時、電子温度分布は、通常の高密度放電時と異なり、周辺領域で勾配が急峻になっており、それが中心領域まで維持された極めて特徴的な形状をしている。このような放電が得られる物理的機構を解明し、それに最適なオペレーション領域を開拓すれば、将来 ETB と ITB を併せ持つような高閉じ込めモードの達成に繋がる可能性があると考えている。

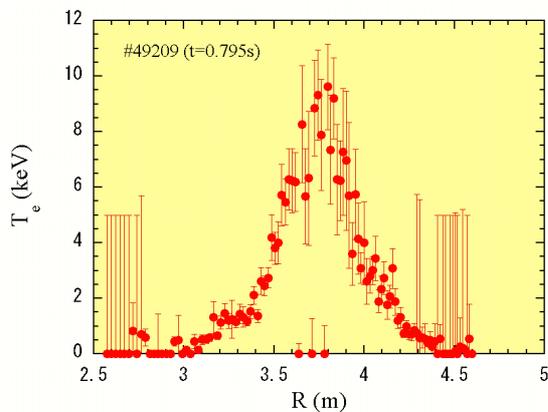


図 3.1.2-4 LID 配位において ECH 加熱により見られる ITB 的な電子温度分布

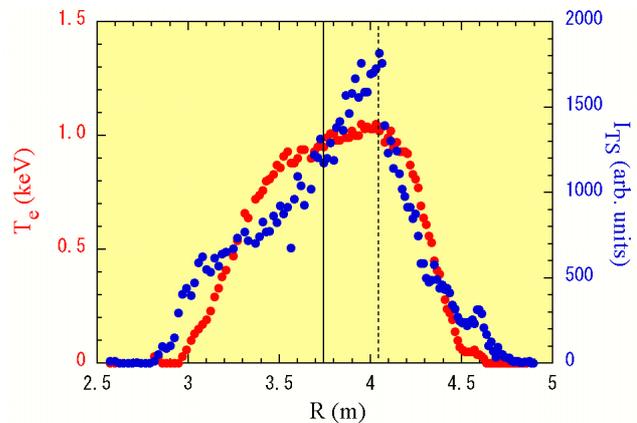


図 3.1.2-5 LID 配位においてペレット入射後に見られる尖塔化した電子密度分布 (青丸、トムソン散乱強度) と電子温度分布 (赤丸)。

磁場配位の違いによる LID のグローバルな閉じ込め性能を比較するため、磁気軸位置を変える実験を行っている。その結果、外寄せ配位の $R_{ax}=3.75 \text{ m}$ が次に述べる意味で最適値であることが明らかになった。図 3.1.2-6 に標準配位 ($R_{ax}=3.60 \text{ m}$) との比較を示す。標準配位では蓄積エネルギーが密度に対して飽和し、密度限界自身も低い、外寄せ配位では密度領域が大幅に拡大し、蓄積エネルギーの飽和も見られない。また、ISS95 スケーリング則と比較した閉じ込め改善度は、標準配位では密度に対して減少傾向を示しているが、外寄せ配位では高密度領域でも 1 を上回る場合のあることが分かる。このような外寄せ配位優位性の原因を調べるため、輸送解析を行った。

熱輸送係数 χ_e はエネルギーバランスから、粒子輸送は密度変動実験から D と V を分離して評価した（オーストラリア国立大学（豪）：C.Michel氏）。その結果、 χ_e と D に関しては2つの配位で際立った違いは見られないものの、対流項 V に関しては周辺部でその向きが逆転していることが見出された。つまり、図3.1.2-7に示すように3.60 mでは外向きであるが、3.75 mでは内向きになっており、これが外寄せ配位の密度上昇に貢献している可能性がある。EMC3-EIRENEコードによるモデリングも行っている（マックスプランクプラズマ物理研究所（独）：Y.Feng氏、F.Sardi氏、ユーリッヒ研究所（独）：D.Ryter氏）。図3.1.2-8に示すように、 $R_{ax}=3.75$ mではヘッド前面でリサイクリングが起こるため、実効的な粒子供給効率が上がり、密度上昇が起こっている可能性のあることが明らかになった。

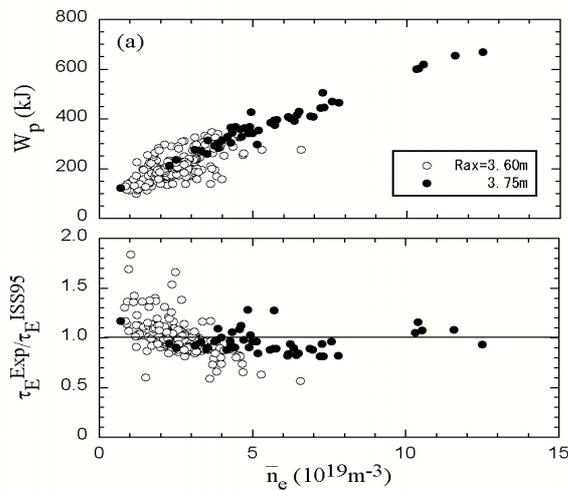


図 3.1.2-6 標準配位 ($R_{ax}=3.6$ m) と外寄せ配位 ($R_{ax}=3.75$ m) での蓄積エネルギーおよびISS95 則からの改善度の密度依存性の比較

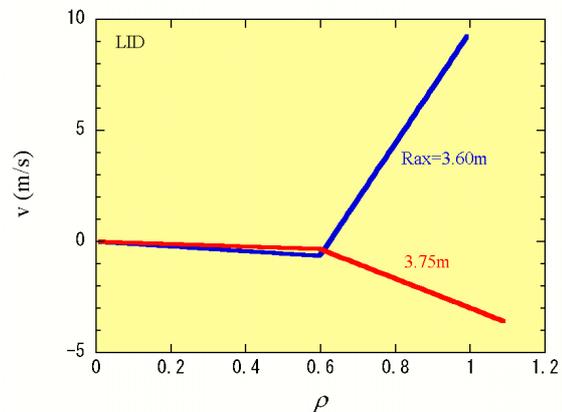


図 3.1.2-7 標準配位 ($R_{ax}=3.6$ m) と外寄せ配位 ($R_{ax}=3.75$ m) での対流速の径方向分布の比較。正負の符号はそれぞれ外向き、内向きを表わす。

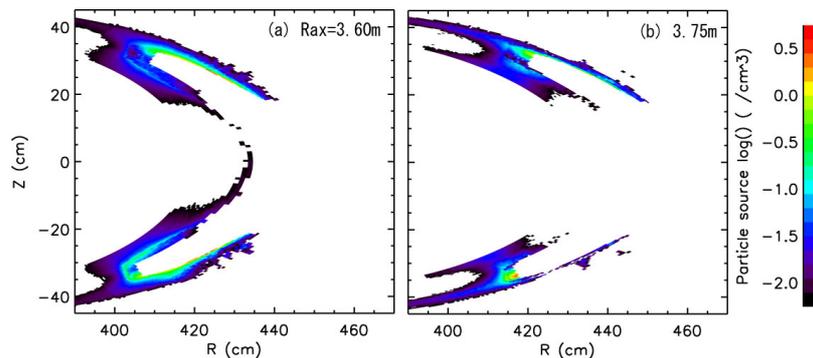


図 3.1.2-8 標準配位 ($R_{ax}=3.6$ m) と外寄せ配位 ($R_{ax}=3.75$ m) でのLIDヘッド近辺の電離源分布。

LIDによる閉じ込め改善が予想に反して実現されていない理由は、中心部への粒子補給の不足にあると思われることから、今年度は、燃料供給効率改善とヘッド部の放射冷却を目的に、ガスパフの増設（3系統）を行った（図3.1.2-9）。即ち、電離した粒子がLIDで排気されてしまい、中心部の密度を上げられないことが最大の原因と考えられている。ヘッド内側に設置したO（オー）

点ガスパフは、磁気島内部の「よどみ点」に粒子源を置くことにより、粒子供給効率の改善を期待している。この結果、今年度はガスパフによる最高密度の値を更新することができた。しかし、中心部への粒子補給はまだ十分ではなく、閉じ込めを改善することはできなかった。今後、粒子補給方法をさらに工夫して中心部の密度制御を可能とし、閉じ込めの改善を実現したいと考えている。

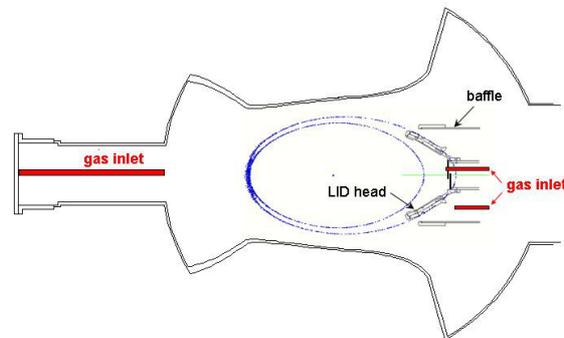


図 3.1.2-9 新しく導入されたガスパフ注入口

3) プラズマ分布計測性能の向上

LHD では輸送や MHD 安定性に関わるプラズマ内の構造やその振る舞いを観測するため、温度、密度や放射強度などの多くの分布計測が準備されている。平成 16 年度は定常プラズマ保持と周辺プラズマ制御に関する研究が重点化されたことと符合させ、粒子輸送特性および境界プラズマの特性を理解する上で重要視される密度計測の充実をはかった。高温プラズマが外界と接する境界プラズマでは、プラズマ中の荷電粒子の振る舞いと燃料中性ガスの原子過程が混在し極めて複雑である一方、その熱と粒子の制御がプラズマ閉じ込めの境界条件を決める鍵となる。

トムソン散乱計測を整備し、電子温度分布に加えてプラズマ全域にわたる詳細な電子密度分布が得られるようになった。空間解像度は約 20 mm、4 台の YAG レーザー（10 Hz, 2.5 J が 3 台、50 Hz, 0.5 J が 1 台）を稼働させ、実験テーマや対象となるプラズマのパラメータに応じた運転が可能である。

次に、シート状の炭酸ガスレーザー ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) を用いた干渉計測を整備し、周辺プラズマの密度分布計測の精度を向上させた (中部大学: 岡島茂樹教授)。これまで常時稼働してきた FIR レーザー干渉計 ($\lambda=119\mu\text{m}$) よりも波長が短いため、ペレット入射の時に代表されるような急峻な密度勾配が発生する場合には FIR 干渉計では周辺コードで観測が不可能であったが、炭酸ガスレーザー干渉計ではこれらにも問題なく対応できるようになった。また、空間解像度も FIR 干渉計の 90 mm に対して、15.6-31.2 mm と大きく向上した。図 3.1.2-10 に典型的な密度分布について上記 3 つの計測方法からの結果を示す。トムソン散乱計測 (ポイント測定) と炭酸ガスレーザー干渉計測 (線積分計測からのアーベル変換) は良い一致を示しており、FIR 干渉計測からのアーベル変換分布よりも精度が向上していることが分かる。さらに同じ炭酸ガスレーザーを用いた位相コントラスト法によって密度の揺動伝播が観測できるようになった。図 3.1.2-11 にその例を示す。コア部では新古典輸送の両極性拡散条件から予想される電場に合った向きの回転が観測されている。

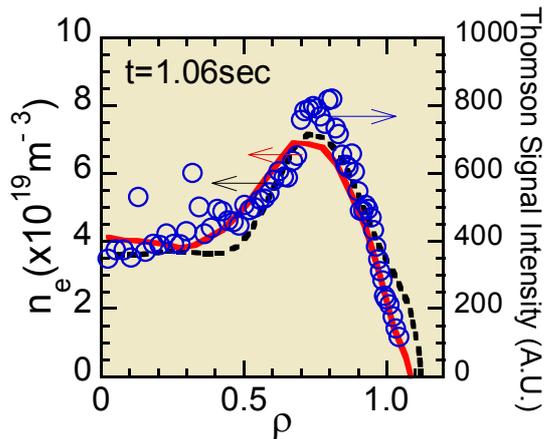


図 3.1.2-10 3種の計測器（青丸：トムソン散乱計測、赤実線：CO₂レーザー干渉計、黒破線：FIR干渉計）によって測定された密度分布

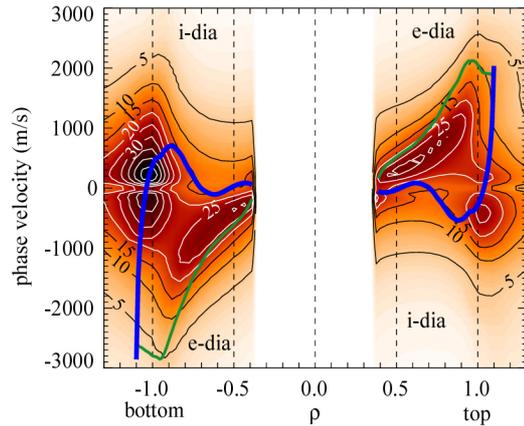


図 3.1.2-11 CO₂レーザー一位相コントラスト法によって観測された密度揺動の回転

もう一つ、静電プローブはトムソン散乱や干渉計測に比べて運用条件が限られているものの、分布計測に関しては良い空間分解能が得られる利点もある。駆動長 500 mm を持つ圧搾空気駆動の高速掃引型静電プローブ (FSP) を用いて最外殻磁気面の外側にあるエルゴディック層プラズマの電子温度・密度および電位の分布計測に供されている。また、FIR 計測と相補的に特に周辺部の密度分布を計測するための極超短パルス反射計の整備が進んだ (九州大学：間瀬淳教授)。

また、中性粒子からの発光強度測定を高度化し、その発光線のゼーマン分離から発光位置の磁場を同定することにより、中性粒子の横長ポロイダル断面全体の 2 次元分布を再構成する方法が確立された (京都大学：岩前敦助手、藤本孝教授、信州大学：澤田圭司助教授)。これにより、X 点近傍でヘリウム原子の強い発光が認められた。この結果は、プラズマ中へ侵入する中性原子フラックスにポロイダル非一様性が存在することを示している。図 3.1.2-12 にその例を示す。

以上、述べた計測によって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、周辺プラズマの粒子制御によるプラズマの閉じ込め改善を図る研究に寄与することができた。

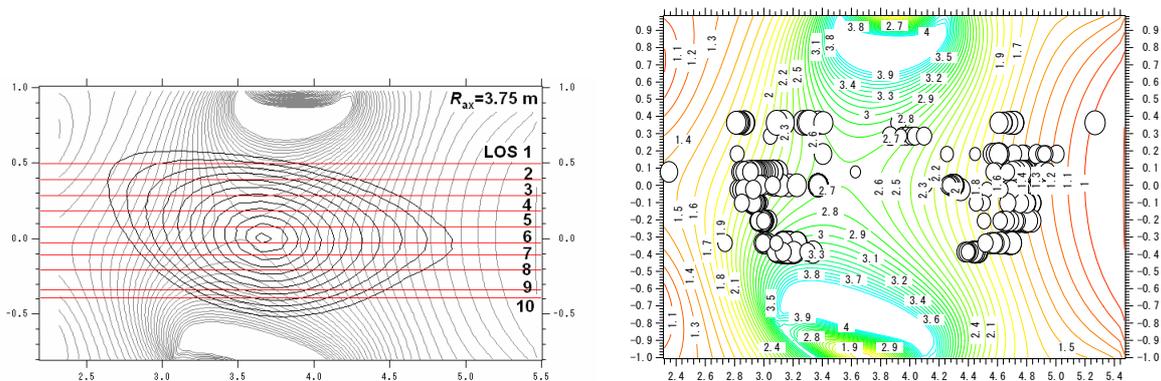


図 3.1.2-12 ゼーマン分離を利用した H α 2次元発光分布の推定

3. 1. 3 プラズマ物理実験研究からの成果

前節で述べた重点項目以外にも炉心プラズマのための重要な物理的な課題に広範な取り組みが

続けられ、第8サイクルにおいて着実な進歩が得られた。2章で述べられたテーマグループ設定別（「定常運転」、「粒子制御と閉じ込め改善」は3.1.2で紹介済み）に研究成果を紹介する。

1) 高密度

LHD では既に $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ を越えるプラズマが得られているが、第8サイクルにおいては高密度テーマグループでは、**高密度領域における熱・粒子輸送特性の評価**（日本原子力研究所：竹永秀信副主任研究員）、非等方性輻射崩壊、輻射崩壊時のパワーバランス、高密度プラズマの計測、輻射崩壊からの回復、デタッチメント、ボロナイゼーションの効果、のテーマを挙げ、これらを調べるために有効なデータベースを構築することを目的として、磁気軸及び磁場強度が異なる配位での系統的な密度及びパワースキャンを行った。

その中で、真空容器の高磁場側に取り付けた**大流量のガスパフ**（三重大学：松岡守教授）による周辺プラズマの冷却条件を探り、プラズマがダイバータから離れたいわゆる「デタッチ」状態を準静的に維持できる条件を見出した。典型的な放電例を図3.1.3-1に示す。デタッチした放電（#53614、赤色）とデタッチしなかった放電（#53622、青色）を重ねて示している。ガスパフの密度フィードバックにより、 $t=1$ 秒までに $\sim 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とした後、1秒からの大流量ガスパフ（約 $190 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ）によりデタッチさせている。この場合は両放電とも同じ大流量ガスパフであるが、フィードバック時の密度が若干低い#53622ではデタッチしていない。#53614で、デタッチは $t=1.3$ 秒までに完了しており、その後は加熱NBIが停止するまで（ $t=3.3$ 秒）ガスパフ無しでデタッチを維持している。デタッチしているかどうかはダイバータ上のイオン飽和電流 I_{sat} をモニターすることで判別するが、これは $\text{H}\alpha$ 信号とほぼ同じ振舞いをしている（京都大学：近藤克己教授、有本元氏、岩前敦助手）ため、図には示していない。大流量ガスパフによって、まず n_{e09} が増大し（ホロー分布）、その後数百msの時定数で中心密度も増大して（ $t=1.3 \sim 2$ 秒）、最終的にはフラットな密度分布が形成される。デタッチ中（ $t=1.3 \sim 3.3$ 秒）、周辺部の密度と温度（ n_{e09} 及び T_{e09} ）は定常的に保持されている。デタッチ時の $\text{H}\alpha$ 信号は、アタッチ時と比較して半分以下に減少しており、この時 I_{sat} は数分の1以下になっている。また、周辺部が低温であることを反映して CIII の発光強度も大きい。デタッチ時の蓄積エネルギーは、アタッチ時に比較して低い。デタッチ時の蓄積エネルギー低下の第一要因として挙げられるのは、電子圧力分布がデタ

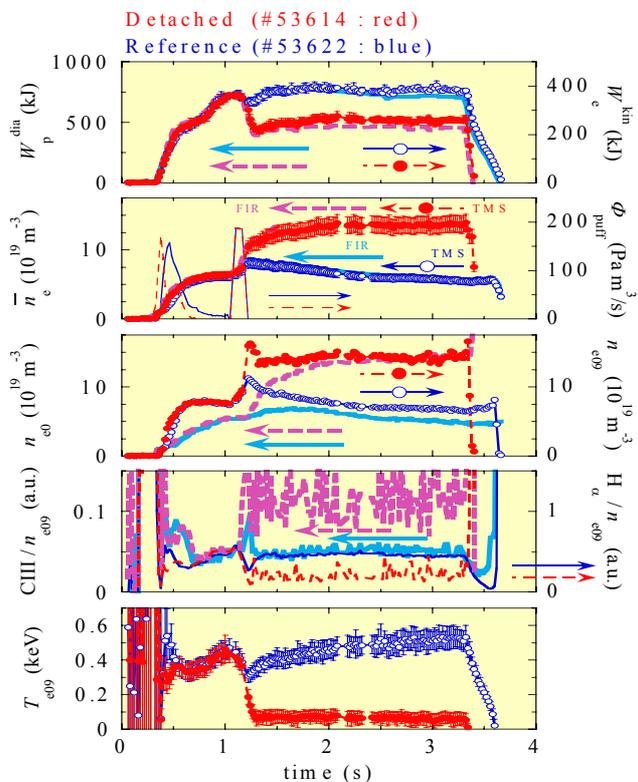


図 3.1.3-1 準静的なデタッチ放電の波形（赤線）。青線はデタッチを生じなかった参照放電波形。

タッチ時に縮んでいるということである。アタッチ時（1.0 s 及び 1.2 s）の電子温度分布は、 $\rho = 1$ まで広がっているのに対し、デタッチ時（1.5 s 及び 3.0 s）の電子温度分布は $\rho = 0.9$ 程度までしか広がっていない。この位置における回転変換は 1 であり、縮んだプラズマ柱の半径が有表面と関係して離散的に決まる可能性を示唆している。デタッチプラズマのエネルギー閉じ込めを改善し、高蓄積エネルギーと高密度を同時に、かつ安定に維持することが今後の課題であると同時に、これらのプラズマは過渡的に捉えられてきた放射崩壊の過程を調べる新たな実験対象として期待される。

2) 粒子・不純物輸送

このテーマによる実験研究は大きく 2 つある。

(1) 不純物入射（ペレット、ガスパフ）による閉じ込め領域の不純物輸送解明実験

LHD では炭素や金属不純物を中心とした不純物ペレット入射装置と微小トレーサをプラスチックでカプセル化した TESPEL (Tracer Encapsulated Solid PELlet)、そして不純物ガスパフを用いた不純物輸送研究が進められている。

炭素ペレットを水素、ヘリウムプラズマにそれぞれ入射し、粒子輸送係数（拡散係数、対流速度、リサイクリング係数）の背景イオン質量依存性の評価を行った。拡散係数は水素、ヘリウムで大きな違いはないが、背景イオン質量が大きい場合に対流速度は小さくなることが観測された(図 3.1.3-2(a), (b))。また、対流速度は周辺の密度勾配の大きな関数になっていることも明らかになり、この傾向はアルミニウム及びチタンペレット入射時も同様であった(図 3.1.3-2(c))。

TESPEL によりチタントレーサをコアプラズマ中に入射後、50, 250, 350 msec 後にそれぞれ ECH を印加した場合、50, 250 msec の場合はほぼ同じ時定数で $\text{TiK}\alpha$ 発光強度が減衰するが、350 msec の場合はその他の場合に比べて $\text{TiK}\alpha$ 発光強度の減衰時定数が 3 倍程度長いことを観測した。すなわち ECH による不純物の吐き出し効果は、チタントレーサ入射後時間が経つと弱くなることを示唆しており、ECH による不純物吐き出しの機構と ECH 印加時の径方向電場の変化の関係を調べた。ECH を印加すると、電場は正に変化している領域が現れており、径方向電場が

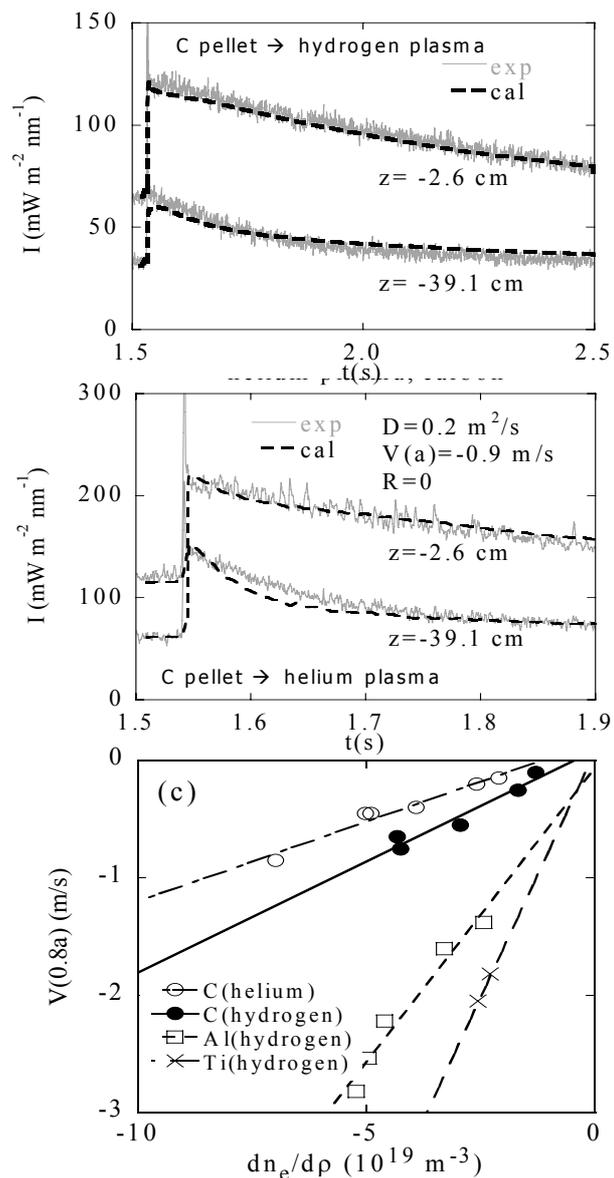


図 3.1.3-2 不純物ペレット輸送解析

不純物吐き出し機構の一つの要因であることが示唆される。

この他、キセノンガスを用いた EUV 領域のスペクトル分析が行われ、これは LHD プラズマを光源として利用する事例となっている（大阪大学：西村博明教授）。

（2）周辺・ダイバータプラズマ計測、及び計算機シミュレーションとの比較

放射崩壊に至る際のプラズマ中の不純物（主に炭素）の実験データを詳細に研究するためには、LHD プラズマ中の不純物（炭素）の輸送を解析しなければならない。そこで、炭化水素（イオン）の挙動を取り扱うことのできる中性粒子輸送シミュレーションコード（EIRENE：ステラレーターバージョン）を利用して、ダイバータプラズマ中の炭化水素分子・イオンの密度分布などを求める初期的なシミュレーション計算を行った（筑波大学：中嶋洋輔助教授）。この計算では、ダイバータータイトル上のストライクポイントから炭化水素（メタン： CH_4 ）をプラズマ中に放出させている。大半径方向で内側のダイバーターレグに沿って炭素の密度の高い領域が形成されており、CCD カメラによる CII の観測結果とは定性的に矛盾しないことが分かった。

3) 高 β

第7サイクルでは高 β 実験を重点化し、高 β を志向した低磁場実験において最外殻磁気面から逸脱した高速イオンの悪影響を抑えるため真空容器内から ICRF アンテナを撤去した。実際、ベータ値 4.1% が達成され、その成果が認められた。第8サイクルでは、対照的に ICRF アンテナが設置されたため、（1）高ベータ化に向けた磁場配位（ヘリカルコイルピッチ γ 及び R_{ax} ）の最適化、及び（2）低磁場高ベータ放電時の NBI 入射に対する ICRF アンテナの影響を明らかにすることを目的として実験研究を遂行した。また、高 β 化に向けた物理実験として、（3）L/H 遷移と境界輸送障壁に関する実験、新規に設置した周辺 SX アレイを用いた（4）周辺 MHD モードの閉じ込めへの影響に関する実験、高速 SX 接線カメラを用いた（5）MHD 不安定性の空間構造と揺動の飽和メカニズムの研究に関する実験を行った（大同工業大学：岩間尚文教授）。

プラズマの高 β 化を目指すには、MHD、輸送特性及び加熱吸収特性に対する磁場配位の最適化が重要となる。LHD における磁場配位は、磁気軸位置、磁場強度、プラズマのアスペクト比を制御することにより広く運転することが可能であり、これまでの実験で得られた知見および理論的予測から高 β プラズマ生成に最適な磁場配位を見出す必要がある。最適な磁気軸位置については、これまでの実験及び理論計算により（1）輸送特性（新古典輸送）： $R_{ax}=3.53$ m、（2）加熱吸収効率： $R_{ax}=3.6$ m 近傍、（3）MHD 安定性： $R_{ax} > 3.5$ m との知見が得られている。（3）については、 $R_{ax}=3.5$ m 配位において閉じ込めに影響を与えるコア領域の MHD モードが観測されており、磁気井戸形成による安定化が困難であると予測されるためである。 $R_{ax}=3.6$ m では、コア MHD モードは高 β 領域で安定化されることを確認している。結果として $R_{ax}=3.6$ m 近傍で、かつ磁気軸シフトを可能な限り抑制することがプラズマの高 β 化に望ましいことから、 γ 値を下げる（アスペクト比を上げる）ことにより自発的なシフトを制御することとした。ここで、 γ は $m/l \cdot a_c/R$ で定義されるヘリカルコイルのピッチであり、LHD は 3 層のヘリカルコイルを持つことから実効的な小半径 a_c を変えることができる。結果としてプラズマのアスペクト比を制御することが可能である。第7サイクルの実験では、 γ を 1.22 に設定することによりプラズマシフトを抑制し、結果として体積平均ベータ値 4.1% を得ることに成功した。今サイクルは、 γ 値を広く範囲でスキャンすることにより、高ベータプラズマ生成に対する最適な γ 値を見出すことを目的とした。磁気軸

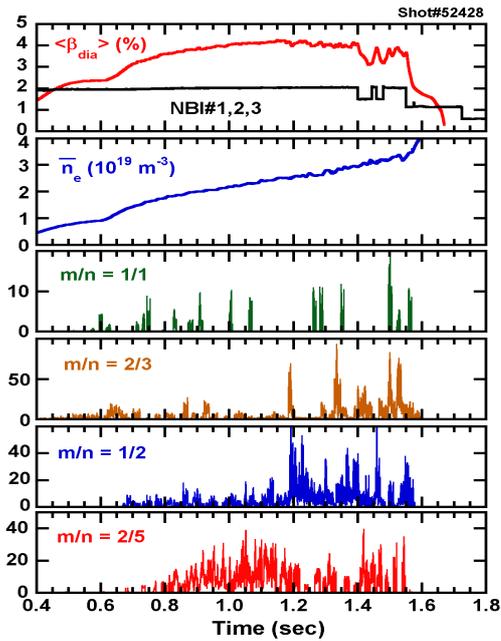


図 3.1.3-3 $\gamma=1.20$, $B=0.45\text{T}$ 時に $\beta=4.3\%$ を達成した高 β 放電波形。上から β 値、線平均密度、磁場揺動成分を示す。

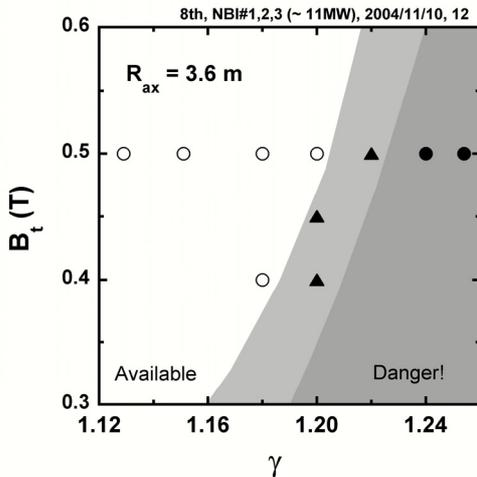


図 3.1.3-4 高 β 放電 γ 運転領域

位置についても 3.55~3.65 m の範囲で閉じ込め特性を調べることにした。低磁場時には、アンテナ部の発光により低密度領域での運転は制限されたが、 $R_{ax}=3.6\text{m}$, $\gamma=1.20$, $B_t=0.45 \text{ T}$ においてベータ値 4.3% が得られた。放電波形及び MHD 挙動を図 3.1.3-3 に示す。 β 値は 4.3% に達した後、緩やかに減少しており、この時周辺 MHD モード ($m/n = 1/2$) の急速な成長が観測されている。密度上昇による揺動量の増加はこれまでも観測されており、磁気レイノルズ数の低下が抵抗性交換型モードを不安定化（線形成長率の上昇など）させる要因である可能性がある。もしそうならば、入力パワーの増加（電子温度の上昇）によって抵抗性 MHD モードの成長を抑えることが可能であることを意味する。現在、得られた MHD 挙動のパラメータ依存性について体系的に調べ、輸送、加熱吸収特性に対する定量的評価をあわせて解析を進めている。ICRF アンテナの影響を調べ、 $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ における各 γ 、磁場強度での放電可能領域について知見を得た。図 3.1.3-4 に結果を示す。低磁場での運転可能領域は大きく制限されており、 γ 制御による磁気面の小型化によりアンテナとの相互作用を回避する必要がある。高ベータプラズマ生成の最適値と予測される $\gamma = 1.20$ 配位でも低密度領域でアンテナ部の温度上昇 ($> 400^\circ\text{C}$) が観測されている。また、 $R_{ax} = 3.65 \text{ m}$ 配位では、 $\gamma = 1.20$, $B_t = 0.5 \text{ T}$ であってもアンテナの温度上昇が観測されており、磁場配位の自由度は磁気軸位置に対しても制限されている。

4) 磁場平衡配位の MHD・閉じ込めへの影響

このテーマに関わる実験課題は多岐にわたっているが、大きくまとめると、(1) [配位の閉じ込め性能への影響](#) (日本原子力研究所: 諫山明彦氏)、(2) MHD 不安定性の閉じ込めへの影響、(3) MHD 平衡同定法の探求、(4) トロイダル電流の特性評価に分けられる。

(1) では楕円度を 0.8 から 1.4 まで変化させた磁場配位において NBI 加熱プラズマのデータベースが蓄積された。また、ECH の中心加熱を用いた無衝突領域に十分入ったプラズマを磁気軸位置 $R_{ax}=3.45\text{-}3.9 \text{ m}$ の範囲で調べ、新古典輸送の予測と矛盾しない特性を得た。これまで取得された閉じ込めデータベースは国際協力によって国際ステラレータ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。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（京都大学：佐野史道教授、村上定義助教授、他、マックスプランクプラズマ物理研究所（独）A.Dinklage氏、オーストラリア国立大学（豪）J.H.Harris教授、中央環境エネルギー研究所（西）E.Ascasibar氏、ウィスコンシン大学（米）J.Talmadge教授）、(図 3.1.3-5 (a))、そこでは実効的ヘリカルリップルの影響が議論された(図 3.1.3-5 (b))が、LHDのデータが主導的な役割を果たした。磁場の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。

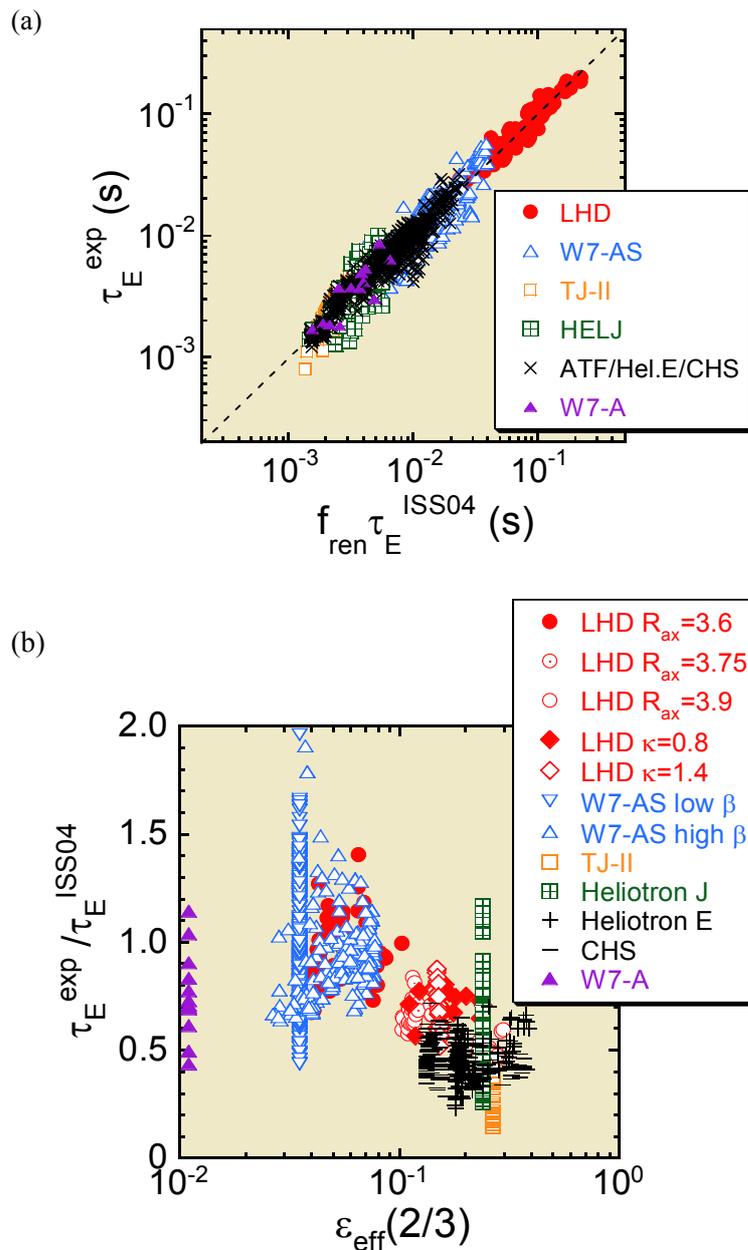


図 3.1.3-5 (a)エネルギー閉じ込め時間に関するISS04 スケーリング
(b)閉じ込め改善度の実効的ヘリカルリップル依存性

(2) では回転変換を上げる方向(順方向)のトロイダル電流が大きくなった場合に $m/n=1/1, 2/2$ の磁気揺動モードの発現、 $m/n=1/1$ モードの磁気揺動がバースト状に増大し、電子温度の急激な減少が起こり、電子温度減少後、輸送のタイムスケールでプラズマエネルギーが回復していく様子が観測され、理論予測との比較検討を進めた。逆に回転変換を下げる方向に大きな電流を流し、低回転変換時に予測される大きなシャフラノフシフトに付随する深い磁気井戸と強い磁気シア配位の実現による高安定性と高閉じ込め領域の探索、トカマク電流ホールの安定性と閉じ込めに共通する物理機構の解明、 $\iota=0$ 共鳴面に関連した磁気島形成の研究を目的として、逆方向に最大 1 T あたり 100 kA を超えるプラズマ電流を流す放電を行った。MHD 平衡の特定には回転変換分布の同定が重要であることから MSE による計測も行った。また、より電流分布を尖塔化させる試みとして ECCD も印加した。 $\iota(0)\sim 0$ が期待される -130 kA/T を実現したが、大きな不安定性は観測されなかった。一方、周辺 MHD モードの安定化や周辺での輸送障壁、 $m/n=0/0$ 揺動等が観測された。

(3) については、MHD 安定性解析と 1 次元輸送解析と基礎となる平衡配位の再構成の検討が進んだ。MHD 平衡は圧力分布、電流分布、境界条件が決まれば、一意に決定されることが知られているが、対称性のない 3 次元の磁場配位では数学的な意味での厳密な磁気面の存在が保証されておらず、MHD 平衡解を得るにはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の何らかのモデルを仮定する必要がある。特に LHD では周辺部のエルゴディック層の役割や磁気島の発生やヒーリングもあって境界条件の設定が難しい。計測結果と矛盾のない有限ベータでの周辺磁気面シフトの理論モデルの構築を目的とし、分布計測、平衡計測データと理論予測の比較を行っている。図 3.1.3-6 は $R_{ax}=3.6$ m, $B_q=100\%$, $\gamma=1.254$ 配位における電子温度分布から評価した周辺磁気面のシャフラノフシフトと理論予測(VMEC, HINT)の比較結果である。入れ子状の磁気面をアприオリに仮定することが必要な VMEC コードとその仮定を必要としない HINT コードで理論予測値に違いがあるが、これはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の仮定が異なっているためと考えられる。現在のところ HINT コード予測の方が実験結果との矛盾が少ないが、これらを確認するために圧力分布や電流の効果も含めた平衡解析を行っている。また、圧力の非等方度のサドルループ測定による定量的評価に向けた検討が進んだ。MSE による磁場変化の測定が相対的な変化を評価することによって回転変換と結び付けられ議論できるようになってきた。例えば、上で述べた大きな C_0 方向のトロイダル電流による大きな MHD 不安定性が起こる場合と起こらない場合の回転変換の違いが示され、電子温度分布の平坦化の位置と MSE 計測による有理面の位置に整合性があることが確認された。

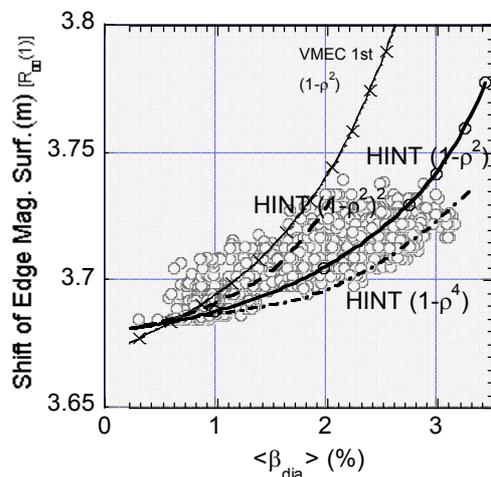


図 3.1.3-6 電子温度分布から評価した周辺磁気面のシャフラノフシフトと理論予測(VMEC, HINT)の比較

5) 低磁場実験

低磁場テーマでは低温定常プラズマの特長を活かし、通常の LHD 実験では困難なコア領域での静電プローブによる揺動計測、次元相似プラズマなどの新規アイデアのテストを主な目的としている。またプラズマ閉じ込め以外にも、例えば希ガス分光データ所得などプラズマを用いる分野から広く共同研究を受け入れる事も視野に入れている。

遺憾ながら、平成 16 年度の実験では 9 月 27 日の第 8 サイクル最初の低磁場実験において、ECR 放電洗浄装置の真空窓（セラミック製 12 mm 厚）が破損した。真空窓は予備品と交換したが、LHD 実験への影響を考慮し適当な再発防止策が取られるまで実験は中止とした。破損した窓は第 7 サイクルでの使用実績があり、年次点検（表面の洗浄等）を終えたばかりであった。窓には大きな亀裂が入っていたが、メタライズの痕跡は無かった。このため窓のエイジング不足または急激な熱応力が発生したためと考えられる。急激な熱応力としては窓表面への金属製の粉塵の付着が考えられる。このため第 9 サイクルでは窓を粉塵から防御するよう入射アンテナ部を改良し、またテストベンチでのエイジングを充分に行うこととする。

6) 高電子温度

高電子温度プラズマの、密度領域、磁場配位、NBI 駆動電流の方向、磁気島の有無による変化また、加熱や TESPEL を用いた過渡応答特性を組み合わせることで、高電子温度形成条件を明らかにし、さらには高電子温度プラズマの領域拡大を行なうのが本テーマの目的である。

高電子温度プラズマの密度及び空間的領域拡大を目指して、電力吸収分布の異なる EC 加熱、ICRF 加熱及び TESPEL の非局所輸送による電子温度上昇と組み合わせを変え、密度領域を変えて高電子温度プラズマの領域を探した。図 3.1.3-7 に示すように、TESPEL による非局所輸送によって引き起こされる局所的な電子温度上昇率は $\rho = 0.4$ 付近では EC によるそれを上回る場合がある。このように高電子温度を得るための手段として TESPEL の非局所輸送を利用できる可能性が示唆された。また、TESPEL のコールドパルス、EC 加熱の熱パルスの過渡応答解析を継続しておこなっており、高電子温度プラズマの詳細な輸送解析の手段として定着しつつある。

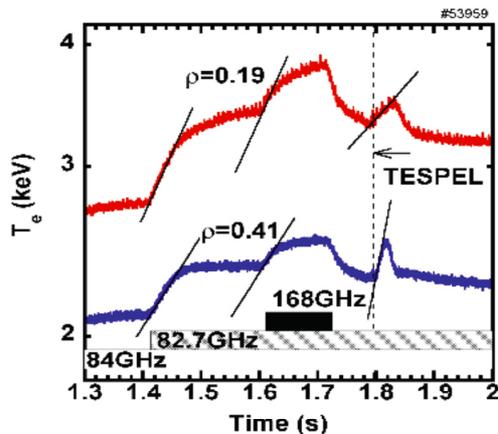


図 3.1.3-7 $\rho = 0.19$ (赤)と $\rho = 0.41$ (青)における ECH on 時と TESPEL 入射時の温度上昇率の違い

次に、高電子温度プラズマの電子温度分布の NBI 入射方向による違いを系統的に調べた。磁場の正転、反転、入射 NB の選択を行ない、異なる条件での NB ターゲットプラズマに対して局所的な中心 EC 加熱を行なうことで電子の輸送障壁様の構造形成が NBI 入射方向と磁場方向の相対的な関係(Co 及び Ctr)で異なることを確認した。磁場の正反や入射 NB の種類によらず、Ctr-NB 方向の場合には明らかな電子温度勾配のジャンプが $t = 1/2$ 付近にある。同様に、Co-NB 電流駆動の場合には明らかな電子温度勾配のジャンプがみられず、幅広い台形型の電子温度分布となることが確認された。

7) 波動加熱物理

高周波(ECH, ICRF)を用いた加熱、電流駆動法の高性能化とその実験的検証を目標とし、以下の実験テーマを提案した。ECH 関係では (1) 加熱の最適化として、入射偏波最適化、ミリ波吸収分布の実験的検証、(2) 新加熱法として、電子バーンシュタイン波加熱の試み、3 倍高調波加熱実験、(3) ECH を用いた電流駆動(ECCD)の実証、(4) ミリ波散乱計測やミリ波透過吸収測定である。ICRF 関係では (1) 加熱物理機構の一層の理解と高性能化、新加熱法の検証、(2) 高次高調波加熱や電子加熱法の実験的な試み、(3) 高エネルギーイオンの振る舞いと、それによる励起高周波の研究、(4) ECH、ICRF の重畳加熱効果、である。

ECH については第7サイクルに最適化できなかったアンテナ系(168 GHz #2, 84 GHz #4, 82.7 GHz #11 ライン)について入射偏波の依存性調査を行い、最適な入射偏波を決定できた。またその結果については、理論的に予想される偏光角とほぼ一致する結果が得られている。楕円度に見られる予想とのずれについては、プラズマ境界の位置に依存することがわかっており、今後詳細に検討してゆく必要がある。これによって最適偏光角の決定ができ、全システムについて高吸収効率でプラズマの加熱が実施できた。新たな試みとして、LHD の磁場配位において、高磁場側からの入射による基本波 X モード加熱、さらにその電子バーンシュタイン波へのモード変換を利用した加熱実験を行った。斜め入射により高磁場側からの入射となる配位を対象とした実験の結果、平均小半径 $\rho=0.5-0.7$ に局在した加熱が観測され (図 3.1.3-8)、入射モードによる吸収分布の違い、ターゲットプラズマの密度変化による吸収位置の変化が観測されている。電子バーンシュタイン波へのモード変換の可能性を示す結果が得られている。また、十分局在化した周辺加熱の可能性を示しており、今後局所周辺加熱実験の一つの手段として有望であると考えられる (京都大学:長崎百伸助教授)。

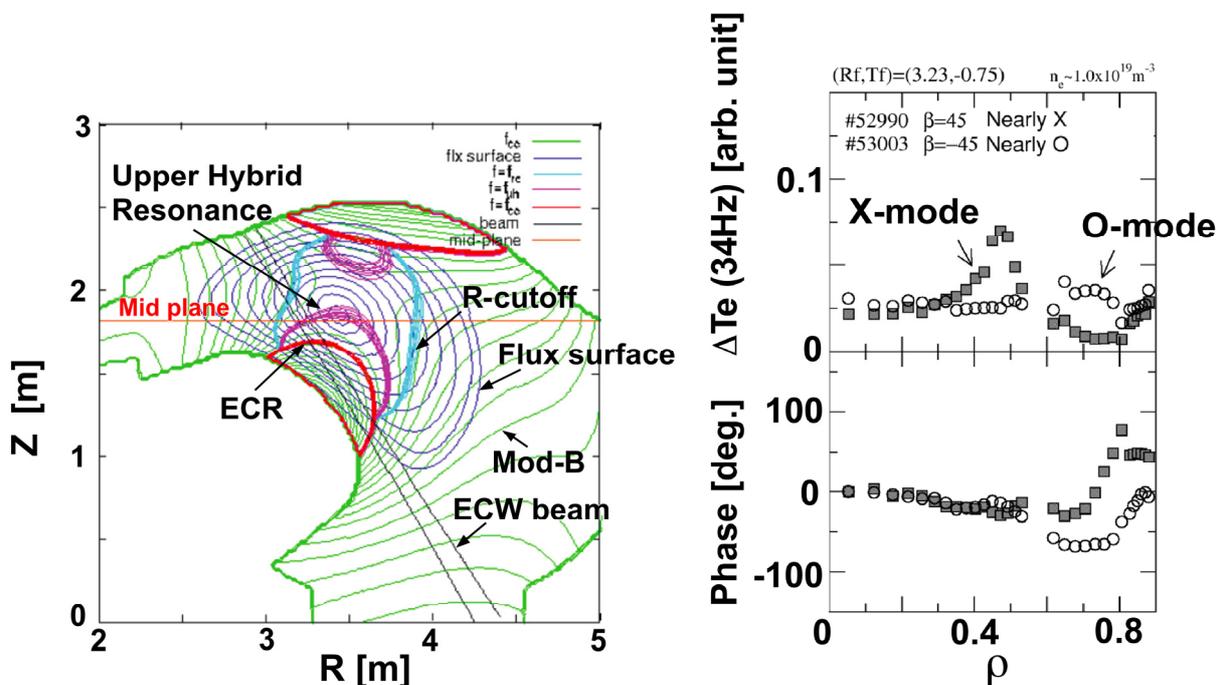


図 3.1.3-8 入射配位と電子温度上昇の空間分布 (フーリエ振幅)

8) 高イオン温度

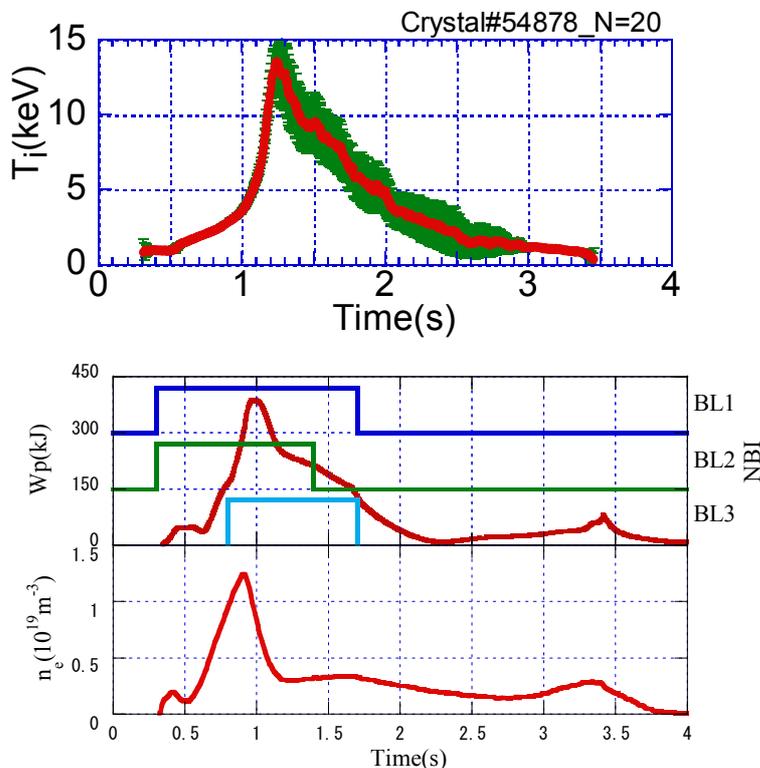
高イオン温度実験テーマでは大電力中性粒子入射加熱装置を用いた高イオン温度プラズマの生成、および高イオン温度プラズマの物理的特性を調べる事を目的としている。第8サイクルでは高Z放電による高イオン温度プラズマ生成実験、ならびに水素放電による高核融合積プラズマ生成実験を計画した。高Z放電プラズマではプラズマ閉じ込め磁場配位の磁気軸・磁場強度依存性およびECH重畳における相乗効果の検証を主眼とし、高核融合積プラズマ生成では高閉じ込め時間プラズマの定常維持を主眼においた実験を実施した。

(1) 連続ペレットによる高核融合積を持つ定常放電の達成

パイプガンペレットでは、高閉じ込め時間のプラズマが得られるが、過渡的であり定常維持ができない。そこで連続ペレットにより、高閉じ込め時間プラズマの定常維持を狙い、 $2.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$ の高核融合積を7.5秒間維持した。この値は今までの過渡的に得られていた $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$ (0.3秒間維持)とほぼ同等であり、ISS95 スケーリングの約1.5倍の閉じ込め時間となっている。この高核融合積は、連続ペレットによる密度の分布制御によるところが大きい。密度分布はペレット入射時にはホローとなり、その後ピークしていくので、密度分布をピークさせるには、ペレットの間隔をある程度長くする必要がある。しかしながら、ペレットの間隔を長くしすぎると、密度そのものが下がってしまう。したがって、密度分布のみが変化する時間にペレットの間隔とするのが最適であると考えられる。今回用いた、密度フィードバックは最適のペレット間隔を与えるものであった。

(2) 高Z放電による高イオン温度の達成。

高イオン温度プラズマの生成には中性粒子加熱入力パワーの増大ならびに閉じ込め性能の改善が重要になる。高エネルギービーム入射における、入射ビームの透過成分を小さくしプラズマへの加熱入力増加を狙い、アルゴン等を用いた高Z放電を行った。



の加熱入力増加を狙い、アルゴン等を用いた高Z放電を行った。図3.1.3-9に代表的な放電波形を示す。閉じ込め磁場強度は2.676 T、磁気軸3.7 mにおいて、 $t=1.2 \text{ s}$ からNBIの入射によってプラズマを生成し $t=0.5 \text{ s}$ からアルゴンパフで密度を上昇させる、密度の下降にともない急峻なイオン温度上昇が現れ $t=1.2-1.3 \text{ s}$ の間で最高イオン温度 $13.5 \pm 2 \text{ keV}$ のイオン温度を達成した。このイオン温度はピーク値であるものの昨年度までの 10 keV を大きく更新するものであり、また電子温度も 4 keV を超えて中心

図 3.1.3-9 高Z放電によるイオン温度プラズマ生成

部で平坦な分布を形成した。加熱入射電力値は 10 MW 程度で昨年の 12-13 MW よりは低くなっており、当該実験週における継続したネオン・アルゴングロー放電洗浄やチタンゲッターなどの壁コンディショニングがリサイクリングによる水素の混入を抑制し高イオン温度が達成されたと推測される。NBI 加熱解析コード FIT を用いた検討の結果では、高い温度を実現すべく低い密度のプラズマを生成した時にプラズマ内のアルゴンイオンの量がビーム吸収に大きく寄与すること、そのため大パワー注入を目論んで多量のビーム入射をするとビームによる水素成分が増えビーム吸収率が却って悪くなるが見いだされた。従ってターゲットプラズマのアルゴン純度を出来る限り上げることがキーポイントとなる。本実験結果はその考えに沿ったものである。(京都大学：村上定義助教授)

9) 電場と輸送障壁

電場と輸送障壁テーマでは、CXRS による電場計測を用いた電場制御、電子系内部輸送障壁 (ITB) 形成と電場構造との関連、重イオンビームプローブ (HIBP) の試験実験、非局所輸送の発現領域やその機構解明などの実験研究と、「非軸対称系配位における径電場構造」をキーワードとした理論予測・データ解析研究を組み合わせることで、LHD における径電場特性の解明・輸送機構の解明とそれに基づく閉じ込め改善シナリオの構築を念頭に研究を進めた。

衝突周波数を下げることにより、ヘリカル系における電場を制御し負電場から正電場に変化させる事は実験を行い、理論との比較を行った。第7サイクルでは、リップルの空間分布や磁気島の形成等、磁場構造を変えることにより、電場の正負のみならず電場シアを制御した。大きな電場シアを作るには、リップルの局在化や、磁気島のような特異点をプラズマ中に作る事が重要である事を指摘した。磁気軸をトーラスの内側に寄せる配位にする事により、リップルが大きい部分をプラズマの周辺部に局在させ、周辺部に大きな電場シアを形成した (京都大学：村上定義助教授、北海道大学：若狭有光氏)。

さらに、電場シア形成による閉じ込め改善研究への外部制御性のある実験的ノブの確立を目指し、LID コイル電流値の制御によって、磁気島幅を外部制御した上で、磁気島より内側にペレットを入射し、密度勾配の促進に伴うイオンルートでの電場シア形成を試みた。連続ペレット入射により、形成されたシアを維持させることができた。ペレット入射については、そのサイズの可変性に加えて、単一ペレット入射、連続ペレット入射の融通性が増しており、この高い融通性を活用した実験である。図 3.1.3-10(a)は、磁気島幅が大きい (LID コイル電流値=1920A) 場合に、ペレット入射により磁気島内側の密度勾配が増大することによって、大きな負電場が形成され、その結果、電場シアの形成に成功した例を示している。図 3.1.3-10(b)では、磁気島内側での電場の時間変化が示されている。パイプガンによる単一ペレット入射では一時的に負電場が形成される (緑) が、連続でペレットを入射すると、その負電場が維持され、それぞれのペレットの大小 (大：青、小：赤) に応じて、負電場・電場シア形成の時定数が変化する様子が示されている。密度勾配の形成時定数が異なるためと考えられる。

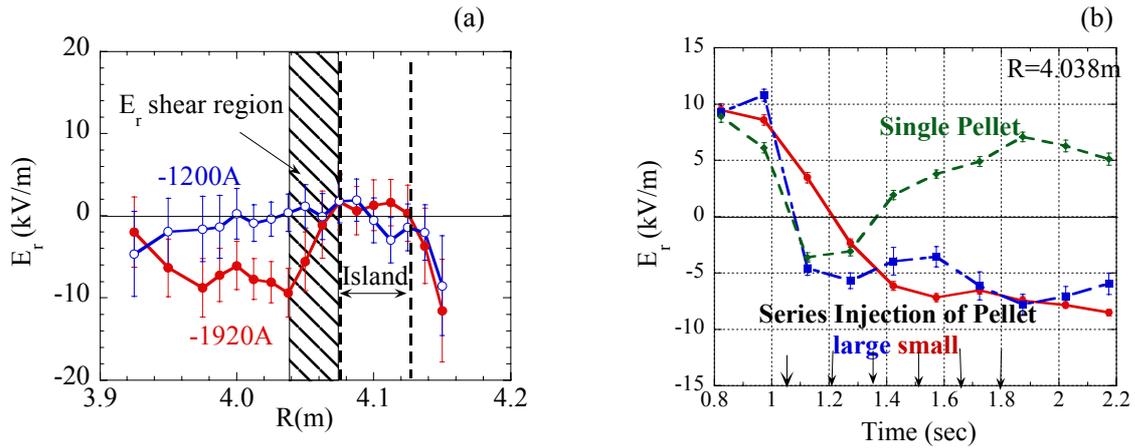


図 3.1.3-10 磁気島とペレットを用いた電場制御。(a)磁気島の幅による違い。(b) 磁気島内のペレット入射条件の違いによる電場の時間変化の違い

第8サイクルはHIBPシステム立ち上げの重要な段階である、プラズマからの2次ビーム検出、ポテンシャル計測可能性・範囲の評価を目標に掲げ、種々の調整作業を行ってきた。事前の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、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。これらの開発の結果、プラズマからの2次ビームの検出に初めて成功した。ポテンシャルという物理量に変換するにはさらなるハードウェア上の改良が必要ではあるが、ポテンシャル計測を行える可能性があることを示せた点で今サイクルの成果は非常に重要であると考えている。

第9サイクルでは、垂直NBIの導入により、CXRSによる電場計測が容易になるため、他の磁気軸位置での電子ITBの電場分布の測定を行い、系統的な実験データの蓄積が期待される。一方の新古典輸送解析についても、詳細な磁場構造を取り入れたコード開発が順調に進展しており、実験・理論解析の連携により、ヘリカル系における磁場構造(非軸対称性)と電子ルート遷移、それに伴う閉じ込め改善シナリオについて、実験検証が可能な状況に到達しつつあるといえる。

10) 高エネルギー粒子閉じ込め

高エネルギー粒子テーマでは、第8サイクルにおいて、下記2つの項目に注目して実験をおこなった。(1)ICRFによる高エネルギーテールの生成、(2)LHDにおける高エネルギー粒子閉じ込め特性の評価(東北大学:笹尾真美子教授)である。特に(2)については(a)高い高速イオンエネルギーを有したプラズマの生成、及びそのようなプラズマにおける高エネルギー粒子の振る舞い、(b)NB-blip法による高エネルギー粒子の定量評価、(c)PCX(Pellet Charge Exchange)による高エネルギー粒子のエネルギースペクトルの局所的な計測、に取り組んだ。

ICRF加熱による高エネルギーテール生成では、He放電によるICRF定常実験を2日続けて行うことによって、壁コンディショニングが十分に進み、少数Hイオン加熱シナリオでのICRF実験を順調に行うことが出来た。この結果、高エネルギーテールの生成に成功し、600~800keVの間の高エネルギー粒子の存在を観測することが出来た(図3.1.3-11)。今後は、更なるICRFパワー

の投入や、強磁場における第2高調波加熱などといった手法によってより高いイオンテールを生成することを目指す。

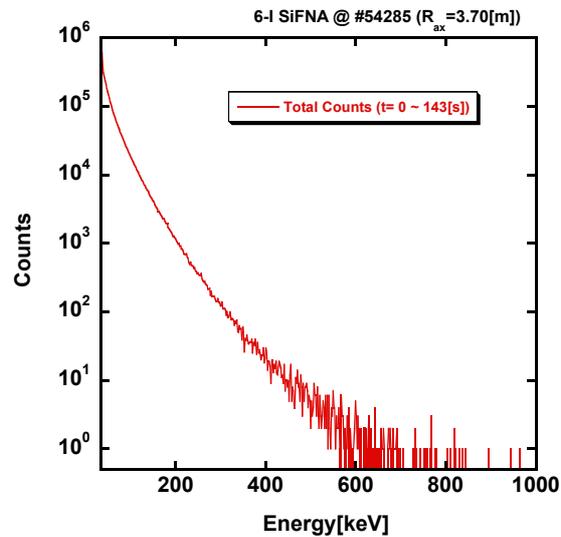


図 3.1.3-11 Si-FNA で観測された垂直方向粒子のエネルギースペクトル

TESPEL の溶発雲を利用した能動的な荷電交換中性粒子計測(PCX: Pellet Charge eXchange)が第8サイクルより開始され、NBI プラズマに対して計測を試みた。PCX 計測は、ペレット入射パスとほぼ一致する視線を持つ位置に中性粒子分析装置 (NPA) を配置し、TESPEL の入射に伴う中性粒子スペクトルの変化を利用して、能動的にプラズマ中のイオンのエネルギースペクトルを計測する手法である。ペレットはプラズマ入射後にプラズマ周辺から中心へと移動していくので、その溶発雲も時間とともに中心部へと侵入する。したがって、ペレット入射後に観測された中性粒子のエネルギースペクトルの時間変化は、ペレットのパスに沿った場所での高エネルギー粒子スペクトルの空間分布を表すこととなる。ペレット溶発雲の位置が周辺部から中心部へと行くに従って、得られるスペクトルの高エネルギー成分が増加した。これはプラズマが中心部に行くほど電子温度が高く、その結果、エネルギー減速時間が長くなり、高エネルギー成分が蓄積されやすくなるという古典的な解釈と一致する。今後は、ICH プラズマなどに適用し、高エネルギーテール成分の空間分布を局所計測し、テール生成のメカニズムの理解に役立て、更に LHD における高エネルギー粒子閉じ込めの評価を行う予定である。

3. 1. 4 装置工学実験研究からの成果

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る。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の信頼性向上の研究を行ってきた。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も進めている。平成 16 年度の研究テーマは次の通りである。

- (1) LHD 超伝導コイルの健全性確認
- (2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響 (AE) 信号を用いた機械的擾乱の診断 (成蹊大学：石郷岡猛教授)
- (3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定
- (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：濱島高太郎教授、山口大学：津田理助教授)
- (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：伊瀬敏史教授)
- (6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価
- (7) 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

これらの研究課題についての成果の概要を以下に述べる。なおテーマ 7 については第 8 サイクル終了後の加温前に実行するため、研究方法についてのみ述べる。

1) LHD 超伝導コイルの健全性確認

プラズマ実験に提供する磁場配位を作る試験通電をプラズマ実験開始前に行い、超伝導コイルシステムが健全であることを確認した。システムの健全性は、2)で述べるバランス電圧測定、AE 測定、そして(3)で述べるひずみ測定によって検証した。第 8 サイクルにおいても 2004 年 9 月 10 日から 16 日の通電試験において健全性が確認され、プラズマ実験が予定通りに開始された。

2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響 (AE) 信号を用いた機械的擾乱の診断

2.1) はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) の超伝導コイル群では、励磁に伴って各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。これまでヘリカルコイルで観測されるスパイク信号に対して「パルス波高解析」を適用することによる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。昨年の第 7 サイクル実験からは、ヘリカルコイル容器に AE (音響) センサーを取り付け、励磁に伴って発生する AE 信号の測定を開始した。バランス電圧の冷却サイクルに伴う推移や、AE 信号との対比を調べた結果について以下にまとめる。

2.2) バランス電圧信号の冷却サイクルに伴う推移

励磁に伴って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の総和を励磁履歴に対して調べると、図 3.1.4-1 に示すように、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することがわかる。これは巻線のトレーニング効果を表しているものと解釈できる。また、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。

2.3) AE 信号とバランス電圧信号の比較

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 信号の測定を開始した。ヘリカルコイル容器の 4 カ所に AE センサーを取り付け、エンベロープ信号をサンプリング周波数 10 kHz で取得した。測定信号の 1 例を図 3.1.4-2 に示す。図 3.1.4-2 には、ヘリカルコイルのバランス電圧信号について、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。

一方、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、図 3.1.4-3 に示すように 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た。

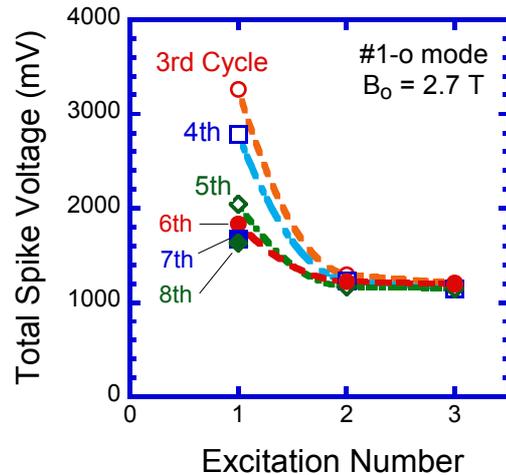


図 3.1.4-1 ヘリカルコイルのバランス電圧スパイク信号の総和を励磁履歴

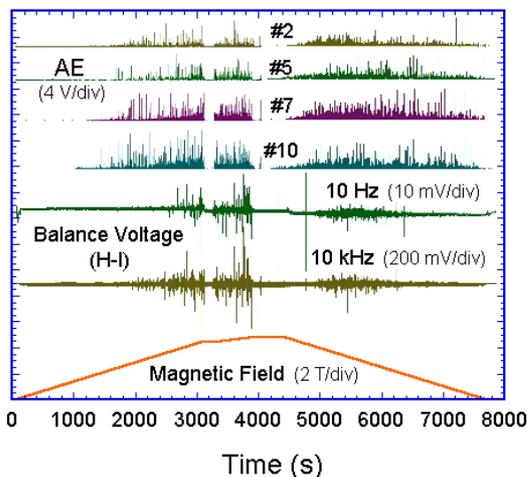


図 3.1.4-2 ヘリカルコイルのバランス電圧信号と AE 信号

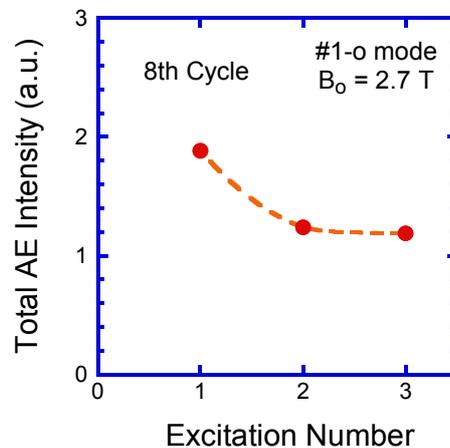


図 3.1.4-3 第 8 サイクルにおける励磁回数に対する AE 信号の変化

3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定

LHD 電磁力支持構造物は超伝導コイルとともに 4.5 K に冷却され、巨大な電磁力を支持している。材料は板厚 100 mm の SUS316 鋼である。LHD 建設時に電磁力支持構造物の内側及び外側赤道面に、各 10 箇所、ひずみゲージを貼付しており、その出力を実験サイクル毎に点検し、異常の有無を検討している。励磁によって渦電流が発生し、SUS316 鋼の温度が上昇するが、0.02 T/min

という低速励磁では、温度上昇は起こらない。液体ヘリウム供給元の圧力変動による温度変化は0.03度程度である。図3.1.4-4に2000年10月4日の測定結果と2004年11月24日の測定結果とを比較して示す。両者は最小分解精度 ± 3 デジット以内（1デジットは 2.5×10^{-6} ひずみに相当する。）にあり、有意な差は認められない。図3.1.4-5は過去8回のポロイダル方向ひずみの計測結果をまとめたものである。横軸はセクター番号で、10セクターの内側赤道、外側赤道での測定結果である。各測定位置でひずみの絶対値は異なるが、これはポート形状などが異なるためである。しかし、いずれの位置においても、測定値は最小分解精度 ± 3 デジット以内にある。トロイダル方向ひずみの計測結果もポロイダル方向ひずみと同じ傾向を示している。これらのことから、建設から8年経過したひずみゲージは依然として正確に動作しており、かつ、電磁力指示構造物の赤道面付近の溶接部は健全であることが分かる。

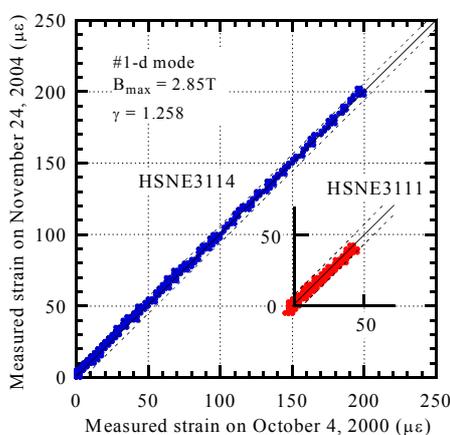


図 3.1.4-4 2000年10月4日の測定結果と2004年11月24日の測定結果の比較

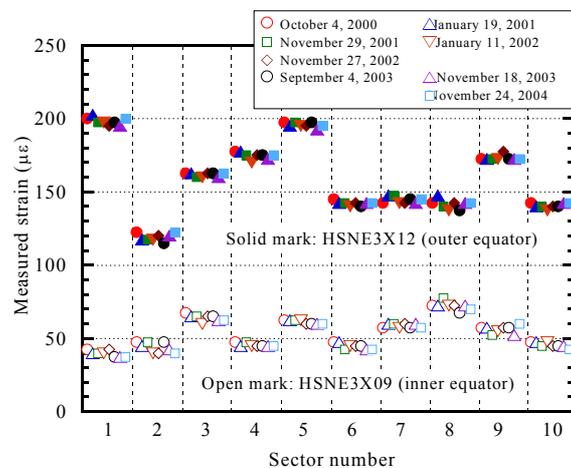


図 3.1.4-5 5年間のポロイダル方向のひずみ測定結果（内側赤道と外側赤道）

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

4.1) はじめに

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、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ている。この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、定量化には至っていない。本研究では、CIC 導体を用いている LHD ポロイダルコイル（IS コイルおよび OV 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た。

4.2) 測定方法

図 3.1.4-6 に LHD の断面図とホール素子の取付け位置を示した。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た。上側コイルと下側コイルに180度方位を変えて2カ所ずつに素子を取り付けた。測定した磁場の方向は一軸で鉛直方向である。観測は、通常のプラズマ実験期間に連続して行う。また IS コイルと OV コイルのみで通電する特別な通電実験も実施した。

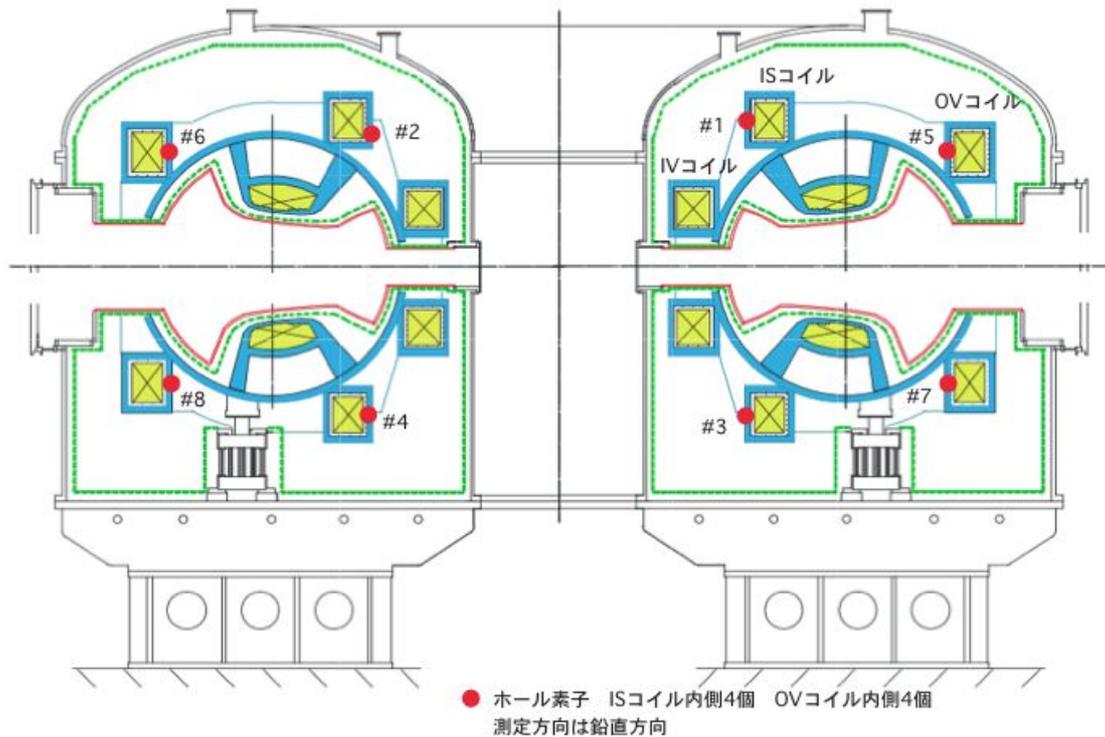


図 3.1.4-6 LHD の断面図とホール素子の取付け位置

4.3) 実験結果

図 3.1.4-7 は今回の典型的な測定データである。IS コイルに 14 kA (OV コイルに 4.6 kA)を通電し、1 時間保持した後、減磁した。減磁が終了し、電源とコイルを切り離れた後の磁場の変化を図 2 に示した。電源と切り離されているにもかかわらず、磁場の変化が観測された。その変化を指数関数を用いてフィッティングした曲線を、図の中に同時に示した。測定磁場のオフセットには、素子自身のオフセット、アンプのオフセットに加え、減衰が見られない残留磁場が総合的に含まれている。そしてフィッティング曲線の減衰時定数は約 2000 秒であった。LHD ポロイダルコイルにおいても、これまでの観測例と同様の長時定数成分が存在することが確認された。さらに非通電時だけでなく、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、磁場の微小変化は観測された。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。従って超伝導性に関係した結合電流ループに起因していると考えられる。

今回の装置工学実験で新たに分かったことは、通電を保持する時間が長いと、減磁後に観測される変化の時定数も長くなるということである。IS コイルについての結果を図 3.1.4-8 に示した。いずれも IS コイルを 14 kA まで通電した後の、残留磁場の変化時定数を示した。ホールド時間がゼロの場合 (三角波通電) は、時定数は 500 秒程度である。一方、ホールド時間を 1 時間にすると時定数は 1000~2000 秒に増大した。この現象から結合電流ループの時定数は一つではなく、広く分布していることが分かった。今後はさらに、電流ループの経路を詳細に調べる予定である。

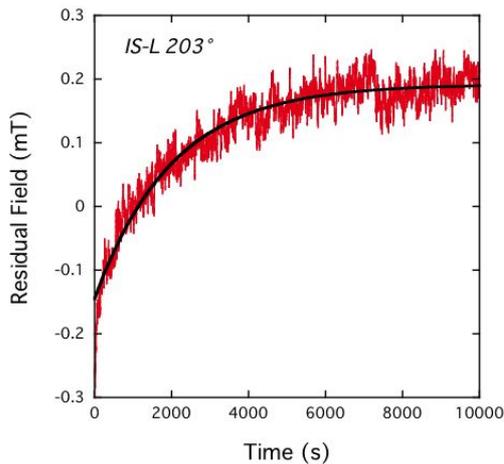


図 3.1.4-7 IS コイルを 14 kA から減磁した際の残留磁界の変化

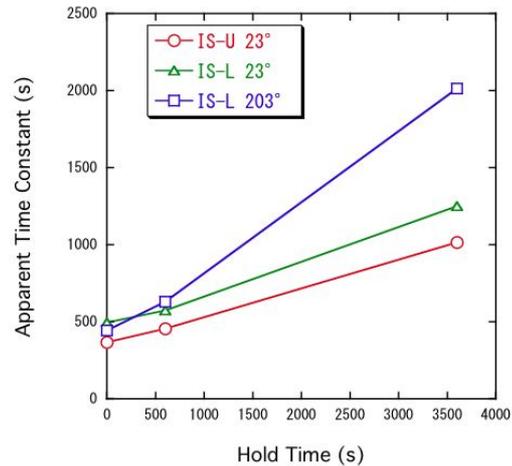


図 3.1.4-8 IS コイルを 14 kA まで通電した後の、残留磁場の変化時定数

5) 超伝導コイル電源の電流制御

5.1) 研究の目的

核融合プラズマ実験装置用超伝導コイル励磁電源には所定の実験条件を達成するために下記の条件が要求される。また、将来の核融合装置においても同様の条件が予想される。

- ・ 所定の精度でコイル電源を制御できること
- ・ 所定の動的制御が可能であること
- ・ システムパラメータの変動、外乱に対して頑強、安定であること
- ・ 超伝導コイルシステムに与える擾乱が少ないこと

本研究はこれら条件を満たす電流制御システム開発を目的としている。

5.2) これまでの成果

前サイクルまでに、 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。その過程で、以下に示す制御システムを開発した。

- a) 超伝導コイル電流のみを検出し使用する制御系
- b) プラズマ電流も検出し、制御擾乱を抑えた制御系
 - b-1) プラズマ電流に関わらずコイル電流を一定とする制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が一定に保たれるが、コイル電圧は大きく変動し、特にプラズマ電流が急速に減少したときの動揺が著しい。

- b-2) プラズマ電流による鎖交磁束変化を抑制する制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が変化するが、コイル電圧の変動は少なく、プラズマ消滅時の擾乱も小さく抑え得る。

5.3) 本年度の計画および成果

前年度までの実験で、プラズマ消滅時の信号が過大となる結果、制御系に擾乱が入るという問題があった。そこで、本年度は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。

実験結果を図 3.1.4-9 と 3.1.4-10 に示す。図 3.1.4-9 (a)は電流一定制御時のコイル電流および電圧、(b)がこのときのプラズマ電流である。プラズマ実験中もプラズマ電流変化率に対抗するコイル電圧が発生し、コイル電流を一定に保っていること、プラズマ消滅時の電圧もコイル電源定格以内であってその後に擾乱は生じていない。本実験では、プラズマ電流が低めであったことから、擾乱抑制効果のうち非線型フィルタによる割合の同定は困難である。しかしながら、本制御システム自体は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。図 3.1.4-10 は磁束一定制御時のコイル電流、電圧およびプラズマ電流である。フィルタ回路周辺のオフセット除去が不完全なため、コイル電流にドリフトが生じた。プラズマ生成消滅前後を通して、過大な電圧は発生していない。今後は、フィルタを含めたパラメータの最適化、非線型制御の検討、従来の P 制御への技術移行を検討予定である。

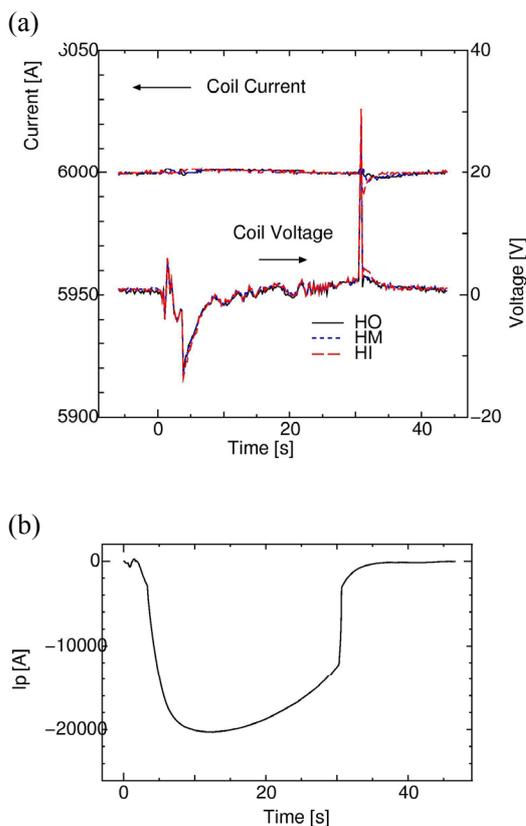


図 3.1.4-9 コイル電流一定制御の実験結果
(a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

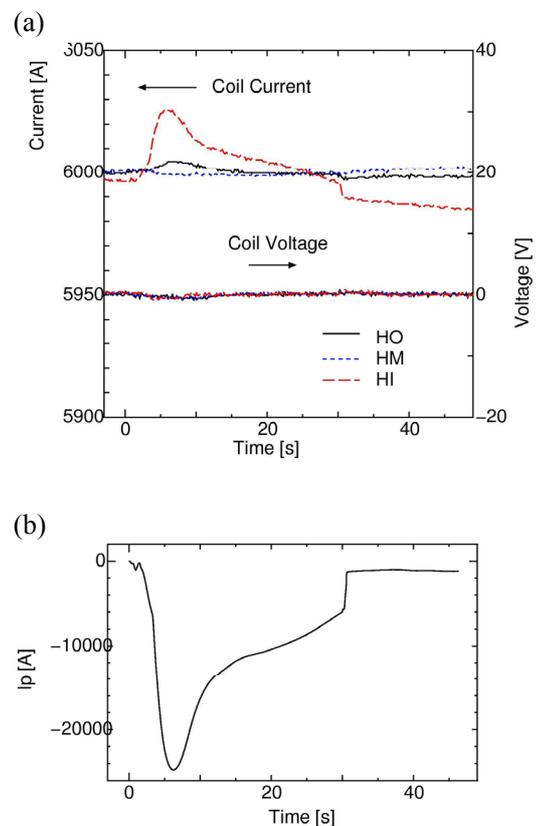


図 3.1.4-10 鎖交磁束一定制御の実験結果
(a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価

ヘリカル型核融合実験装置あるいは核融合炉においては、閉じた磁気面を形成する精度良い超伝導コイルシステムが必要である。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った。

コイル対の単体励磁実験結果から、コイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々(例えば、OV 上、OV 下)と、別のコイル対(例えば HI コイル対)との相互インダクタンスの誤差は $\Delta M \sim 0.3 \text{ mH}$ 程度であった。線電流近似による簡易的なインダクタンス計算より、前記相互インダクタンス誤差は

剛体的な位置不整を想定する場合、 $\sim 1\text{ mm}$ の位置ずれに相当する。ナチュラル・アイランドの原因になるような 8 mm 程度の剛体的な位置不整、言い替えればコイル中心位置不整および傾きは存在しないことが推定される。

本サイクルでは LID コイル群(A 電源系統、B1 電源系統、B2 電源系統)とコイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々との相互インダクタンスの違いも評価している。この場合の ΔM は最大で 0.03 mH 程度であった。現在、超伝導コイル間のバランス電圧のアンバランスとしては観測されない超伝導コイルの非等方性変形の可能性も視野に入れて、実験データを分析している。

7) 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

LHD 電磁力支持構造物の冷却方式は、二相流ヘリウムによる 20 並列の強制冷却であるが、その熱特性は詳細には調べられておらず、また二相流の冷媒流量の配分など、最適な冷却条件についても研究がなされていない。そこでまず、第 7 サイクルでは電磁力支持構造物の冷媒を 2 時間停止して再開する実験を行い、各並列流路および電磁力支持構造物の温度上昇および冷媒供給再開後の温度不安定の有無を調べた。その結果、次のことが分かった。

- (1) 電磁力支持構造物の温度上昇から定常熱負荷の概算が可能である
- (2) 現状の冷媒流量においては並列流路間の温度不安定性は生じない (小さい)
- (3) 各流路には固有の周期の温度振動が観測されるが、 1 K 以内の振動であり許容されるレベルである。

第 8 サイクルにおいても、電磁力支持構造物の平均冷媒流量を変えた場合の各部の温度および超伝導コイルの熱負荷の変化を定量的に調べる。そして、さらに最適な冷媒流量を評価すると共に並列流路の温度不安定性が抑制される機構について理解を深める。実験はプラズマ実験が完了する時期に行う予定である。

8) まとめ

装置工学実験では、大型超伝導コイルシステムの健全性、信頼性を確認する手法として、バランス電圧測定、ひずみ測定を継続的に行ってきた。第 8 サイクルにおいてもシステムの健全性が確認され、プラズマ実験に必要な磁場を提供することができた。また新たに音響(AE)測定を導入し、より正確に健全性を実証する研究を開始した。

大型超伝導コイルで初めて確認された残留磁場の変化は、コイルシステムの性能に影響を与えるものかどうか調査する必要がある。新しい電源制御技術は、プラズマの高性能化に直結する可能性があるため、早急な開発が望まれる。その他、コイル位置精度を評価する手法、ヘリウム冷却の最適化など新しい研究も開始された。

3. 1. 5 今後の計画に向けた準備研究

1) LHD ヘリカルコイルの過冷却改造計画

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）で運転されている。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が計画されている。

現状は圧力 0.12 MPa の飽和ヘリウム (4.4 K) で冷却されている。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 通りが比較・検討され、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な後者の方式が選択された。図 3.1.5-1 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的能力で供給可能な 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、この場合のヘリカルコイルの平均温度は約 3.5 K となる。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が実施された。

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が新しく準備された。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 $I_{(mp)*}$ (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。これらの結果を用いて評価すると、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。

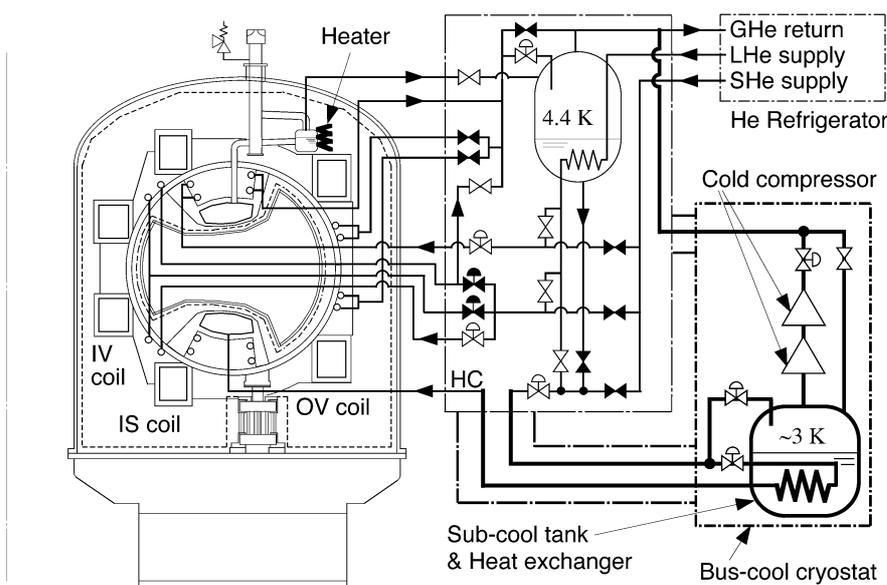


図 3.1.5-1 過冷却改造計画

図 3.1.5-1 過冷却改造計画

2) 低エネルギー中性粒子ビームによる加熱・計測計画

LHD では主加熱として 180 keV 軽水素中性粒子ビーム入射(NBI)を採用している。接線入射を実現させるため高いビームエネルギーを選択し、負イオン方式という先進加熱法を開発しながら 10 MW 級の加熱を実現させ、プラズマ生成から高密度、高ベータプラズマ生成に至るまで大きな貢献をしてきた。しかしながらビームエネルギーが高いため加熱対象は主としてプラズマ電子となり、トカマクで実現されているような高イオン温度プラズマ生成には不向きである。そのため LHD ではプラズマを価数の高いネオンやアルゴンとしてビームが直接イオンを加熱する割合を増やすことで 10 keV を越えるイオン温度を持つプラズマを実現させた。この結果はイオン 1 個当たりの加熱パワーで考えると現在の水素プラズマで実現されているイオン温度の延長上にあり、水素プラズマに於いてもイオン加熱入力を増加させることにより高イオン温度実現が可能であることを示唆している。

NBI を用いてイオン加熱を行うためにはビームエネルギーを低くしなければならないが、大パワーを効率良く入射するには正イオン方式でビーム電流を大きく取り、かつ垂直入射を行う必要がある。LHD に於ける垂直入射に対しては高エネルギーイオン閉じ込めが悪いことが懸念され接線入射が選択された経緯があるが、これは当時の標準磁場配位に対してであり、その後磁気軸を内寄せすることにより高エネルギー粒子の良好な閉じ込めと MHD 安定性が両立することが明らかになった。実験的にもイオンサイクロトロン共鳴帯加熱時に 600 keV に及ぶ高エネルギーイオンが磁場垂直方向に観測されており、数十 keV 程度のイオンのプラズマへの垂直入射は現実的であると考えられるに至った。一方、垂直に中性粒子ビームを入射できれば、これまで得られなかったプラズマ中心から周辺に至るイオン温度空間分布を荷電交換分光法により測ることが出来る。特に低エネルギービームの導入は炭素イオンとの荷電交換断面積を大幅に改善し、測定のス/N比を上げる。これによりイオンエネルギー輸送や電場に関する詳細な研究が期待できる。

このように低エネルギーNBIを導入することは高イオン温度プラズマ研究を進める上で加熱・計測両者の立場から大きなメリットを持つ。そこで LHD では 40 keV の軽水素中性粒子ビームを

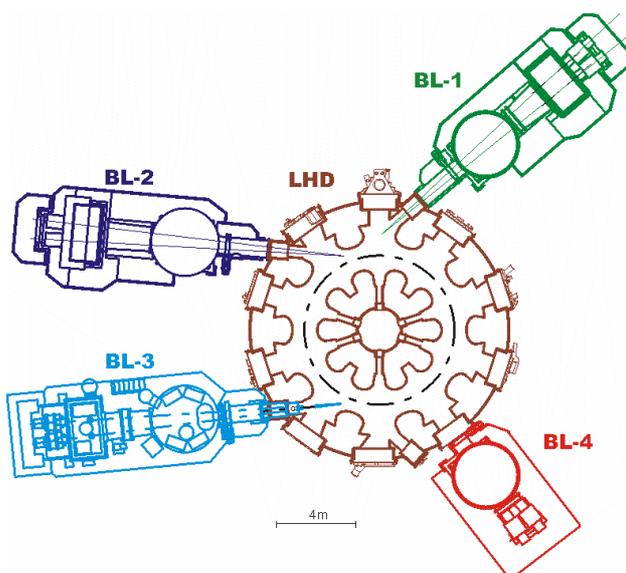


図 3.1.5-2 NBI ビームライン配置図。BL-4 が今回新たに設置を予定。

入射するシステムの準備を開始し、平成 17 年度の第 9 サイクル実験から稼働させる目標で進めている。具体的には図 3.1.5-2 に示す 5-O ポートにビームラインを新たに設置する。入射パワーは 2 台の正イオン源を用いて 3 MW を目指すが、ビームラインは将来的にあと 2 台のイオン源増設を考慮して設計している。パルス幅は定格パワーで 10 秒であるが、低パワーでは他のビームライン同様長時間運転にも対応させる予定である。

3. 2 CHS 実験

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いる。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研究を行っている。昨年度の研究成果としては、特に重イオン・ビーム・プローブ計測による帯状流の観測と、新しい閉じ込め改善モードの発見に限って実験結果を解説する。

CHS では、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。特にヘリカル系閉じ込め研究において重要な要素である電場の構造に関しては、プラズマの全領域を広くスキャンできる能力と高速の時間応答性能を活かして、遷移現象の空間構造を解明する研究を精力的に行っている。電場の物理は多くの現象において、新古典輸送モデルで解釈できるものが多いが、高温プラズマの閉じ込め研究での最重要課題と考えられている乱流輸送の研究では、揺動の空間分布とその相関係数の測定を行うことが物理過程の理解のために不可欠なものとなる。この目的を強く意識して、CHS では世界に先駆けて二台の HIBP を用いた揺動研究を行っている。図 3.2-1 に、二台の HIBP によるプラズマ中電場の測定の方法を模式的に示す。HIBP は二台ともほぼ同型のものであり、1/4 トーラス (90 度) 離れた場所に設置されている。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の差からその場所での電場の値が得られる。

図 3.2-2 は密度 $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 1.5 keV、イオン温度 0.1 keV のプラズマを測定して得られた、電場の揺動のパワースペクトルと、1/4 トーラ

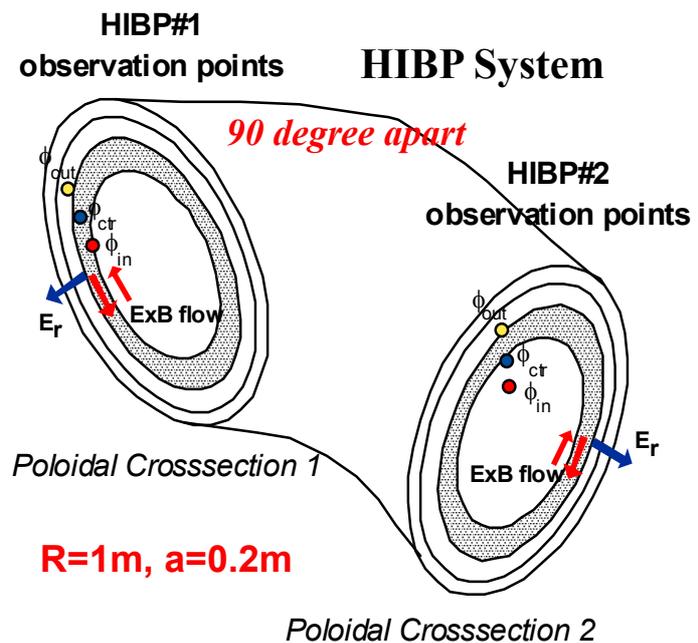


図 3.2-1 二台の HIBP 測定器の配置

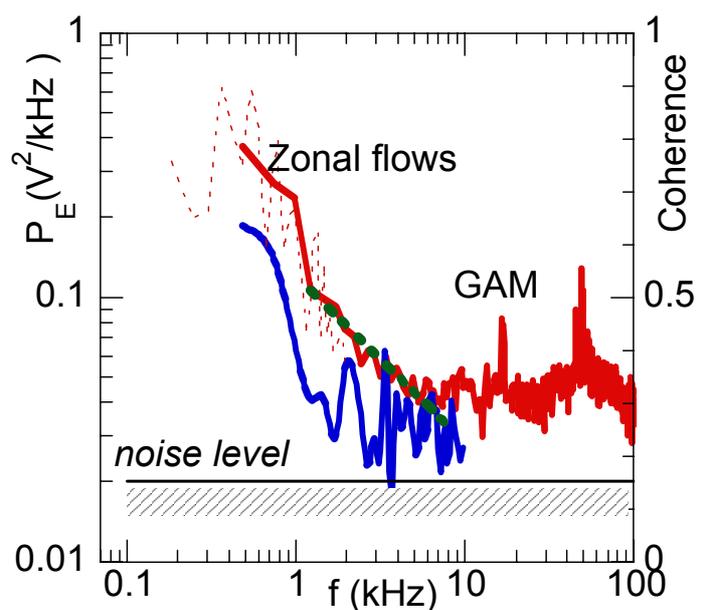


図 3.2-2 電場揺動のパワースペクトルと相関係数

離れた二点間のコヒーレンス（相関係数）の周波数依存性を示す。測定された二点は同一磁気面上にあり、規格化小半径が約 2/3（平均小半径は 12cm）の位置である。赤で示したトレースがパワースペクトル（単位は V^2/kHz ）で、周波数が 1 kHz 以下の低周波数部に大きな振幅を持っていることが示されている。青で示したトレースは二点で測定された揺動の相関係数であり、1 kHz 以下にある大きな振幅の成分が強い相関を持っていることがわかる。この空間的に大きなスケール長を持った電場の低周波揺動が、トーラスの乱流輸送研究で大きな興味を引いている（低周波）帯状流と考えられ、さらに後述するような特徴的な構造の測定結果から、その存在を実験的に検証したものとして国際会議などにおいても注目を浴びている成果である。赤のスペクトルのトレース上で、16 kHz 近辺にある鋭いスパイクは GAM 振動(Geodesic Acoustic Mode)と呼ばれる帯状流の一種であると考えられるが、この成分については測定が比較的容易なためにこれまでも部分的な測定例が存在する。しかし電場構造の長距離相関を明確に示した結果は、やはり CHS が最初の例である。

次に電場揺動の空間構造を直接的に示すデータを示す。図 3.2-3 の上の絵は、同一磁気面状の 1/4 トーラス離れた二点で測定された電場の時間変化を重ねて示す。ほとんどトレースが重なっていることは、揺動電場の構造が磁気面上で均一であることを示す。フーリエ・モードでは、 $m=0, n=0$ と表現され、この構造は帯状流特有のものである。1/4 トーラス離れた点ではあるが、0.5cm 離れた隣り合った磁気面上の揺動電場を測定すると図 3.2-3 の下の絵のようになる。すなわち、電場の向きがちょうど反対になったまま振動していることがわかる。局所的な電場の値は、その場所でのプラズマの流れの向きを示しているが、この測定結果は 0.5cm 離れた磁気面上で逆方向のプラズマの流れが存在していることを示している。この構造を特徴的に名付けたものが、帯状流（あるいは層状流）の名前の起源である。隣り合う磁気面に対して、この電場の向きの変化の構造を測定したものが図 3.2-4 である。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電場揺動の位相の構造を測定している。まさに帯状（層状）の構造を持っていることが明確に示

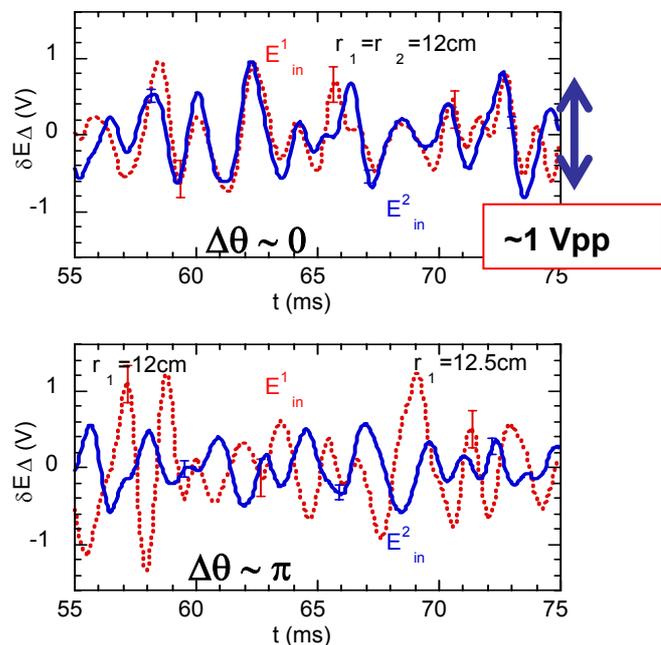


図 3.2-3 電場揺動の時間変化と相関

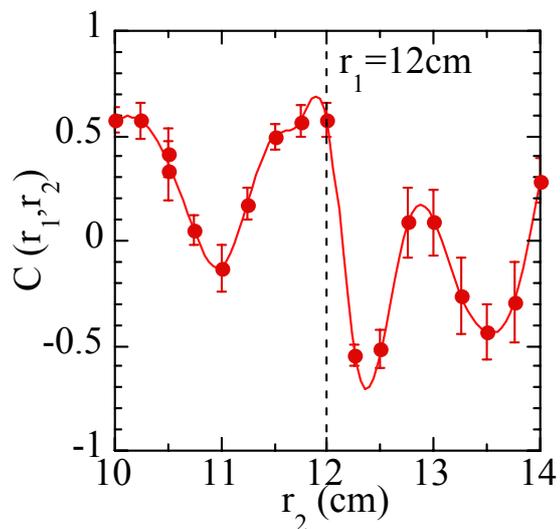


図 3.2-4 電場揺動の位相の空間分布

されている。位相の変化する特徴的な長さは約 1.5cm となっているが、この長さはイオン・ラーマー半径の 6 倍程度であり、この値も帯状流の理論から予測されるものに近い。

以上述べた低周波電場揺動の詳細な構造測定から、CHS での二台の HIBP による測定が、世界で最初の帯状流の実験的な検証として認められた。

CHS ではここ数年にわたって内部輸送障壁の研究で大きな貢献をしてきているが、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 CHS 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。今回の 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、加熱入力の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 3.2-5 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の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 3.2-6 には、図 3.2-5 の中で矢印によって示された、遷移の直前と直後での電子密度・温度の分布の変化を示す。遷移によって周辺部の密度が急激に上昇し、プラズマ境界部に粒子輸送に対する輸送障壁が生成されたことがわかる。それに対して温度分布には大きな変化が見られない。この境界部輸送障壁による周辺密度分布の変化は、リチウム・ビーム・プローブ計測、ビーム発光分光計測 (BES) などによっても確認されている。

図 3.2-5 に示した ETB 放電では、温度分布の変化が見かけ上無いようにみえるが、周辺部での密度上昇の結果としてエネルギー輸送の改善は得られている。CHS 実験では、さらに (見かけ上の) 温度の上昇を伴う ETB 放電も見つかっている。図 3.2-7 はその一例であり、やはり ECH プラズマに NBI の追加加熱を行った放電であるが、図 3.2-8 に示したように、遷移の前後での電子密度・温度の分布の変化では、図 3.2-6 と大きく異なって中心部での温度上昇が観測されている。境界部輸送障壁と内部輸送障壁が同時に達成された放電と見ることができる。密度分布は遷移前からかなり中心部で減少するホロー分布となっていて、このことが遷移による温度上昇のための条件の一つになっていると思われる。図 3.2-7 に見られるように、この遷移の起きる時点では ECH 加熱は完全に終了していて、電子温度の上昇には ECH は寄与していない。これまで CHS 実験 (また世界の多くのヘリカル系装置) で観測されてきた内部輸送障壁の生成は、常に ECH 加熱が加わった条件で観測されており、従って密度領域は $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ を越えることは無かった。図 3.2-6 の放電は密度がはるかに高い領域で中心部の輸送改善が観測されており、今後の新しいパラメータ領

域での閉じ込め改善につながる可能性を持っている。

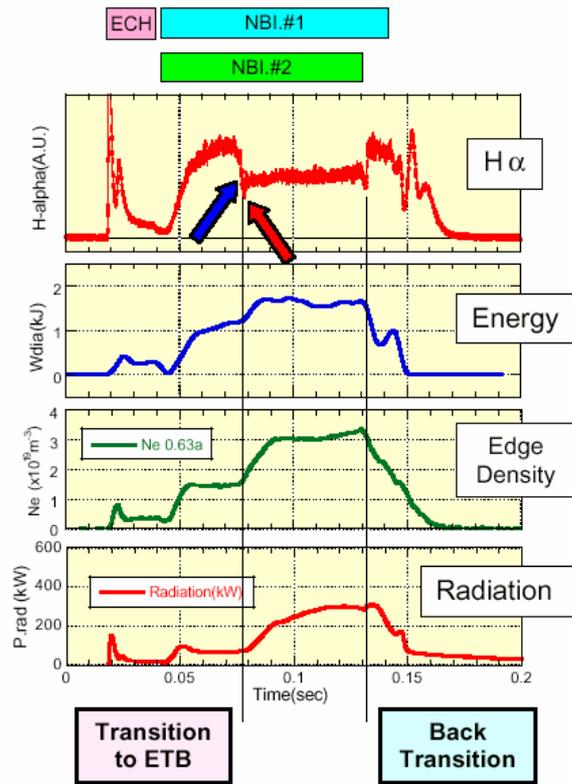


図 3.2-5 ETB 放電の時間発展

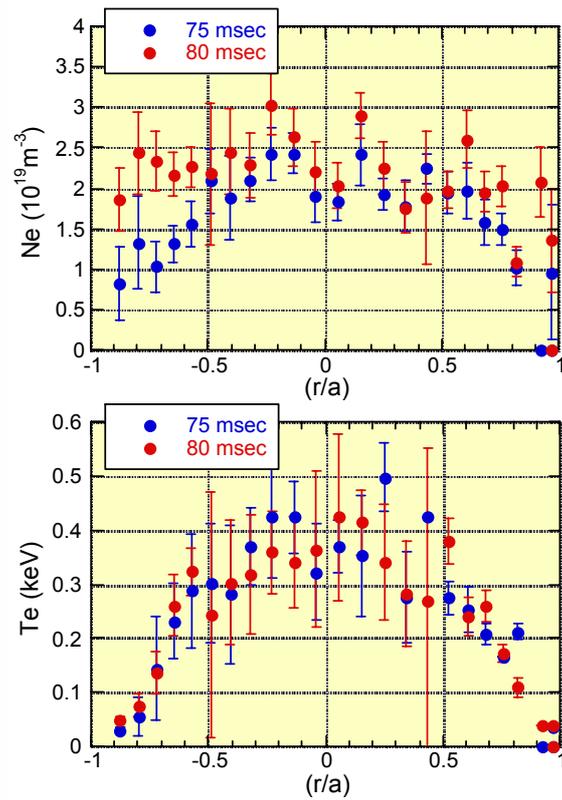


図 3.2-6 電子密度(上図)・温度(下図)分布

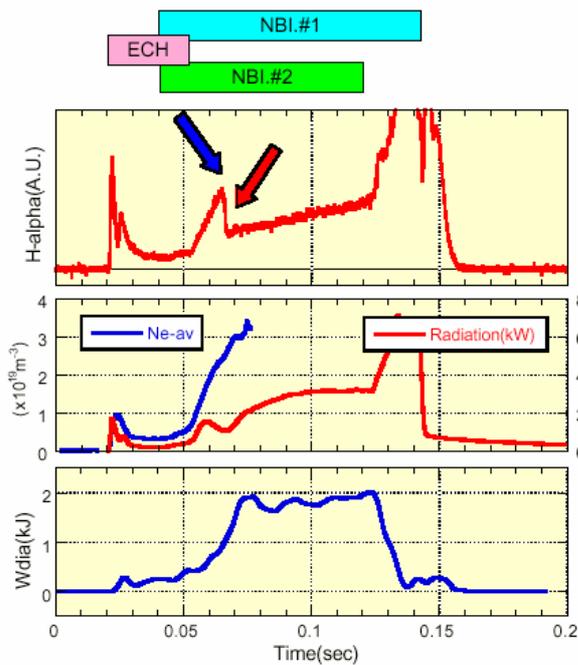


図 3.2-7 温度上昇を伴う ETB 放電

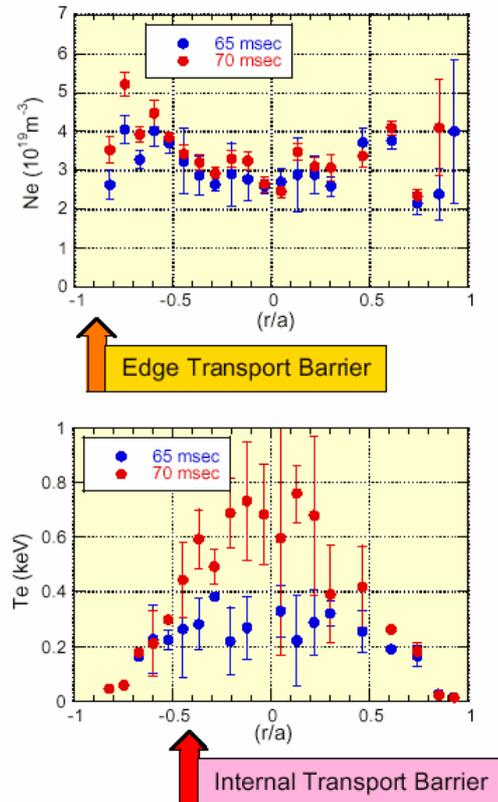


図 3.2-8 境界部輸送障壁と内部輸送障壁の同時達成

3. 3 理論・データ解析研究

1) はじめに

LHD などヘリカル系プラズマ実験の進展に伴って、豊富な物理内容を含む大量の実験データが蓄積されてきている。理論・データ解析研究系では、実験グループとの協力の下に、これらの実験データに含まれるプラズマ閉じ込めに関する個々の物理機構を理論的観点から解明するとともに普遍性の視点から整理し、さらにはより良い閉じ込め状態実現への道筋を指し示すことを目的として研究を行っている。理論研究者が LHD 実験へも積極的に貢献し、また実験研究者と理論研究者の間の円滑なコミュニケーションの橋渡し役を勤めるため、LHD 実験テーマリーダー、サブリーダーに理論研究者が 2 名（理論データ解析研究系から 1 名、大学から 1 名）加わっている。研究の組織体制としては大規模シミュレーション研究を推進する理論・シミュレーション研究センターとの協力を重視している。また、大学の研究者との共同研究も推進している。協力体制を実質的なものとするために、研究テーマごとにこれら二つの理論・シミュレーション研究組織や大学の研究者を横断する形で研究者を組織化し研究を進めている。研究テーマとしては現在、磁気流体グループ、高エネルギーグループ、プラズマ輸送・乱流グループ、粒子コードグループ、周辺とダイバータグループ、可視化グループを組織化している。協力関係は自然な形で研究者の間にすでに浸透している。これら組織体制の詳細は、シミュレーション研究の成果報告書の方に述べられている。また、LHD 理論・データ解析研究はこのような協力体制の下におこなわれているため、成果はシミュレーション研究からの成果と重複する部分が多い。以下に LHD 実験に直接関係した 16 年度の主な成果報告を新古典輸送、MHD、運動論的輸送、高エネルギー粒子、ダイバータプラズマ、粒子軌道に分けて述べるが、シミュレーション研究成果報告に示されていない部分を中心に、重複する部分は簡潔に述べる。

2) 16 年度の研究成果

a) 新古典輸送

a-1) LHD 新古典輸送の解析

ヘリカル系において、磁場構造の非軸対称性に起因する低衝突周波数領域での新古典リップル輸送($1/\nu$ 輸送)の存在によって両極性径電場が負（イオンルート）あるいは正（電子ルート）の値をとりうるということが理論的に予測され、これまでの LHD 実験においても径電場遷移の密度・温度閾値などがこの概念によって定量的にも説明できるという知見が蓄積してきている。一方、径電場シアを大きくすることでの乱流輸送抑制の概念もトーラスプラズマ一般に広く認知されており、LHD においてもこのアプローチでの閉じ込め改善志向実験が試され始めている。

径電場シア増大の手段の一つとして冒頭に記した、ヘリカル系特有の新古典輸送に起因する径電場遷移機構を利用することが考えられるが、その基礎的知見を得るために、径電場構造（分布）と磁場構造との関連を探る実験が、2004 年度「電場と輸送障壁」テーマ枠（横山：サブリーダー）で行われた。一連の磁場配位・密度スキャン実験において、磁気軸内寄せ配位においては電子ルートへの遷移が比較的周辺部のみで観測され、周辺部で大きな径電場シア形成が可能であり、磁気軸外寄せ配位にするにつれて、その電子ルート領域が中心部まで広がっていくという観測結果が得られた。この結果の理論的解釈のために、各種の新古典輸送コード GIOTA（ドリフト運動論に基づく数値手法）、GSRACE（バウンス平均法）、DCOM（モンテカルロ法）をそれぞれの適用

範囲、特長を踏まえた上で用い、下記のような系統的計算を遂行した。径電場遷移の背景機構として重要な新古典リップル輸送のレベルについて、その磁場配位依存性を系統的に把握するためには、リップル輸送の指標としての「実効ヘリシティ」を高精度に評価することが必要不可欠である。この目的のために、GIOTA コードと DCOM コードでの評価値のベンチマークを、真空磁

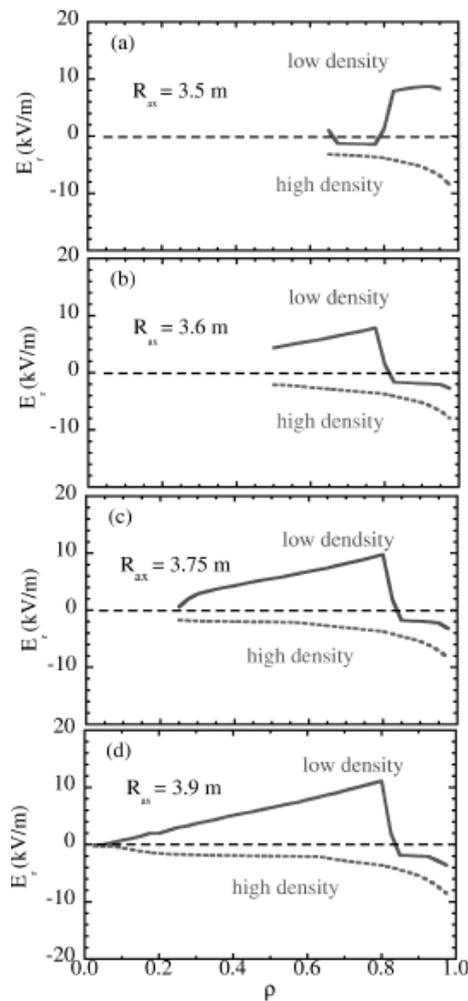


図 3.3-1 四配位における高密度・低密度条件下での径電場分布

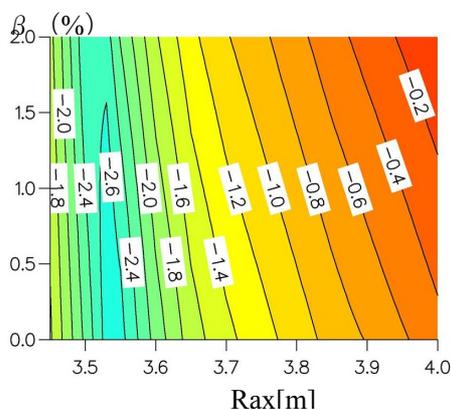


図 3.3-2 実効ヘリシティの等高線

気軸位置の異なる配位、さらにそれぞれのベータ値依存性に関して広範囲に行い、両者の高精度での一致を示すことができた。この計算により、他の配位と比較して、磁気軸位置 3.5 m 配位における実効ヘリシティの周辺部での急増という特徴的な性質を見出すことができ、この分布形状が、周辺部のみでの電子ルート遷移という観測結果に大きく影響しているものと理解することができた。また、実効ヘリシティの大きさが外寄せ配位にするに当たってプラズマ中心部でも大きくなる傾向にあり、この事実が電子ルート領域の中心部への広がりという観測結果をもたらしているものと理解することができた。また、Maxwell 則（径方向粒子拡散束に起因する径方向電流がゼロとなるような半径位置で電子ルートとイオンルートが触れ合う：電場界面）を適用した径電場「分布」解析を行うことで、電子ルートとイオンルートの遷移が起こる半径位置についても、実験観測に対応した結果が得られた。LHD における磁場構造（特に磁場の非軸対称性）と電子ルート実現に伴う径電場分布との強い相関が、実験・理論解析によって認識されることとなった。図 3.3-1 は、磁気軸位置 3.5m から 3.9m にわたる 4 つの配位における高密度・低密度条件下での径電場分布に関する理論解析結果を示しており、3.5m 配位での低密度条件下での特徴的な分布予測を示したものである。図 3.3-2 は、（真空磁気軸位置、体積平均 β 地）平面 ($\rho=0.8$) での実効ヘリシティ ε （実際には、 $\ln a_k^{3/2}$ ）の等高線である。真空配位では、磁気軸位置 3.53m 付近で極小地をとるというこれまでの知見に加えて、さらに内寄せ配位では、若干ではあるが、真空配位から β 地上昇に伴って、実効ヘリシティが減少するという新たな知見も得られた。現在、この物理的背景について研究を進めている段階である。GIOTA コードの整備により、正味電流なども考慮したさらに広範な LHD 実験条件にも対応した実効ヘリシティ評価の信頼性の高い、かつ即応性のある基礎を構築することができた。また、国際的な新古典輸送コードベンチマ

ーク共同研究においても、この論文を契機として、NEO コード(Kharkov Institute of Physics and Technology : V.V.Nemov 研究員)と GIOTA コードとの比較研究が緒についたところである。また、国際ステラレータスケーリング則の改訂に関する国際共同研究においても、この高精度の実効ヘリシティ評価は、磁場配位依存性を表す代表的な指標としての導入を試みる中で中核的な役割を果たしている。

さらに、LHD における高 Z 放電での高イオン温度達成時の径電場分布の計測が 2004 年度の実験で行われた。理論解析との比較が行われている段階であるが、高 Z イオンの存在が新古典両極性径電場決定に与える影響について GSRAKE コードを用いた系統的計算により調べている。電荷が高いことにより、径方向粒子拡散束への径電場に比例する熱力学的力の寄与の増大、また衝突周波数増大に伴うリップル輸送の寄与の低減により、電子ルートへの遷移に、低 Z イオン種の場合よりも高電子温度が必要となるという知見が得られている。この知見に基づいて、高 Z 放電でのイオン・電子輸送について実験結果との対応をとりながら解析を行う作業を展開している。

LHD 実験では、電子系 ITB 形成時のプラズマ中心部での径電場計測や、CO₂ レーザーによる揺動計測における揺動の回転方向導出のための径電場分布計測などが盛んに行われるようになってきており、これらの磁場配位依存性に関して、定量性ある議論を展開していく上でも、磁場構造と径電場分布に関して本年度に得られた知見は重要な基礎を与えるものと考えている。

また、ミラー閉じ込めにおける電場生成機構の解明と LHD における周辺部開放磁力線 (LID 領域) における電場解析への適用 (筑波大学 : 石井亀男助教授)、新古典輸送解析コードのベンチマーク作業 (国内および国際協力) ならびにヘリカル系磁場配位における配位特性指標値の高精度評価 (京都大学 : 村上定義助教授)、新古典輸送解析コードのベンチマーク作業 (国内および国際協力) ならびに LHD 実験における両極性径電場解析の DCOM-GSRAKE 比較 (北海道大学 : 若狭有光博士課程学生)、ヘリカル系における解析統合コード開発における MHD 平衡ならびに新古典輸送コード拡張 (京都大学 : 中村祐司助教授)、新古典輸送解析コードのベンチマーク作業 (国際協力) ならびにヘリカル系磁場配位における配位特性指標値の高精度評価、LHD 高 Z 放電における両極性径電場解析 (Max-Planck Greifswald : C.D.Beidler 研究員)、新古典輸送解析コードのベンチマーク作業 (GIOTA-NEO コード間) (Kharkov Institute of Physics and Technology : V.V.Nemov 研究員)、の研究をおこない、上述の成果に多大な貢献がなされた。

a-2) 有限軌道幅を考慮した新古典的輸送と GAM 振動

トカマク及びヘリカル系における新古典的輸送を、プラズマ粒子の有限幅を正確に取り入れ、ドリフト運動論的方程式を δf 法で解いている。トカマクの磁気軸近傍の粒子の特異な振る舞いを正確に取り入れ、磁気軸近傍の輸送係数を解析的及びシミュレーションで正確に計算した。また、軽電場は、トロイダル粘性力で決まるが、トカマクの場合、これが粒子軌道の磁気面からのずれから生ずることを正確に取り入れ、新古典的径電場の計算を求めることに成功している。この時、トラス性から発生する GAM (Geodesic Acoustic Mode) を詳細に調べ、GAM の減衰に粒子の有限幅効果が重要な働きをしていることを発見した。解析をヘリカル系プラズマにも拡張している。

本年度、FORTEC-3D コードの開発はほぼ完了し、ベンチマークとこのシミュレーションを用いた幾つかの初期的な研究を行った。研究成果としては GAM 振動のプラズマ全体でみたグローバ

ルな時間発展のシミュレーションを LHD 磁場配位、トカマク型磁場配位の両方で行い、第 20 回 IAEA 核融合エネルギー会議でのポスター発表などを行った。電子の取り扱いについては Max-Planck Greifswald・C.D.Beidler 研究員との協力の下に ripple-averaged kinetic equation を用いて LHD 磁場配位における径電場の時間発展の様子を解析し、規格化小半径 $\rho < 0.5$ において径電場の GAM 振動を見出した。この計算例では GAM 振動の減衰は主に無衝突プラズマにおけるランダウ減衰的な機構によって起こっている。LHD プラズマでの大きな特徴は周辺領域で回轉變換が 1 より大になっていることであり、これに対応して $\rho > 0.8$ では GAM 振動はすばやく減衰しており、コアと周辺部では径電場揺動に対するプラズマの振る舞いが大きく異なっていることがわかる。また、同じシミュレーションで径電場がほぼ定常に落ち着いた時点での径電場分布を解析し、我々の δf ハイブリッドシミュレーションの結果と従来の解析モデルに近いリップル平均ドリフト運動論の解から予想される両極性電場分布を比較した。両者とも全域で負電場となっているが、電場の大きさは δf シミュレーションの方が大きい。この差については、リップル平均したドリフト運動と、 δf 法においてダイレクトに追跡している軌道との差や、有限軌道幅効果、 δf 法でのより厳密な衝突項の取り扱いによる影響など、さまざまな原因が考えられ今後も詳しく解析を行ってゆく予定である。また、 $\rho > 0.9$ において特に負電場が成長しているのが見られるが、これは周辺におけるイオンの軌道損失の効果である。現在は最外殻を横切ったイオンを単純に損失したものとして扱っているが、周辺での粒子損失、リエントリングを適切にモデル化するソース、シンク項の導入によって周辺での径電場形成とそれによる輸送レベルの変化をシミュレートできるようなコードの拡張を目指している。

a-3) 径電場の分岐現象

ヘリカルプラズマで観測されている電場の分岐現象のダイナミクスの理論解析を目指すべく、熱伝導方程式、密度の発展方程式と電場の拡散方程式をカップルさせたコードの開発を行っている。電流拡散型の MHD モードに基づく異常輸送モデルも取り入れることで、径電場構造が新古典・異常輸送に与える効果を統一的に取り扱っている。これにより、ヘリカルプラズマにおける熱輸送障壁の解析をプラズマ分布や電場勾配による乱流抑制機構を自己無撞着に取り入れて行うことが可能となり、プラズマ内に形成される電場界面が定常的に保たれ、その近傍で異常熱伝導係数が低減され、強い電子ルートの電場による新古典拡散の低減と相まって内部輸送障壁が形成されることなどを示した。CHS 等のヘリカル装置で観測されている内部輸送障壁や電場の遷移現象を定常状態において理論的に予測することに成功した。

b) MHD

b-1) LHD プラズマ非線形自己安定化のシミュレーション

LHD プラズマ実験では、真空磁気軸位置が $R_{ax}=3.6\text{m}$ の配位において良好な閉じ込めが達成され、平均ベータ値 $\langle\beta\rangle=4\%$ が得られている。しかし、この配位において滑らかな圧力分布を仮定した平衡は、理想交換型モードに対して線形不安定である。そこで、Oak Ridge 研究所の B.Carreras 研究員との協力の下にこの良好な閉じ込めが達成されるための安定化メカニズムについて非線形 MHD シミュレーションを通じて解析した。まず、初期圧力分布として実験で得られているものに近い $P=P_0(1-\rho^2)(1-\rho^8)$ を採用し、中心ベータ値が 0.5% の低ベータプラズマを解析した。この場合、

交換型モードは線型不安定であるが緩やかに非線型飽和し、閉じ込めに大きな影響は与えない。このとき、図 3.3-3 (a)に示すように平均圧力分布が共鳴面近傍において局所的に平坦な階段状の構造を持つものに変化する。これによって不安定性を駆動する圧力勾配が低減し、緩やかな飽和が達成される。初期圧力分布に同じものを使いベータ値を $\beta_0=1.0\%$ に上昇させると、バースト的現象が現れプラズマの中心部分が急激に周辺へ輸送される。これは、ベータ値の上昇によって不安定性駆動力が増加し、モード間のオーバーラップが生じたことによる。しかし、LHD での良好な閉じ込めの際にはこのような破壊的な現象は生じていない。そこで、実際のプラズマの β 上昇過程では圧力分布はベータ値とともに連続的に変化しているはずであると考え、 $\beta_0=0.5\%$ の非線型発展で得られた圧力分布を $\beta_0=1.0\%$ での計算の初期分布とした。その結果、バーストは生じず緩やかな非線型飽和が得られた。また、図 3.3-3 (a)に示すとおり、飽和した平均圧力分布は新たな局所的な平坦構造をもつ。さらに、同様の計算を $\beta_0=1.5\%$ に拡張しても同様の結果が得られた。これは、より低いベータ値での局所平坦構造がすでに不安定性駆動力を低減しているため、ベータ値を上昇させても破壊的な現象に至らないことによる。図 3.3-3 (b)は滑らかな圧力分布と非線型飽和後の圧力分布においてメルシエ安定性を比較したものである。この図から、非線型飽和した圧力分布では局所平坦構造が形成された領域で線型安定性も大きく改善されていることがわかる。また、図 3.3-3 (c)は $\beta_0=1.5\%$ で飽和した圧力分布の鳥瞰図であり、圧力分布は各共鳴面において単に平坦化しているだけではなく、モード数に応じた構造に自己組織化している様子がわかる。以上の解析から、LHD プラズマにおいて線型不安定な領域で良好な閉じ込めが達成されているのは、プラズマ自身が交換型モードの非線型発展を通じて安定な圧力分布を形成するように自己組織化しているためであると考えられる。

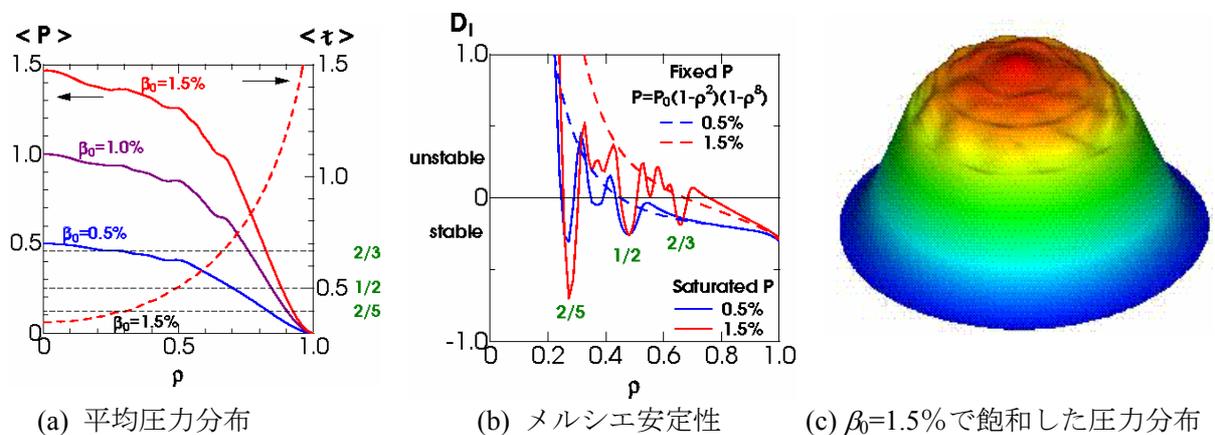


図 3.3-3 LHD プラズマ非線形自己安定化のシミュレーション

b-2) LHD プラズマのフルトラス非線形シミュレーション

LHD 内寄せ磁場配位の幾何形状を取り入れ、圧縮性も含む完全 3 次元 MHD 方程式系の非線形発展直接シミュレーション (DNS) を行うことにより、圧力駆動型 MHD 不安定性の影響を解析した。電流駆動型モードと違い、圧力駆動型モードは小さいレベルで飽和するか、あるいはほぼ完全に非線形的に安定化されることが分かった。圧縮性、トロイダル流、磁場に平行方向の熱拡散などが決定的に重要であることを明らかにした画期的な成果である。

b-3) LHD プラズマ自由境界平衡・安定性解析と自律安定化

LHD内寄せ磁場配位におけるMHD平衡の再構築を新しい観点から考えた。実験的には、ベータ値の上昇と共にプラズマ全体のシャフラノフシフトが生じており、これがプラズマ境界のシフトと変形(境界のフーリエ成分の変調)をもたらすと考えられる。この境界の変調の効果が平衡のMHD安定性に大きく影響することを突き止めた。プラズマの自由境界運動に由来する境界の変形(フーリエ成分の変調)を考慮に入れて、LHD内寄せ磁場配位における3次元線形理想安定性解析を行った結果、ベータ値の増加とともにプラズマの自由境界運動により、線形理想安定性が著しく改善されるという、自律安定化の効果が存在することを明らかにした。

b-4) HINTコードによるLHD磁気島解析

磁気面の存在を仮定しない3次元平衡コードHINTコードを改良・発展させ、ユーザーがより簡便に利用できるようにした。LHDのLID配位 $n=1$ 磁気島や零回転変換磁気面が存在する時の磁気島の有限ベータ時の振る舞いなどを新たに解析した。図3.3-4は正味トロイダル電流の効果により、プラズマ中心付近(赤色)における磁力線が外側の領域(黒色)とは逆向きに磁気軸に巻きつくようなLHDプラズマ平衡の一例である。磁気島生成を伴う3次元平衡に関する研究について、京都大学共同研究者(鈴木康浩博士課程学生、中村祐司助教授、近藤克己教授)を主著者として国際原子力機関(IAEA)核融合会議(FEC2004)において発表を行った。

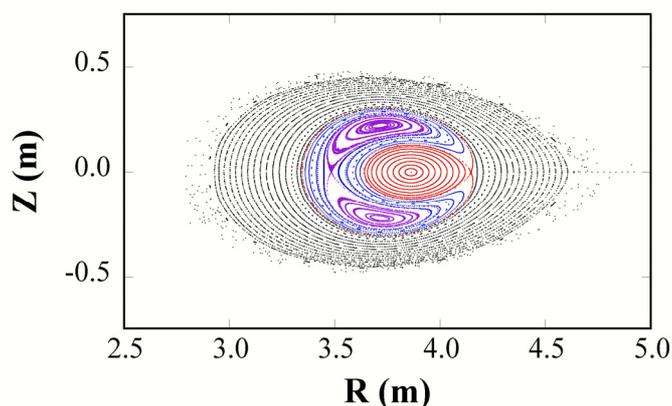


図 3.3-4 横長断面におけるLHDプラズマ平衡の磁力線構造

c) 運動論的輸送・安定性

c-1) ITG乱流とゾーナルフロー

弱衝突性2次元スラブITG乱流の運動論的シミュレーションコードをトロイダルITG乱流シミュレーションの解析用に拡張を行った。トカマク配位におけるExBゾーナルフローの無衝突時間発展のジャイロ運動論的ブラゾフシミュレーションを行った結果、測地的音響モード(GAM)が減衰した後、ゾーナルフローの振幅が、Rosenbluth-Hinton理論の予言する有限振幅値に収束することを確認し、得られた速度空間分布関数から、この有限振幅のゾーナルフローをもたらす非捕捉粒子領域の速度分布構造が、解析理論の予測によく一致することを明らかにした。また、ヘリカル系におけるゾーナルフローの無衝突時間発展の理論を構築し、測地的音響モードが減衰した後ゾーナルフローの振幅が収束する値が、この解析理論の予測によく一致することを示した。

また、線形ジャイロ運動論に基づく静電・電磁モード解析用固有値コードの開発およびその応

用を行った。

c-2) ヘリカル系プラズマ静電・電磁的モードの線形安定性解析

本年度は、昨年度から引き続き、線形ジャイロ運動論に基づく静電・電磁モード解析用ルーティング固有値コード Gorilla の作成およびその運用を行っている。Gorilla コードは、ジャイロ運動論に基づき、MHD モデルでは扱えないドリフト波や、MHD 的モードの運動論的取り扱いが可能である。またモデル磁場による解析的 MHD 平衡のみならず、MHD 平衡コードの計算結果を入力として利用することにより、実験を意識したより現実的な閉じ込め配位における解析が可能である。他のジャイロ運動論コードに比較して優位な点として、固有値問題による定式化を採用することによって、電子、イオンの質量比に関わる粒子間の時間スケールの相違が数値的な問題とならないため、典型的ドリフト波である ITG のみならず、電子系のモード、TEM,ETG を容易に扱うことができることが挙げられる。関連して、複雑な磁場配位を持つヘリカル系プラズマを対象とした解析に対して、従来十分な解析がなされているといえないヘリカル捕捉電子の役割などを明らかにすることができると期待される。また理論解析のみならず、実験データを用いた実験解析も進めている。以下に LHD プラズマにおける静電モードの解析の一例を示す。

解析例： 図 3.3-5 では、LHD 実験において得られる典型的な 2 種類の温度プロファイル(左図)をモデル的に用いたケースでの、静電モード(ITG)の振動数(実振動数 ω_r 及び成長率 γ)の径方向依存性(右図)を示している。2つのショットは、プラズマがカオス的磁力線領域に囲まれ周辺部が閉じ込め領域としての性能を保持するため、最外郭磁気面で有限温度をもつ場合(実線)と、ローカルアイランドダイバータ配位でプラズマ外側にリミターを挿入することにより、温度がプラズマ内で減少する場合(破線)である。破線は実線に比較して、径方向の温度変化、すなわち温度勾配が強くなっている。右図からわかるように、端領域で有限温度を保持するケースでは不安定性は外側のみに局在するのに対して、温度がプラズマ領域でゼロになる配位では不安定性がコア領域まで存在し、またその成長率は大きい。これは ITG モードがイオン温度勾配によって駆動されるモードであることから、妥当な結果であるといえる。実験的にも成長率の大きい方の配位でより大きな輸送が観測されており、ITG 不安定性による異常輸送を示唆している。今後平衡電場の効果を取り入れることなどにより、より詳細な解析を進める必要がある。

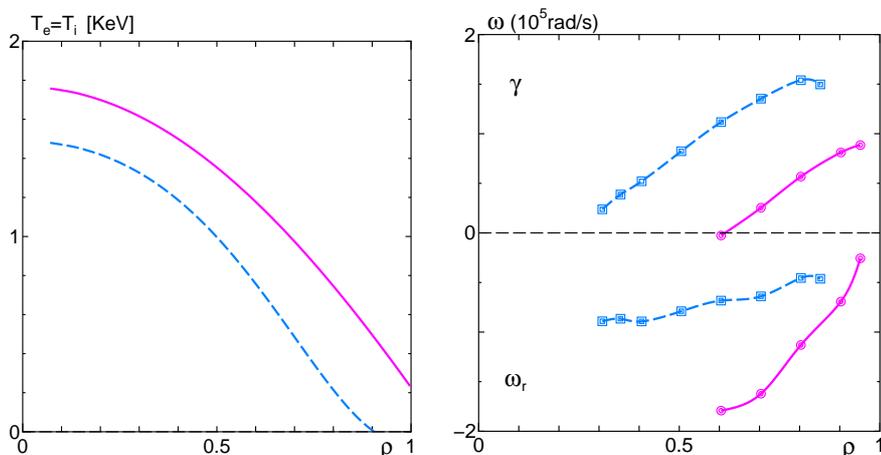


図 3.3-5 2 種類の温度プロファイル(左図)をモデル的に用いたケースでの、静電モード(ITG)の振動数(実振動数 ω_r 及び成長率 γ)の径方向依存性(右図)。

d) 高エネルギー粒子

d-1) ヘリカルプラズマ高エネルギー粒子-磁気流体シミュレーションコードの開発

ヘリカルプラズマを対象とした高エネルギー粒子-磁気流体統合シミュレーションコード MEGA を開発した。使用した座標系はヘリカル座標系であり、この座標系はヘリカルプラズマ MHD 平衡計算コード HINT に採用されている。このため、HINT コードを用いて計算した MHD 平衡データを初期条件としてそのまま使うことができるという利点がある。MHD 平衡における力の釣り合いと粒子軌道についてコードのテストを行った。さらに、LHD プラズマにおける $n=2$ トロイダル・アルヴェン固有モード(TAE)に関するシミュレーションを行い、TAE として矛盾のないモード空間分布と周波数を得た。

これまでの NBI、ECH に加えて、ICRF 加熱に関する数値シミュレーションを GNET コードに導入し、その 3 次元解析性を活用してトカマクを含む磁場閉じ込め配位での解析に着手した。(京都大学：村上定義助教授)

e) ダイバータプラズマ

e-1) LHD の LID 配位における周辺部新古典プラズマ輸送

$m/n=1/1$ 磁気島を利用した局所磁気島ダイバータ(LID)運転では、高効率の中性粒子排気のため、コアから流出してきたプラズマがダクトに覆われている LID ヘッド背面に導かれる必要がある。従って、コアから流出した粒子(イオン)のストライクポイントの位置が LID 運転において重要となる。平均自由行程(λ_{mfp})と磁力線の結合長(L_c)の比に従い、LID ヘッドへの輸送に寄与する主要な粒子軌道が変わると予想される。よって、ストライクポイント分布に対する新古典的な粒子輸送の効果について研究した。多数のイオン粒子の案内中心軌道を追跡し、モンテカルロ法でピッチ角散乱を与え、分布に対する新古典的な粒子輸送の効果の主として調べた。図 3.3-6 に示すように、LID ヘッド上のストライクポイント分布が衝突領域によって変化し、さらにその分布に非対称性があることを初めて明らかにした。また、粒子の平均自由行程と磁力線の結合長の比に従い、LID ヘッドにストライクする粒子軌道の種類(補足、非補足)の割合が変化することを見出した。平均自由行程が比較的長い場合は、ストライクポイント分布は主として通過粒子軌道により特徴づけられるが、比較的短い場合は、捕捉粒子軌道が主として決める。つまり、コアから流出した粒子が、捕捉粒子軌道に乗ってバウンスモーションを繰り返し径方向に磁気島内部深く輸送され、LID ヘッドの端にもストライクすることが分かった。さらに、 ∇B ドリフトの効果により、分布の非対称性が物理的に説明できることも明らかにした。実際の計算に当たっては、ベクトル化、並列化など計算高速化に努めた。(中部大学：高丸尚教助教授)

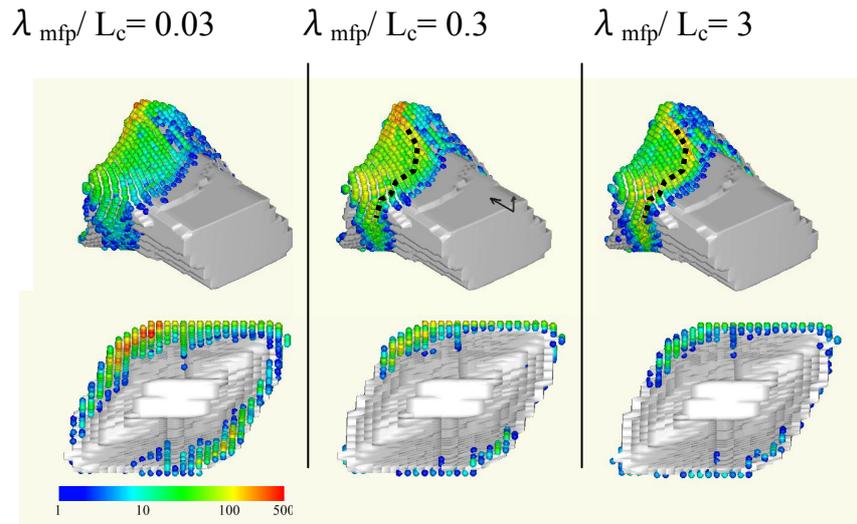


図 3.3-6 衝突領域の違いによる LID ヘッド上の粒子ストライクポイント分布の変化

f) 粒子軌道

f-1) LHD の高エネルギー粒子軌道

LHD 高エネルギー粒子のドリフト軌道は最外殻磁気面より外側でも存在しえると仮定した粒子軌道解析をおこなうと、実験をよく説明しえることを示した。この場合には粒子のロスコーンは存在しないことになる。この結果は、LHD の ICRF および NBI 加熱実験と一致している。

3. 4 基礎プラズマ実験

1) 研究の目的

プラズマ基礎研究の目的は、(1)プラズマ中の粒子・運動量輸送を理解するため、プラズマの動的振る舞いに関する基礎的研究を行うことである。そのため(2) 有限粘性プラズマにおける自己組織化流れの発生と渦形成に関する詳細な実験（京都大学：際本泰士教授）を行うことである。実験は直線型磁化プラズマ発生装置 HYPER-I を用いて行っている(図 3.5-1)。同装置は大口径・高密度プラズマ生成を特徴としており、磁場配位の簡単さや測定機器のアクセスの良さを利用して上記研究テーマの他、共同実験や大学院生教育など複数の実験が同時進行している。

渦はプラズマの輸送現象に本質的な役割を果していると考えられているが、従来、プラズマは非粘性流体とされ、そこではドリフト波渦を基本渦構造とした輸送現象の描像が広く受け入れられてきた。しかし、HYPER-I 装置でプラズマホールと呼ばれる粘性渦の自発的形成が確認されたことにより、プラズマを粘性流体と捉え直す必要性が論じられている（中央大学：河野光雄教授）(図 3.5-2)。

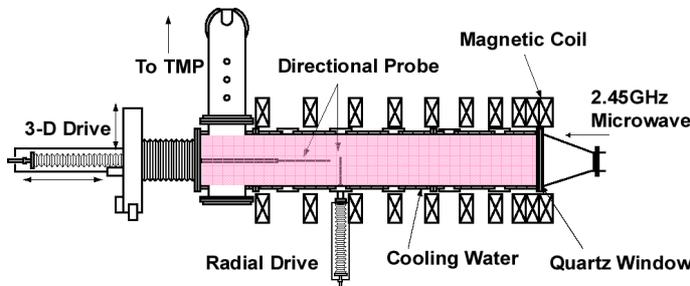


図 3.5-1 HYPER-I 装置

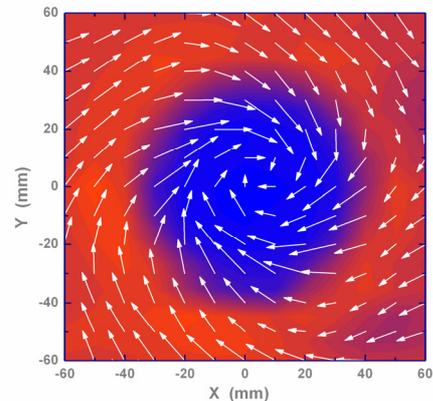


図 3.5-2 プラズマホールと速度ベクトル場

非粘性渦と粘性渦の本質的な違いは、径方向流れの存在である。この流れは渦間の相互作用や物質、運動量、エネルギーなどの径方向輸送に本質的な役割を果す。したがって、径方向流れの測定とその原因となるプラズマの実効的粘性係数の測定は本研究の中心課題である。より高精度に実験を行うためには、正確な速度ベクトル場の決定（東北大学：犬竹正明教授）が必要となる。

以上の観点から、平成 16 年度は以下の計画を立てた。

(3)誘起蛍光ドップラー分光法を用いたプラズマ流速の絶対値計測システムを完成させ、流れ場の高精度決定法を確立する。

(4)また 2 次元ポテンシャル計測および揺動計測を行い渦構造や粘性・散逸の発生機構を調べる。径方向流速を正確に測定することは粘性係数の決定精度に直接関係する。従来は方向性プローブを用いて計測を行ってきたが、絶対値計測でないためにプローブ法と相補的な絶対値計測法が望まれていた。平成 15 年に科学研究費(B)で波長可変色素レーザーを導入し、レーザー誘起蛍光(LIF)ドップラーシフト計測システムの開発を行ってきた。16 年度は第 2 年次にあたり、計測法の完成と初期実験の開始を目標とした。またポテンシャル計測に関しては従来 1 次元計測を行ってきたが 2 次元へ拡張することによってより詳細なデータの取得を目標とした。

2) 平成 16 年度の成果

誘起蛍光ドップラー分光システムを完成させ、初期実験を開始した（東京大学：岡本敦氏）。アルゴンプラズマを用いて周方向回転速度の絶対値測定を行った。実験条件を適当に選び、プラズマが全体として中心軸の周りに回転している条件で実験を行った。図 3.5-3 に示すように、それぞれ中心から 3 cm 離れた点の誘起蛍光スペクトラムは中心波長で 8 pm のドップラーシフトが観測される。このシフト量から周方向速度を換算すると、プラズマは 2×10^5 cm/sec の速さで回転していることになる。この速度は方向性プローブ法で得られていた値の約 1.2 倍での値であり、従来のプローブ法が約 20% の誤差で流速を測定していたことを裏付けた。さらに径方向の流速分布を測定し、方向性プローブの結果と比較したところ、較正係数をのぞいて両者の分布はよく一致することを確認した。この結果はプラズマ核融合学会誌(JPFR Rapid Communications 80,(2004)1003)に発表した。

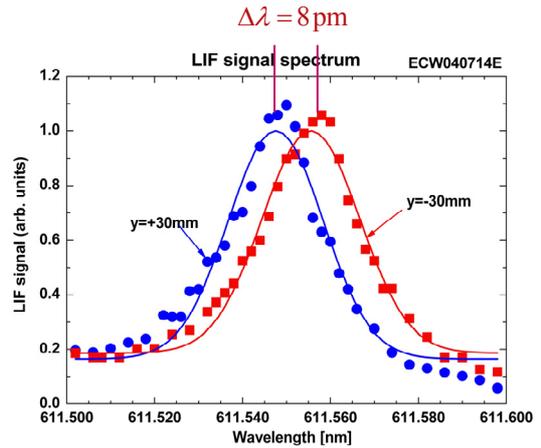


図 3.5-3 誘起蛍光スペクトラム

エミッシブプローブ（横浜国立大学：津島晴助教授）とプローブ角度変位機構を用いて 2 次元ポテンシャル分布の測定を行ったところ、粘性渦(プラズマホール)が形成されている場合は上に凸の鋭いピーク構造をしていることがわかった(図 3.5-4)。さらに、このポテンシャルによる電場は最大 40V/cm におよびこの電場による E×B ドリフトが渦の回転を駆動していることがわかった。ポテンシャルの揺動は図 3.5-5 に示すように電位分布の変曲点付近に局在している。これは E×B ドリフトの速度シアが強いところ、即ち粘性による散逸が強い所に対応している。この結果は流体力学的な予測と矛盾しない。

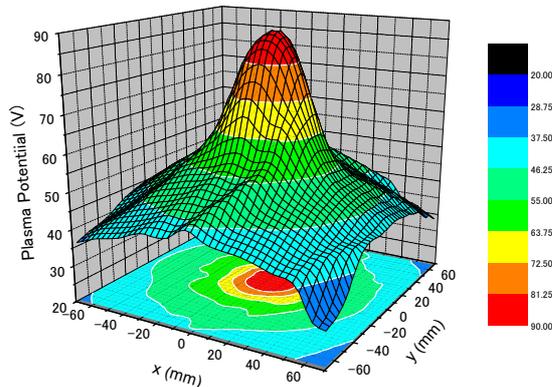


図 3.5-4 2次元ポテンシャル分布

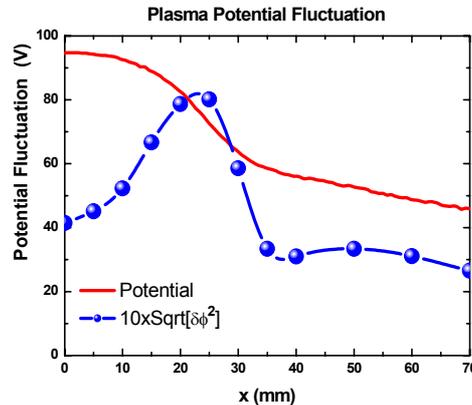


図 3.5-5 ポテンシャル揺動分布

平成 16 年度の活動により、LIF ドップラー分光システムが完成し本格的な実験の準備が整った。この計測法と方向性プローブ法を併用することにより、プラズマ流速場に関する高精度で高い空間分解能を有する実験が可能となった。また、ポテンシャル計測では 2 次元データの取得が可能となった。今後は時間発展や外部からの能動的制御実験など詳細なデータを蓄積して、粘性渦と流れ構造形成の全体像に迫りたい。さらに、中性粒子の分布と流れを測定するため、半導体レーザーを用いた計測法の開発（名古屋大学：荒巻光利助手）を共同研究として行う予定である。

3. 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、基幹エネルギー発生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し、広く核融合研究の前進に寄与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、これの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)、および漏出安全性と対磁場環境性を優先した先進液体ブランケットとしての溶融塩 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。特に溶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年度の成果

これまででは炉のサイズ (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、設計統合の観点から大幅に見直す必要があった。

そこで今年度は、これまでの FFHR2 の炉サイズを増やし、閉じ込め磁場を下げ、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 および FFHR2m2 の設計を実施した (図 3.6-1)。

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 3.6-2) 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 \(九州東海大学: 御手洗修教授\)](#) 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

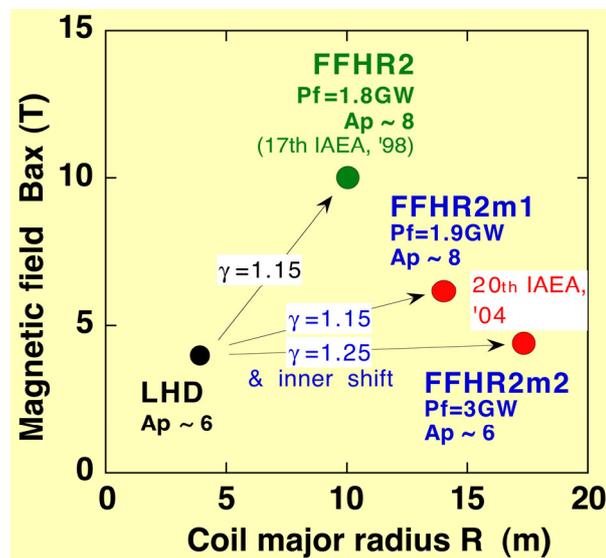


図 3.6-1 LHD と炉設計パラメータの比較

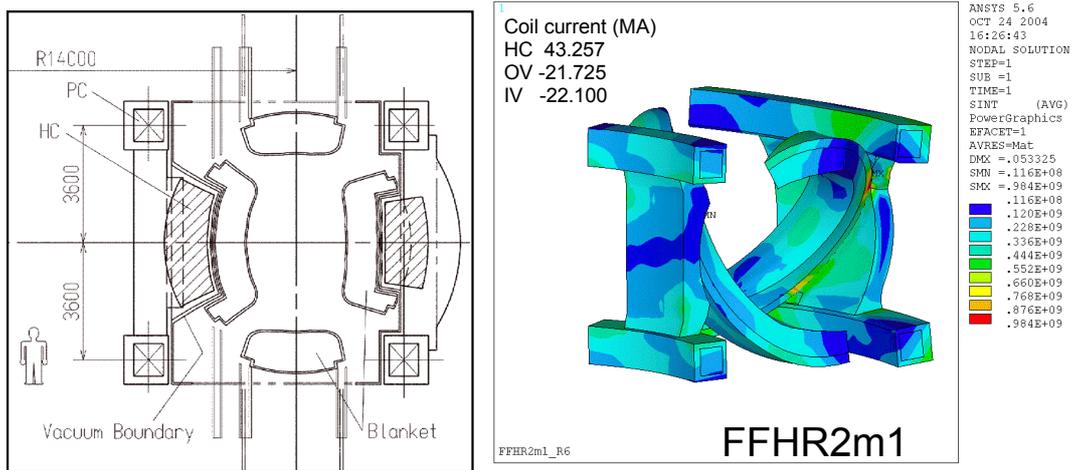


図 3.6-2 電磁力支持構造の炉内断面構造と応力分布

ISS95 則に対して 2 以下に緩和出来ることが分かった (図 3.6-3)。他方、外部加熱や燃料供給、およびダイバータ排気構造、等の設計解析が今後の課題として明らかとなった。

溶融塩 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。これに関して、高プラントル流体伝熱促進実験 (東北大学: 結城和久、橋爪秀利教授) とその MHD 効果解析 (東京理科大学: 佐竹信一、京都大学: 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 (九州大学: 深田智、清水昭比古) に基づく核特性解析を実施した (図 3.4-4)。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

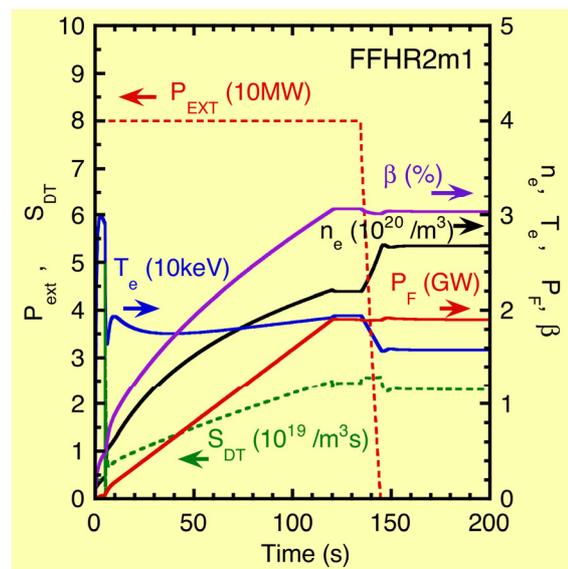


図 3.6-3 自己点火への立ち上げ特性

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。

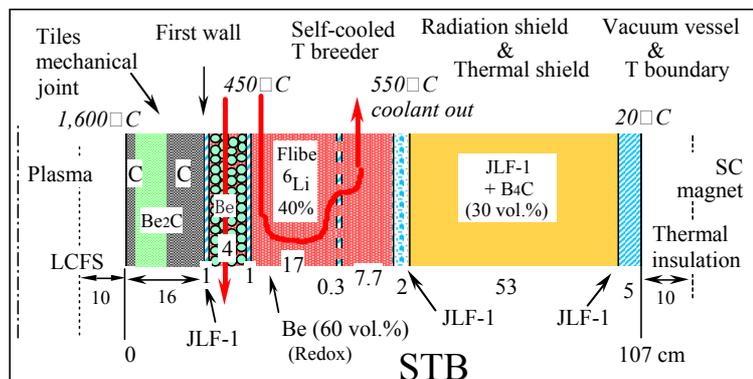


図 3.6-4 長寿命増殖ブランケット STB の構造概念

3. 6 産業応用など

1) はじめに

地上の太陽、核融合研究はサイエンスとテクノロジーをインテグレートして、2030年代に核融合イグニッションの実現を目指し、科学実証規模での研究・開発が進められている。その長い道程で生まれる新しい科学知識、技術成果は速やかに社会に還元すべきである。

京都議定書の発効により、省資源・省エネルギー化の強力な推進は、我が国にとって焦眉の急となっている。しかしながら、現行の生産手段の改善によるこの問題の解決は、すでに限界に近づいており、新しい視点が求められている。極言すれば、文明とは物材を創製し、それを加熱し加工することである。工業の誕生から今日に至るまで、加熱は、外部の熱源からの熱伝導・熱伝達・放射を利用することを基本的としてきた。このプロセスに抜本的変革を加えられるならば、最も効果的に省エネ化を実現出来る。マイクロ波による加熱は、電子レンジで代表されるように火を使わない点に特徴がある。各種の工業応用が試みられてきた。近年、有機化合物、炭素、さらに金属まで、ほとんど全ての圧粉体（粒子集合体）や液体を効率よく反応させたり、加熱、焼結できることが明らかになった。産業界では実用化を目指す研究開発が活発になっている。

2) 産学官連携研究の経緯

核融合科学研究所は、プラズマのエネルギー閉じこめの基礎知識と大電力マイクロ波技術を基礎とし、等温断熱式マイクロ波炉というシーズを発案した。陶磁器およびファインセラミックスの焼成など、窯業プロセスを従来のエネルギー多消費型から環境負荷低減型へ転換し、省エネルギー化、低コスト化、高付加価値化を目指す研究開発を行っている。平成11年度に研究に着手、12～14年度に科研費「地域連携推進研究費（3500万円）」により、地域産業である陶磁器業界と共同して、マイクロ波という新しい概念による焼成炉と焼成技術を開発した。13～15年度には、NEDO/経済産業省「地域新生コンソーシアム研究開発事業（2億5000万円）」によって、実用化研究を推進した。平成13年11月「国際新技術フェア2002」で最優秀技術賞を受賞するなど、技術面でも高い評価を受けており、産業界から「次世代を担う革新的技術」として早期の実用化を期待されるに至った。平成12～13年度は、バッチ炉による研究に満足すべき進展があり、この技術蓄積をベースに、平成13年、連続炉に関する試作開発を開始した。

3) 平成16年度の成果

(1) マイクロ波炉の事業化（セラミックス関係）

今後3カ年で収益性の高い事業に育て上げる。地域産業に対する指導・支援を継続し、導入先となる顧客企業の製品に最適化した炉の開発を支援した。平成16年度の成果のうち、代表的な事例2件を説明する。

事例1. 連続式マイクロ波雰囲気炉の開発・焼成試験・事業化支援：

科研費「地域連携推進研究」により、世界初のマイクロ波連続炉を試作開発した。このモデルをベースにしてIT産業向け大型マイクロ波連続炉を開発し、大手企業へ納入・稼働させた。

事例2. ガラス処理工程用のマイクロ波炉：

核融合研が開発したマイクロ波による均一加熱原理を応用し、熱処理炉が納入された。現在立ち上げ作業中である。今後の市場動向によっては、大口な商談に成長する可能性がある。

(2) マイクロ波利用 産学連携研究の次期計画：「鉄鋼産業への連携計画」

近年、材料学の分野では、基幹産業中の基幹産業である製鉄に関し、炭酸ガス排出抑制短時間製鉄法に関する新しい研究が進み、その過程でマイクロ波を適用したところ、大きな効果が見出された。異なる学際領域を有機的に結合して、「炭酸ガス排出抑制型新材料創成反応方法の開発」を強力に推進、学術の社会還元技術として注目を集めている。東京工業大学、東北大学および企業との連携研究を開始した。

鉄鉱石微砕粉と炭素粉末をモル比当量に混合し窒素雰囲気中で、マイクロ波を照射する。発熱はマイクロ波加熱によってもたらされるため、鉄鉱石の昇温にコークスを燃焼させる必要がない。酸化鉄の還元に必要な炭素が炭酸ガスとして生じるだけであり、単位の重量の銑鉄生産において排出される炭酸ガスは数分の1に減少する。マイクロ波を発振させる電力に、原子力、太陽光発電を使用すれば、溶鉱炉1基あたり、年間100万トン単位で炭酸ガス排出量を抑制出来ると推算される。平成17年1月に、セラミックス焼成用に開発した連続炉を使用して基礎実験を行った。溶鉱炉の1/10の時間で、酸化鉄が還元された。

3. 7 ITER 連携

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 報告書「今後のわが国の核融合研究のあり方について」の④大型ヘリカル装置 (LHD) 計画の項目の中で「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て進めることが必要である。」と記述されていることを踏まえて、ITER連携のために、表3.7-1に示すように、研究所の組織として平成16年4月1日に連携研究推進センター学術連携研究室ITER連携研究部門を設置し、主査を中村幸男教授とした。また、前年度からITER協力専門委員会 (表3.7-2) も設置して枠組みなどの検討を行っている。さらに、ITER関係の日本での窓口的役割を担っている日本原子力研究所那珂研究所との情報交換や協力関係の推進のため、双方の所長を含めた幹部クラス数名での3、4ヶ月に1回程度の定期的会合をもって、双方の意志疎通を図り、当研究所のITER連携担当者が活動しやすい環境を整えている。ITER連携グループには若手の助手も参加しており、構成も幅広い世代となっている。

ITER 連携活動の中で、トカマクとヘリカルの比較に関する成果も挙がり、論文にもなっており、双方にとって有益な連携となっている。例えば、電子系内部輸送障壁に関するトカマクとヘリカルの比較実験を行い、内部輸送障壁形成に関する普遍的知見を得ている。(K.Ida et al., Plasma Phys Control Fusion 46 (2004) A45) また、電子の過渡応答をトカマクとヘリカルで比較し、電子の輸送に関する普遍的知見も得て、国際トカマク物理活動 (ITPA) などで発表するとともに IAEA の論文にもなっている。(S. Inagaki, et al., proc. 20th Fusion Energy Conference, Vilamoura, (2004) EX/P2-12) なお、理論・シミュレーションの ITER 物理 R&D 関連活動としては、ITPA のメンバーとして、国内の物理 (サブ) クラスタ活動を推進するため、全国的な MHD に関する会合を NIFS の共同研究として開催している。又、ITPA 活動の輸送関連では、実験と連携しながら3次元輸送コード (TASK コードの3次元化) の開発を進めており、ITER プラズマの統合シミュレーションの精度向上に貢献できると考えている。更に、総研大学生や学振特別研究員の研究テーマとして、外部モードや RWM の研究を取り上げており、理論・シミュレーションの分野でも貢献できると考えている。

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 活動の継続性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と認識している。ITPA は、表 3.7-3 に示すように7つのトピカル物理グループ (輸送、データベースとモデリング、周辺とペダスタル、スクレイプオフとダイバータ、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、韓国が参加して活発な議論が行われている。トラスプラズマにおける共通点を念頭に置きながら、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解析などを含め

て、積極的に研究者を派遣して発表を行っている。2004年の延べ参加人数は35名であり、各物理トピックスでの発表も合計で11件と増加しており、研究所からの貢献が大きくなっていると言える。

表 3.7-2 核融合科学研究所 連携研究推進センター 学術連携推進室の組織

		教授	助教授	助手
国際連携研究部門	主査 松岡啓介	松岡啓介 渡利徹夫 山崎耕造 ☆ 野田信明 ☆	難波忠清 廣岡慶彦	
レーザー連携研究部門	主査 岡本正雄	岡本正雄 ☆ 坂上仁志 ☆	田島輝彦 尾崎 哲 ☆	岩本晃史 ☆
ITER 連携研究部門	主査 中村幸男	中村幸男 ☆	藤堂 泰 ☆	妹尾和威 ☆
機構連携研究部門	主査 山田弘司	山田弘司 ☆ 洲鎌英雄 ☆	田中基彦	

☆印は併任

表 3.7-2 核融合科学研究所 ITER 協力専門委員会名簿 平成16年6月25日現在

所属・職名等	氏 名
核融合科学研究所高温プラズマ物理研究系主幹	川端 一男
核融合科学研究所高周波加熱プラズマ研究系 教授	○中村 幸男
核融合科学研究所理論・シミュレーション研究センター 助教授	*藤堂 泰
核融合科学研究所炉システム・応用技術研究系 助手	*妹尾 和威
核融合科学研究所粒子加熱プラズマ研究系 教授	居田 克巳
核融合科学研究所高温プラズマ物理研究系 教授	東井 和夫
核融合科学研究所連携研究推進センター 教授	加藤 隆子
核融合科学研究所炉システム・応用技術研究系 教授	今川 信作
核融合科学研究所炉工学研究センター 教授	室賀 健夫
核融合科学研究所理論・シミュレーション研究センター 教授	中島 徳嘉
核融合科学研究所高温プラズマ物理研究系 教授	山田 弘司
核融合科学研究所高温プラズマ物理研究系 助教授	渡邊 清政
核融合科学研究所プラズマ制御研究系 助手	増崎 貴
核融合科学研究所客員教授 (日本原子力研究所 炉心プラズマ研究部プラズマ物理実験研究室長)	草間 義紀
核融合科学研究所客員助教授 (日本原子力研究所 核融合工学部副主任研究員)	小泉 徳潔

○印は委員長、*印は幹事

表 3.7-3 Members of ITPA Topical Physics Groups (As of 6 October, 2004)

	EU	JA	RF	US	CN	KO	IT
Coordinating Committee	D Campbell† F Romanelli H Zohm	Y Nakamura† H Ninomiya† S Takamura	N Ivanov† S Konovalov S Mirnov	E Oktay† N Sauthoff R Stambaugh*	Yuping Huo Jiangang Li† Chuanhong Pan	M Kwon† J H Han Y S Hwang	Y Shimomura M Shimada**
Transport Physics	J Connor X Litaudon B Unterberg	T Fujita T Fukuda A Fukuyama Y Sakamoto K Toi	Y Esipchuk N Kirneva S Lebedev K Razumova V Vershkov	E Doyle* P Gohil J Kinsey J Rice E Synakowski D Mikkelsen☆	Jiaqi Dong Aike Wang Shaoji Wang Deng Zhou Younian Wang	J Y Kim G Y Park	V Mukhovatov**
Confinement Database and Modelling	J Cordey F Imbeaux F Rytter C Hidalgo☆	Y Ogawa H Takenaga T Takizuka M Yagi H Yamada	A Chudnovskiy Yu Dnestrovskij V Leonov	W Houlberg* J Deboo S Kaye M Murakami J Snipes	Zhengyin Cui Jinhua Zhang Changxuan Yu Yaojiang Shi Ze Gao	S S Kim B H Park C B Kim	A Polevoi**
Edge Pedestal Physics	L Horton H Wilson G Saibene	K Ida Y Kamada* Y Nakashima N Oyama H Urano A Komori☆	M Osipenko R Shurygin	T Leonard ** P Guzdar A Hubbard T Rognlien M Wade	Xiang Gao Longweng Yan Bili Lin Guosheng Xu	C M Ryu S H Seo S H Ku	M Sugihara
Scrape-off-layer and Divertor Physics	A Loarte Ph Ghendrih A Kallenbach G Matthews V Philipps K McCormick☆	N Asakura* T Kato T Nakano S Takamura T Tanabe	V Kurnaev G Kirnev	S Krasheninnikov B Lipschultz** D Whyte M Fenstermacher P Stangeby	Yu Yang Yudong Pan Shizeng Zhu Jianshen Hu	S H Hong S W Yoon K S Chung	A Kukushkin
MHD, Disruption and Control	T Hender J Lister A Fasoli S Günter A Jaun	S Iio N Nakajima Y Ono T Ozeki M Takechi	N Ivanov S Konovalov V Lukash S Mirnov V Pustovitov	T Strait R Granetz G Navratil S Jardin J Wesley E Lazarus☆	Yi Liu Qindi Gao Liquan Hu Xiwei Hu Yuan Pan Xiaogang Wang	H G Jhang O J Kwon	Y Gribov** M Sugihara
Steady State Operation	A Bécoulet C Gormezano* A C C Sips A Tuccillo	S Ide** A Fukuyama K Hanada T. Suzuki Y Takase Y Nakamura☆	V Kulygin V Vdovin A.Zvonkov	C Phillips P Bonoli C Forest W Heidbrink R Prater	Xianzhu Gong Xuantong Ding Xiaodong Zhang Xianming Song Jiarong Luo	K I You Y S Na J M Kwon	T Oikawa
Diagnostics	A Donné* F Orsitto R Pitts F Serra H-J Hartfuss☆	K Kawahata Y Kawano Y Kusama A Mase M Sasao	G Razdobarin A Krasilnikov V Strelkov K Vukolov V Zaveriaev	D Johnson R Boivin G Wurden G McKee T Peebles	Junyu Zhao Qinwei Yang Yan Zhou Baonian Wan Yinxian Jie	S J Yoo S G Lee H G Lee W H Choe	A Costley** T Sugie

4. まとめと次年度計画

LHD が持つ物理（ヘリオトロン磁場配位）と装置工学（大型超伝導コイル）の両面の特長が、高温プラズマの定常保持に大きな伸長を図った今年度の実験によって実証された。定常性に優れた能力は安定して短い間隔でのプラズマ実験をも可能としており、実験開始以来、今年度までの7年間で5万回を越えるプラズマ放電を実施し、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いる。

平成16年度は、最重点課題として挙げた長時間放電で、大きな成果を挙げた。磁場配位の制御によってヘリオトロン磁場配位で課題とされた粒子損失を抑え、高エネルギー粒子の高い閉じ込め性能を達成したことを基盤とし、平成16年度は、プラズマを高周波で加熱するイオンサイクロトロン加熱法による大電力定常加熱実験を重点的に行った。結果として、真空容器内に設置されたアンテナからの高周波電磁波を主力として約700 kWを入力することにより、プラズマの温度は2000万度、密度は7-8兆個（1立方cm当たり）の高温プラズマを31分45秒に亘り連続して保持することに成功した。この長時間運転には、上記の磁場制御法の確立に加えて、プラズマと壁の相互作用における原子分子過程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。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1.3ギガジュール（13億ジュール）を達成した。また、ECHの単独加熱による長時間放電実験では、約110 kWで1時間5秒の放電に成功した。

前年度に引き続き、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の取得に成功した。トムソン散乱計測や炭酸ガスレーザー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次元分布計測などが順調に稼動を始め、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だ。重イオンビームプローブは、今年度に初めて信号を検出することに成功し、近い将来、プラズマの詳細な分布計測に利用できる可能性が大きくなったと言える。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（ゾーナルフロー）が存在する事を世界に先駆けて実験的に明らかにした。

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た。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。今後、これらの機能を使って、コアプラズマの閉じ込めの改善を目指す。現在の問題は、LIDの排気能力が大きく、コアプラズマへの粒子補給が十分でないことにあると考えられており、粒子補給法のさらなる工夫が必要である。

高ベータ実験では、平成16年度は磁場配位の最適化を行った結果、4.3%の体積平均ベータ値（反磁性計測）を得ることに成功した。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いだされていない。新しく採用した磁場配位の長所は、シャフランド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。圧力分布の平坦化による MHD モードの安定化は、ベータ限界を拡大できる可能性を示唆しており、最近の最も重要な研究成果の一つである。これにより、当面は加熱パワーの増強により、ベータ値を高めることが可能と予想している。

ヘリカル型装置では、小さな粒子輸送係数と MHD 安定性を両立させることが課題であるが、LHD はこの問題を解決して、これまでのスケーリング則を約 1.5 倍上回る閉じ込め改善とベータ値 4.3% を実現した。LHD におけるプラズマのさらなる閉じ込め改善は、プラズマ加熱パワーの大幅な増強が容易には行えない現状を考慮すると、研究の進展段階に依らず常に求められている。LHD におけるプラズマのさらなる閉じ込め改善は、先に述べた LID を用いた方法、トカマクの H モードと同様の改善モードの実現、電場で閉じ込めの改善を行う方法等が、現在考えられている。トカマクの H モードと同様の改善モードは、既に観測されている。この場合、周辺部で圧力分布等が急峻になると周辺部の MHD モードが励起され、遷移後閉じ込めの劣化が起り、全体として閉じ込めの改善度はあまり大きくないことが明らかになっている。この周辺部の MHD モードの励起は、前段で述べた高ベータ領域における周辺部の MHD 挙動で説明されるものであり、この方法で大幅な閉じ込めの改善を実現するには、リミターあるいは LID を用いて、周辺部の MHD モードを励起させない工夫が必要であると思われる。この展望は CHS で最近観測されている周辺輸送障壁を伴う H モードは明確なダイバータ構造を持たないリミター配位に顕著であることとも符合している。W7-AS や H-J で、改善度の大きい、トカマクの H モードと同様の改善モードが実現されているのは、回転変換角が小さく、周辺部に高次の MHD モードが存在しないことによる可能性がある。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。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より効率的にプラズマの閉じ込めの改善を図るシナリオである。また、現在の電子主体の加熱か

らイオンを直接加熱する方法を取り入れることにより、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共に、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。

以上のように、LHDは、現在、加熱パワーを増強し、プラズマパラメータ領域の拡大を図って学術研究をさらに進める段階にいると言える。

平成16年度の成果を踏まえて、平成17年度計画は次のように策定されている。

<LHD実験に関する平成17年度計画>

大型ヘリカル装置（LHD）の性能を最大限に発揮させるため、平成17年度は特に次の事項を中心に研究を進める。

1. LHDに設置したアンテナを用いるイオンサイクロトロン共鳴加熱装置や中性粒子入射装置等により、高性能プラズマ、入力エネルギーの大きい長時間放電を目指し、関連する学術研究を行う。
2. プラズマの詳細な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基礎データの取得に努める。
3. プラズマ制御法を工夫し、LHDプラズマの高性能化を目指す。

平成17年度は垂直入射の中性粒子入射装置を製作し、プラズマの高性能化を図ることが、目標の一つになっている。これによりイオンを直接加熱することが可能となり、水素あるいはヘリウムプラズマで高イオン温度を実現するという当初の目標を達成するための足掛かりが得られるものと期待されている。また、この垂直入射の中性粒子を利用して、荷電交換分光法によりイオン温度の詳細な分布計測を予定しており、イオンの輸送等の研究に大きく寄与するものと考えられている。イオンサイクロトロン共鳴加熱装置を中心とした入力エネルギーの大きい長時間放電の目標は、当面 ~ 1 MW、1時間であるが、受熱機器の改良、イオンサイクロトロン共鳴周波数帯域の発振器の整備を伴うものであり、実現には数年間を要する。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は、特にLIDを用いて進める。

シミュレーション研究の成果
平成 16 年度

核融合科学研究所

目 次

1.	はじめに.....	2
1.1	中期目標・中期計画.....	2
1.2	自然科学研究機構平成16年度計画.....	3
1.3	研究組織.....	4
1.4	最近のシミュレーション研究の概要.....	5
2.	平成16年度の研究成果.....	7
2.1	複雑性核融合プラズマ.....	8
2.1.1	LHD プラズマの安定性.....	8
2.1.2	LHD プラズマの非線型発展.....	12
2.1.3	高エネルギー粒子と MHD 現象.....	15
2.1.4	乱流輸送の運動論的シミュレーション.....	19
2.1.5	非局所新古典輸送.....	23
2.2	プラズマ基礎過程（複雑性の科学）.....	25
2.2.1	2次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション.....	25
2.2.2	3次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション.....	28
2.2.3	プラズマと超高強度電磁波との相互作用.....	29
2.3	シミュレーション技法.....	31
2.4	共同研究.....	33
3.	まとめと展望.....	34

1. はじめに

プラズマ・核融合の分野では、どの分野よりも早くから、計算機シミュレーションによる研究が盛んに行われてきた。これは、プラズマが非常に複雑で多様な側面を持っており、理論解析だけでは十分その性質を理解することが困難であるからである。実際、プラズマ現象は本質的に非線形・非平衡であり、また、核融合プラズマを始め、殆どの場合、開放系での極めて複雑な対象である。

核融合科学研究所設立以後も、理論・シミュレーション研究センターを中心に、大型スーパーコンピュータを駆使した大規模計算機シミュレーションを特色とするプラズマ研究を展開してきた。スーパーコンピュータ開発の目覚ましい飛躍的發展の強力な追い風を受け、シミュレーション研究は当初の補助的研究手段の域を脱し、いまや実験・理論に並ぶ第3の研究手法となりつつあることは様々な学問分野において共通の認識となっている。特に、非平衡・非線形・開放系の特性が顕著に発現する核融合プラズマにおいては、その複雑性ダイナミクスの解明に向けてのシミュレーション研究はますます先導的・重要な役割を果たすことが期待されている。さらに、シミュレーション結果の予言精度を高める努力がなされ、実験研究とシミュレーション研究が対等な研究パートナーとなる時代が目前に迫っている。

高精度シミュレーション解法も日進月歩に発展している。また、大型計算機のハード・ソフトの技術は驚くべき速さで進歩しており、また、通信技術の飛躍的發展で、計算機の並列化やネットワークも予想以上に進歩している。このように、計算機シミュレーションを取り巻く環境が大きく変化していることと、これまでの実績を考えると、今や、「シミュレーション科学」とも呼ぶべき新しい学際的学問分野を開拓し、計算機シミュレーション手法によってのみ到達可能な真理の発見を目指してゆかねばならない。

核融合科学研究所におけるシミュレーション研究は、LHDを始めとする核融合プラズマの大規模シミュレーション研究に軸足をおきつつ、「シミュレーション科学」の開拓を強力に実践してゆきたいと考えている。

1.1 中期目標・中期計画

上記の考えは、大学共同利用機関法人自然科学研究機構中期目標・中期計画（平成16年4月1日～平成22年3月31日）に盛り込まれた。即ち、核融合科学研究所における計算機シミュレーション研究の役割が、その計画書の中の

I 研究機構の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するために措置

1 研究に関する目標を達成するための措置

(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
の中で

「核融合プラズマ閉じこ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。そのため

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。」

と書かれている。また、同計画書の中では

2 共同利用等に関する目標を達成するための措置

(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
として

「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、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。」

と明記されている。これは、序に書いた「シミュレーション科学」の創設に他ならない。

1.2 自然科学研究機構平成16年度計画

中期目標・中期計画を達成するため、法人化された研究所の最初の年の年度計画を以下のように定めた。

I 研究機構の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するために措置

1 研究に関する目標を達成するための措置

(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
(核融合科学研究所)

③ 核融合プラズマ閉じこめの物理機構解明とその体系化及び複雑性の科学を探究するために、特に次の研究を推進する。

1. LHDプラズマ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
2. 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
3. 開放系における無衝突磁気リコネクション粒子シミュレーション研究

2 共同利用等に関する目標を達成するための措置

(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
(核融合科学研究所)

② 大型シミュレーション研究を推進するため、以下の事項を推進する。

1. 開放系粒子シミュレーションの高性能プログラミング言語による並列計算の効率化
2. シンポジウム・講習会・報告会等の開催による大型シミュレーションの普及および研究交流

本成果報告においては、中期目標を達成するためのシミュレーション研究の組織、最近の成果を述べ、主として平成16年度計画に沿った成果を記述する。

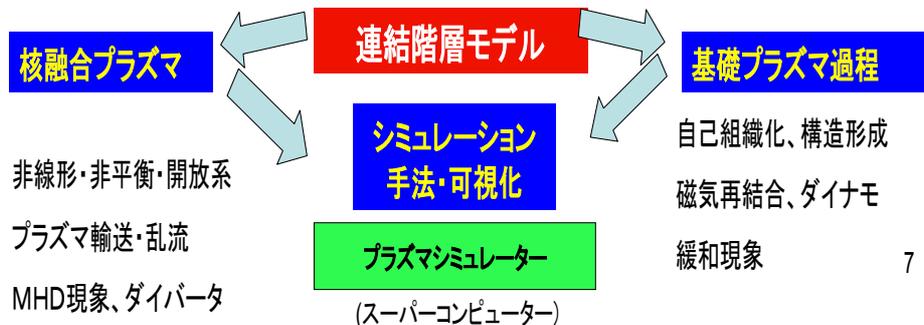
1.3 研究組織

最近の大規模シミュレーションの長足の進歩、小規模・中規模・大規模全てにおける計算機の飛躍的發展を鑑み、更に高度に發展していくアーキテクチャーのことを考えると、シミュレーション研究はこれまでのように個人個人の研究ではなく、ある程度組織的にこれを推進していくことが必要と思われる。

核融合科学研究所では、理論・シミュレーション研究センターを中心にシミュレーション研究を行っているが、理論・データ解析研究系とも協力し、さらには、共同利用研究所であることから大学の研究員も含む形で組織化を考えた。この組織化には、LHDとの関わりも考慮し、LHD実験に協力すると共に、LHDプラズマの解析を中心として核融合プラズマの大規模シミュレーションを、「シミュレーション科学」へと發展させていく狙いも込められている。

新しい組織は、柔軟なものであり、固定されたものではなく、研究の進展と共に組み替えられるものである。

グループ	理論・シミュレーション 研究センター	理論・データ解析 研究系	大学
磁気流体 MHD	中島徳義、三浦英昭、石崎龍一 石澤明宏、伊藤淳、佐藤雅彦	市口勝治、林 隆也	中村祐二 (京大) 鈴木 (京大)
高エネルギー粒子 High Energetic Particles	藤堂泰		村上定義 (京大)
プラズマ輸送・乱流 Transport, turbulence	渡邊智彦、岡本正雄	洲鎌英雄、佐竹真介、 山岸統	石田昭男 (新潟大)
粒子コード Particle Code	堀内利得、石黒静児、中村浩章 大谷寛明、長谷川裕記	佐竹真介	宇佐見 (名古屋大) 高丸尚教 (中部大) 金子 (東北大)
周辺とダイバーター Periphery & Divertor	石黒静児、冨田博幸 高山有道、R. Smimov	菅野龍太郎、C. Harahap	
可視化 Visualization	田村祐一、坂上仁志、 田光江	水口直紀	長谷川 (北里大) 吉岡 (早稲田大)



組織は、先ず大きく、三つに分類される。第1は、複雑性核融合プラズマのシミュレーション

研究を行い、第2グループは、核融合プラズマのみではなく、プラズマ物理にとっての基礎過程を詳細に研究する。第3グループは、これらのシミュレーションを実践するために必要なシミュレーション手法、アルゴリズムの開発研究、3次元可視化、ヴァーチャルリアリティー（VR）の研究・開発を行う。特に可視化は、これを行わないと3次元の計算結果の解析が先ず不可能であり、近年特にその研究が盛んである。

また組織はテーマ別にも組まれている。即ち、磁気流体グループ、高エネルギーグループ、プラズマ輸送・乱流グループ、粒子コードグループ、周辺とダイバーターグループ、可視化グループである。各グループにはリーダーとサブリーダーをおいている。各グループは定期的に会合を開き、それぞれの課題を検討し、協力しながらシミュレーション研究を推進している。三ヶ月に一回程度、全体会で各グループが活動報告を行うことにしている。

1.4 最近のシミュレーション研究の概要

ここでは最近のシミュレーションの成果を列挙する。次の節でこれらの中から、特に、平成16年度の計画に謳われた課題について詳細に述べることにする。

1) 複雑性核融合プラズマシミュレーション

● MHD平衡

LHD内寄せ磁場配位におけるMHD平衡の再構築を新しい観点から考えた。実験的には、ベータ値の上昇と共にプラズマ全体のシャフラノフシフトが生じており、これがプラズマ境界のシフトと変形（境界のフーリエ成分の変調）をもたらすと考えられる。この境界の変調の効果が平衡のMHD安定性に大きく影響することを突き止めた。

● MHD安定性

プラズマの自由境界運動に由来する境界の変形（フーリエ成分の変調）を考慮に入れて、LHD内寄せ磁場配位における3次元線形理想安定性解析を行った結果、ベータ値の増加とともにプラズマの自由境界運動により、線形理想安定性が著しく改善されるという、自律安定化の効果が存在することを明らかにした。

● MHD非線形発展

LHD内寄せ磁場配位の幾何形状を取り入れ、圧縮性も含む完全3次元MHD方程式系の非線形発展直接シミュレーション（DNS）を行うことにより、圧力駆動型MHD不安定性の影響を解析した。電流駆動型モードと違い、圧力駆動型モードは小さいレベルで飽和するか、あるいはほぼ完全に非線形的に安定化されることが分かった。圧縮性、トロイダル流、磁場に平行方向の熱拡散などが決定的に重要であることを明らかにした画期的な成果である。

● 高エネルギーイオン（摂動的取り扱い）

高速イオンがTAEモードを励起し、その飽和現象と、イオン損失機構を明らかにした。TFTRの実験結果を殆ど完全に再現することに成功した。この研究は、将来の燃焼プラズマ実験の予測につながるものである。

● 高エネルギーイオン（非摂動的取り扱い）

高エネルギーイオンによる非局所的MHDモードの励起とその周波数掃引現象のシミュレーションに成功した。また、これまで殆ど成功しなかった魚骨振動のシミュレーションにも成功している。

- 3次元平衡における高エネルギーイオン-MHD シミュレーションコードの開発
2次元平衡における高エネルギーイオン励起モードに関するシミュレーションの知見を元に、LHD に代表される3次元平衡におけるコードを開発中である。
- イオン温度勾配ドリフト不安定性 (ITG) によるプラズマ輸送
ジャイロ運動方程式を、粒子コード (ラグランジュ的解法) ではなく、ブラソフコード (オイラー的解法) で解き、極めて高精度のシミュレーションを行った。スラブモデルから磁束管モデルへと拡張し、系が満たすべき保存則を高精度で保証している。速度空間における超微細構造を正確に捉え、大規模シミュレーションとしては精度において世界最高のもので有り、トカマク及びヘリカル系 (LHD) における層対流やGAM振動などを正確に再現している。このシミュレーションは、それ自体価値があるだけでなく、ジャイロ流体方程式系をモデル化する時のクロージャリーに対して標準的指標を与えるものである。
- 有限軌道幅を考慮した新古典的輸送とGAM振動
トカマク及びヘリカル系における新古典的輸送を、プラズマ粒子の有限幅を正確に取り入れ、ドリフト運動論的方程式を δf 法で解いている。トカマクの磁気軸近傍の粒子の特異な振る舞いを正確に取り入れ、磁気軸近傍の輸送係数を解析的及びシミュレーションで正確に計算した。また、軽電場は、トロイダル粘性力で決まるが、トカマクの場合、これが粒子軌道の磁気面からのずれから生ずることを正確に取り入れ、新古典的径電場の計算を求めることに成功している。この時、トーラス性から発生するGAM (Geodesic Acoustic Mode) を詳細に調べ、GAMの減衰に粒子の有限幅効果が重要な働きをしていることを発見した。
- 正味の電流を考慮し「HINT」コードを改良・発展させた。
- 球形トカマクの爆発的現象のシミュレーションを行った。
- トカマクの電流ホールモードに関して、そのモード維持に電子の慣性項が効くことを示した。
- FRCの傾斜不安定性を粒子コードで研究し、S値が大きいほどより安定であることを示した。
- ダイバータープラズマ
粒子軌道追跡・モンテカルロ法で、LID (Local Island Divertor) に衝突する粒子の分布を調べ、新古典的効果の重要性を明らかにした。

2) 基礎プラズマ過程のシミュレーション

- 磁気リコネクション
ハリス型配位の磁気再結合の基礎的研究を、2次元及び3次元粒子コードで行った。駆動型磁気再結合を開放系で考えた。2次元問題では、磁気中性面は (外部駆動源が無くても) 不安定でドリフトキンクモード (DKM) を発生させる。3次元では、この不安定性は弱まるが、DKMが磁気再結合の電子電流層の幅を決め、イオンの電流層は、中性面におけるイオンのラーモア半径で決まる。この電流層の厚さは実験と良く一致している。

- シア一流による低周波不安定性
円筒中にシア一流を流した時に生じる低周波不安定性を、東北大学の実験と関連してシミュレーションで研究した。
- レーザーとプラズマの相互作用
主としてラーマン散乱に関連して、電子音波の生成・維持、孤立波発生機構などの研究を行った。
- 圧縮性流体力学的乱流の研究
- ダストプラズマ
ダイバータープラズマのダストの運動やダストプラズマにおけるイオン音波の研究を行った。また、ダイバーター板でのシースに関連してテイルが切れたマックスウェル分布におけるA&M過程を研究した。
- ソフトマターのMDシミュレーション
両親媒性分子の自己組織化現象をMDシミュレーションで行った。

3) シミュレーション手法

- 高効率計算法
現有のプラズマシミュレータは、更新前のものより、一気に、速さにして10倍、メモリーにして40倍大きくなった。ノード間並列、ノード越え並列など、多くのプログラムで最適化を図った。MPIやHPFも本格的に使い始め、将来の超大型シミュレーションに備えるべく努力をした。
- ヴァーチャルリアリティシステム（VR）
没入型VRにおいて会話型インターフェースを構築した。
複数のVRのネットワークを構築した。
VRに音響効果を付け加えた。
物体認識のための簡潔、且つ正確な透視法を考案した。
ヘリカル炉設計にVRを利用し始めた。

2. 平成16年度の研究成果

先の研究組織において述べられた3分類、複雑性核融合プラズマ、プラズマ基礎過程（複雑性の科学）、および、シミュレーション技法に共同研究を含めて、平成16年度の研究成果を報告する。

2.1 複雑性核融合プラズマに関する研究内容は、2.1.1 LHDプラズマの安定性、2.1.2 LHDプラズマの非線形発展、2.1.3 高エネルギー粒子とMHD現象、2.1.4 乱流輸送の運動論的シミュレーション、および、2.1.5 非局所新古典輸送で構成される。

2.2 プラズマ基礎過程（複雑性の科学）の研究内容は、2.2.1 2次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション、2.2.2 3次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション、および、2.2.3 プラズマと超高強度電磁波との相互作用からなる。

最後に、2.3 シミュレーション技法と 2.4 共同研究に関する報告を述べる。

2.1 複雑性核融合プラズマ

2.1.1 LHD プラズマの安定性

1) はじめに

3%を越える LHD の高ベータプラズマは、理論的には MHD 不安定と考えられていた真空磁気軸内寄せ配位において達成された。この結果が理論と実験の双方において正しいとするならば、安定性解析の前提としてきた MHD 理論が、少なくとも線形理想 MHD 安定性解析の枠内では、圧力駆動不安定性がその主たる不安定要因である LHD 実験結果の解釈には不十分であり、MHD 非線形発展シミュレーションによる非線形飽和レベルの解析、もしくは、より一般的な運動論効果を考慮した二流体理論等の線形及び非線形解析が必要であるということの意味することになる。ここでの課題は、LHD プラズマの MHD 安定性に関する理論と実験の相違を線形理想 MHD 理論の枠組みの中で再考察し、線形理想 MHD 理論の限界及び妥当性を検討しつつ、両者の相違の解消を試みることである。

線形理想 MHD 理論の枠組みなので再考察するという事は、対象としている MHD 平衡を再考察することに他ならない。なぜならば、線形理想 MHD 安定性解析の結果は、完全に MHD 平衡（平衡の式を満足する磁場と圧力及び質量密度）によって規定されるからである。従来の理論解析における MHD 平衡の決定においては、プラズマは真空の最外殻を越えて広がる事はないという理論的推論が前提とされ、真空最外殻を境界とする固定境界 MHD 平衡、又は、真空最外殻を仮想的なリミターとする自由境界 MHD 平衡が解析の対象とされた。しかしながら、トムソン散乱計測等により実験的にはプラズマが真空の最外殻を越えた領域で圧力勾配を維持していることが確認され、理論解析の前提が実際のプラズマでは破れていることが明らかになった。この実験事実に基づけば、真空の最外殻を越えたプラズマの自由境界運動の元で MHD 平衡を構築すること（自由境界 MHD 平衡）が必要となるが、この場合、真空の乱れた磁場領域のどの領域（程度）までプラズマが広がり、且つ、どの様に圧力勾配を維持し得るか等の質問に理論的に答えなければならない。しかしながら、現在のところこれに対する明確な理論的回答がないため、以下では、真空の乱れた磁場領域においても平均的磁気面が存在する、又は、プラズマのフィルシューリユータ電流がプラズマ内外の磁場を変化させ、乱れた磁場を整形し、平衡の自由境界運動を許し得るという前提を仮定する。

LHD の真空磁場は平面磁気軸配位であり磁気軸の回転変換も小さい。この結果、軸対称成分を主成分とする大きなフィルシューリユータ電流が誘起され、これがプラズマ内外の磁場構造（特に二重極磁場）を変化させ、磁気軸付近のみならず境界も含めたプラズマ全体の大きなシャフラノフシフトと断面形状変形を引き起こす。他方、3次元 MHD 配位の最適化手法から理解できるように、最適化はプラズマ境界の変形を通して行われるものであり（MHD 平衡は楕円型方程式で支配される）、LHD プラズマの潜在的自由境界運動が、プラズマ-真空境界の変形を通して MHD 安定性に著しい影響を及ぼす可能性は容易に想像できるところである。

2) 自由境界平衡と固定境界平衡における安定性の違い

自由境界MHD平衡を構築する場合、プラズマの大きさを決める要素が必要となる。以下では、真空状態でプラズマに含まれるトロイダル磁束が保存されるという条件下で自由境界平衡を考える。真空磁気軸内寄せLHD磁場配位 ($R_{av}=3.6m$) の周辺磁場構造を考慮してプラズマ-真空境界を決定するため、図 2.1.1-1 に横長ポロイダル断面の赤道面上から追跡した磁力線の結合長 (下) と回転変換 ι (上) の主半径R方向分布を示す。図 2.1.1-1 より、

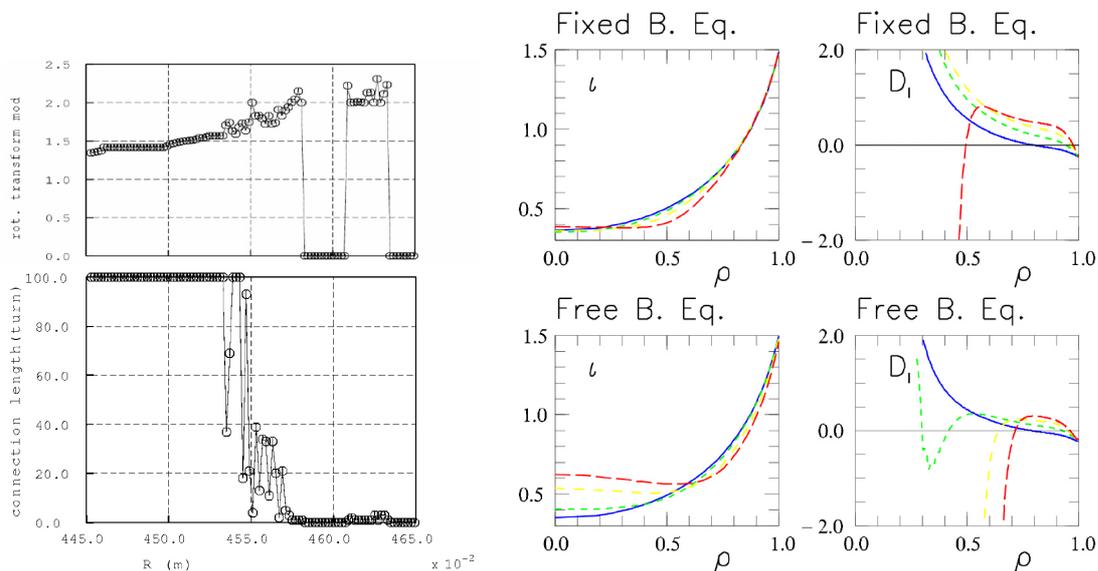


図 2.1.1-1 回転変換(上)と結合長(下)

図 2.1.1-2 固定(自由)境界平衡量の対比

明瞭な閉じた磁気面 ($\iota_v=1.48, R=4.77m$)、最外殻磁気面付近 ($\iota_v=1.58, R=4.79m$)、乱れた磁場領域 ($\iota_v=1.72, R=4.83m$) からそれぞれプラズマ-真空境界を選択し、それぞれに対する自由境界無電流MHD平衡を、固定圧力分布 $P=P_0(1-s)(1-s^9)$ で vmec を用いて計算した (β (ベータ) 値は P_0 で制御した)。境界の選択のMHD安定性に対する影響は構造の異なる真空磁場領域からプラズマ-真空境界を選定する事により考慮している。図 2.1.1-2 に、固定境界平衡 (上) と自由境界平衡 (下) の回転変換 ι (左) とメルシェ安定性判別条件 D_1 (右) の β 値依存性を真空での最外殻が $\iota_v=1.48$ に対応する平衡に対して示している。青、緑、黄、赤は、それぞれ $\beta=1,2,3,4\%$ に対応する。固定境界平衡と比較して自由境界平衡は境界の運動が許されていることにより、 β 値 (シヤフランオフシフト) の増大に伴う ι の変化及び磁気井戸形成が大きく、危険な $\iota=1/2$ の有理面が消失すると共に、メルシェ不安定状態 ($D_1 > 0$) からメルシェ安定状態 ($D_1 < 0$) へと容易に変化することが分かる。 $\beta=3\%$ の固定境界平衡と自由境界平衡に対して、磁気軸でのポロイダルアルフヴェン時間で正規化した成長率 $\gamma \tau_{A0}$ のトロイダルモード数 n 依存性を非圧縮摂動に対して図 3 に示す。ここで第 1,2 列 (第 3,4 列) は固定境界平衡 (自由境界平衡) に対応し、更に、第 1,3 列 (第 2,4 列) は、安定解析における固定境界 (自由境界) に対応する。青、緑、赤は、それぞれ、真空での回転変換が $\iota_v=1.48$ 、 $\iota_v=1.58$ 、 $\iota_v=1.72$ の平衡に対応する。典型的な高 β 実験のパラメータ ($B \sim 0.5T, n_e \sim 3 \times 10^{19} m^{-3}$) に対して、 $\gamma \tau_{A0} \sim 0.1$ は成長時間 $40 \mu sec$ に相当する。異なる真空境界を持ついずれの平衡においても自由境界平衡における成長率は、固定境界平衡におけるものと比較して著しく減少していることが理解できる。更に平衡の分布変分法に基づくバルーニング解析 (元の平衡に対して力の均衡を満たす局所的な摂動を与え、摂動平衡に対するバルーニ

ング安定性を解析する手法。トカマクのs- α 安定性解析を3次元系に一般化したもの)により、固定境界平衡はバルーニング不安定であるが自由境界平衡はプラズマコア領域がバルーニングモードの第2安定化領域に存在し、プラズマ周辺部はバルーニング限界安定付近に存在することが証明されている。従って、大きなフィルシュューシュリユータ電流がもたらすMHD平衡の自由な境界変調が、著しく安定な平衡を自律的に形成していることが理解できる。更に、この安定化は、安定性の境界条件に依存していない。

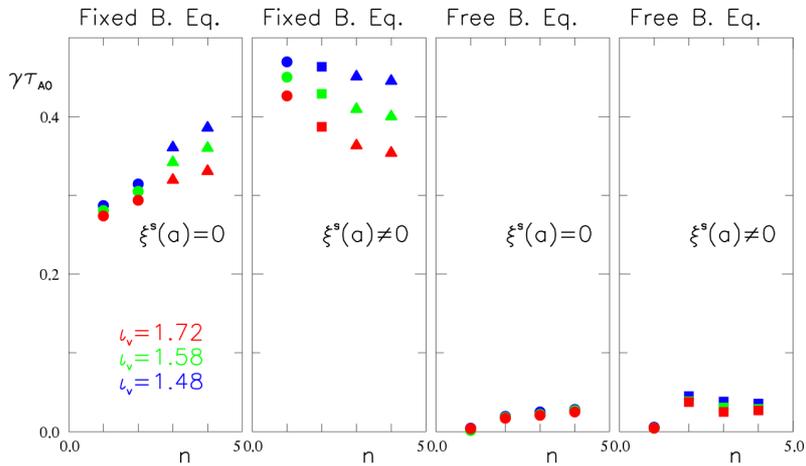


図 2.1.1-3 固定（自由）境界平衡における成長率の n 依存性

図 2.1.1-3 において、○、△、□は、それぞれ、交換型不安定性、バルーニング不安定性、自由境界励起バルーニング不安定性を表している。固定境界平衡はバルーニング不安定であるため、トロイダルモード数の増大と共に交換型不安定性はバルーニング不安定性へと変化する。ただし、低nの不安定性は小半径方向に大域的モードであるため、安定性解析が固定境界 ($\xi^s(a)=0$) と自由境界 ($\xi^s(a) \neq 0$) ではトロイダルモード数nに対する成長率 γ の依存性が異なる。大域的モードの方が自由境界の影響を受けやすく固定境界と比較して成長率が増大しやすい。自由境界励起バルーニング不安定性とは、固定境界 ($\xi^s(a)=0$) での交換型不安定性が自由境界 ($\xi^s(a) \neq 0$) でバルーニング不安定性に変形したものであり、平衡がバルーニング不安定、もしくは、限界安定付近の場合に生じ得る。図 2.1.1-4 に安定性の境界条件の変化に伴うモードの変形の一例を図 2.1.1-3 の自由境界平衡 ($\nu_v=1.72$) におけるn=2 モードに対して示す (図中の数字はポロイダルモード

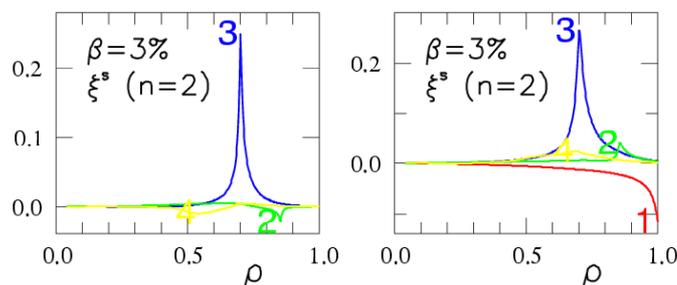


図 2.1.1-4 境界の違いによる不安定モードの変形

数を表す)。固定境界 (左) ($\xi^s(a)=0$) では、隣接するフーリエモードは逆位相であり交換型不安定性の特徴を示しているが、自由境界 (右) では位相が反転し (順位相)、バルーニング不安定性の特徴を示していることが分かる。これは、プラズマ-真空境界での変位が許される ($\xi^s(a) \neq 0$)

と、個々のフーリエモードは小半径方向に広がりやすくモード結合が生じやすくなるためである。更に注目すべきは、真空磁場領域に共鳴有理面を持つ外部共鳴フーリエ成分 $(m,n)=(1,2)$ が励起される点である。プラズマ内部の揺動に対応する真空磁場領域での揺動のフーリエモードの振幅はプラズマ-真空境界での揺動振幅によって決定される。従って、図 2.1.1-4 右においては、 $(m,n)=(1,2)$ モードの真空磁場揺動振幅が大きい。実験での磁場揺動観測は真空磁場の揺動を観測しており、図 4 右の不安定性に対しては、 $(m,n)=(1,2)$ モードが主として観測されることになり、高 β 実験で観測されるフーリエ成分と一致している。

3) 自由境界平衡における安定性

前節で、固定境界平行と自由境界平衡における安定性解析結果の違いを考察し、プラズマの自由境界運動がもたらす境界変調の影響が著しい安定化効果を持つことを考察した。本節では、自由境界MHD平衡に基づく非圧縮摂動の安定性解析の結果を考察する。図 2.1.1-5 は、固定境界条件 ($\xi^s(a)=0$) 下での磁気軸でのポロイダルアルフヴェン時間で正規化した成長率 $\gamma \tau_{A0}$ の β 値依存性をトロイダルモード数 n で識別される 4 モード群に対して示している。メルシェ不安定領域で生じる圧力駆動型不安定性に対しては、摂動と平衡のトロイダルモードの結合が弱いため、各モード群は、トロイダルモード数 $n(=1-4)$ による分類と考えて良い。図から理解できるように、成長率 γ は β 値の増大と共に減少傾向にあることが分かる。不安定モードは全て交換型モードで平衡はバルーニング安定か限界安定に近い。 $\beta=1\%$ から 2% への急激な成長率の減少は、大域的モード構造を持つ $(m,n) = (2,1)$ 交換型不安定性の共鳴有理面 $\iota=1/2$ が消失することによっている。 $\beta=2\%$ 以上での変化はメルシェ不安定性の改善と、バルーニング不安定性の安定化によるものである。更に注目すべきは、固定境界条件下では、成長率が真空の最外殻の選択に依存していない点、及び、成長率のトロイダルモード数依存性が小さい点である。この様に、LHDの真空磁気軸内寄せ配位の自由境界平衡は、本来かなり安定な平衡と考えられる。

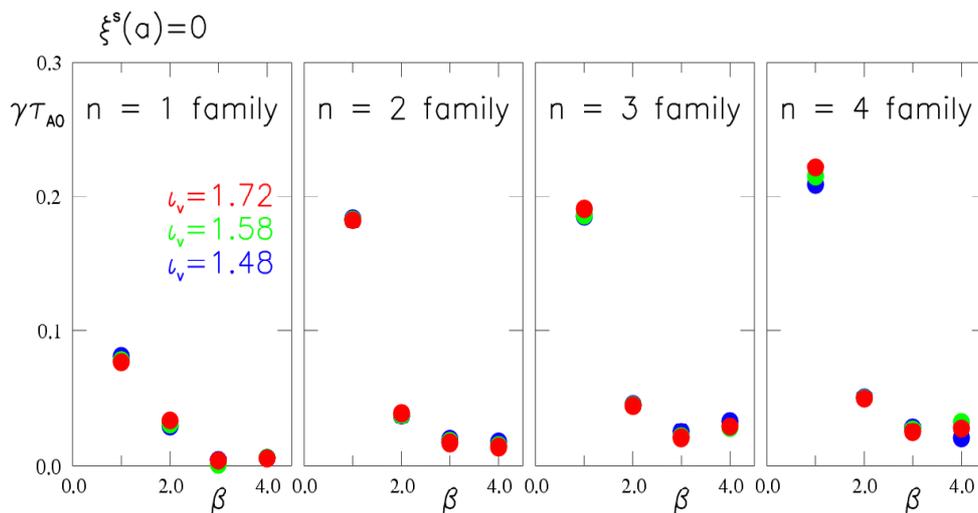


図 2.1.1-5 自由境界平衡における固定境界摂動の成長率の γ の β 値依存性

図 2.1.1-5 においては、自由境界平衡の内部モードの安定性を明確に捉えるため固定境界摂動の安定性解析の結果を検討した。図 2.1.1-6 では、摂動の境界条件を変更し自由境界摂動の安定性解析結果を示す。 β 値が低い平衡では、摂動は小半径方向にかなり局在化しているため、自由境界条件の影響は小さい。しかし、 $\beta \sim 3\%$ 程度になると、自由境界条件の影響が顕著となる。これは

β 値の上昇と共に不安定領域がプラズマコア領域からプラズマ周辺領域に移動し、自由境界によるフリーエモードの結合が顕著になるためである。 $\beta \sim 3\%$ 程度からプラズマ周辺はバルーニング不安定性に対して限界安定に近くなるため、固定境界条件下の交換型不安定性 (○) が、自由境界励起バルーニング不安定性 (□) と変形し、 $\beta \sim 3\%$ を越えると、成長率が増大し始める。更に、この成長率の増大は、真空の境界に依存し、小さなプラズマ (ι_v が小さい) 程大きくなる。これは、同一平均 β 値に対して、実効的圧力勾配が増大するためと考えられる。この様な自由境界摂動の実際的な危険度を検討するため、反磁性回転周波数との比較を行った。その結果、 $\beta \sim 1\%$ 付近を除けば、大きなプラズマにおける成長率は、反磁性回転周波数程度であり、実質的には、閉じ込めに影響を及ぼさないのではないかと推察される。

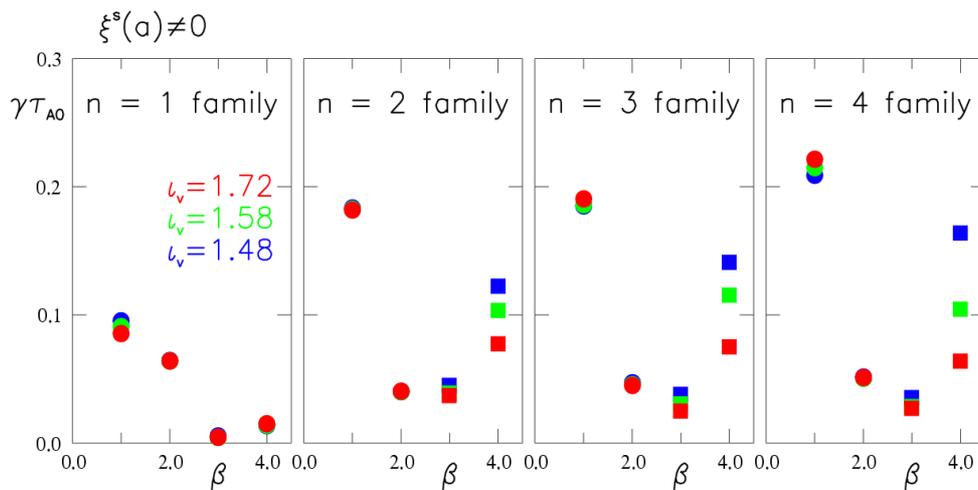


図 2.1.1-6 自由境界平衡における自由境界モードの成長率 γ の β 値依存性

以上の解析結果から、自由境界 MHD 平衡を考えることにより、実験結果と理論解析結果の相違点はかなり解消されたと考えられ得るが、残された問題も明らかとなってきた。先ず、実験的に観測されるモードと安定性解析で得られるモードとの対応が、必ずしも整合性が良くない点である。実験で観測されているモードで、その共鳴有理面が真空中と考えられるモードは、理論的にも外部共鳴フリーエモードとして励起されるが、プラズマ内部モードは理論的には観測可能モードとして励起されない場合がある。プラズマ-真空境界でその値と勾配が消える圧力分布に対しては、境界付近はメルシェ安定であるという事実から、抵抗性モードとの関わりを検証する必要がある。更に、最も重要な点は、本研究では平均的磁気面の存在の仮定の元に考察された MHD 平衡の基本である境界を、周辺に乱れた磁力線を持つ 3 次元磁場プラズマにおいて如何に理論的に設定するかという点であると考えられる。

2.1.2 LHD プラズマの非線型発展

LHD 内寄せ配位の中に閉じ込められたプラズマの非線型発展を、3 次元圧縮性 MHD 方程式の直接数値計算によって調べた。この研究について、2004 年 11 月にポルトガル・ヴィラモウラで開催された、国際原子力機関(IAEA)核融合会議(FEC2004)において口頭発表を行った。

本研究は、これまであまり考慮されてこなかったプラズマのトロイダル方向流れ、圧縮性や自由境界効果などを取り入れた圧縮性 MHD 方程式の直接数値計算を行い、LHD 内寄せ配位の中に閉じ込められたプラズマの挙動を調べるものである。初期条件として真空磁気軸位置 3.6m、ベータ値 4%の平衡配位を用意し、この初期条件に摂動を与えることでプラズマは時間発展を始める。図 2.1.2-1 には、この時間発展における圧力の空間パワースペクトルを示した。このパワースペクトルは、物理量（ここでは圧力）をブーザー座標で記述し、ポロイダル方向(m)およびトロイダル方向(n)にフーリエモード分解して得られる。圧力駆動型不安定性により $m/n=2/1$ モードが成長し、他のモードは 2/1 モードの側帯波として成長していることがわかる。

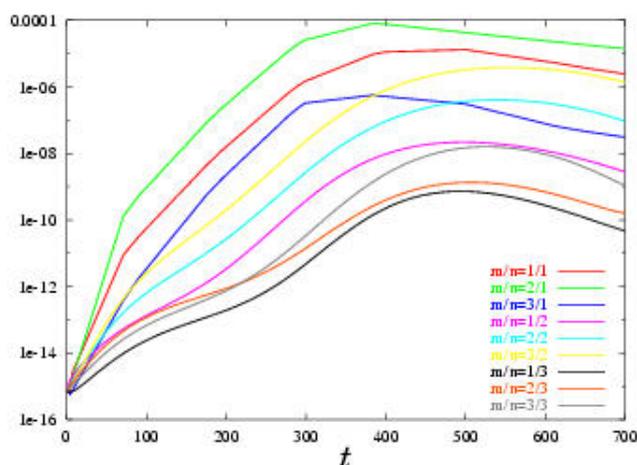


図 2.1.2-1 圧力の空間パワースペクトルの時間発展。ブーザー座標でポロイダル (m)・トロイダル(n)モードに分解し、動径方向に平均した。圧力駆動型不安定性による $m/n=2/1$ モードの指数関数的成長などが見られる。

このような時間発展で得られるプラズマの圧力変形を図 2.1.2-2 に示す。ポロイダル断面上の圧力分布を色付の等高線で、この断面内の速度成分のみを用いて描いた流線を黒い線で描いた。2本の同心状の楕円は、初期平衡における $\iota/2 \pi=1/2$ および $2/3$ の共鳴面を表している。時刻 $t=280$ には $m/n=2/1$ モードの成長により綺麗な反平行渦対が 2 組形成されており、この 2 組の渦対の相互移流によって、 $t=350$ には圧力にマッシュルーム構造が形成される。このマッシュルーム構造は不安定性の飽和($t=500$)を境に次第に緩やかになり、最終的には綺麗な閉じ込め状態の回復の方向へと変化する。

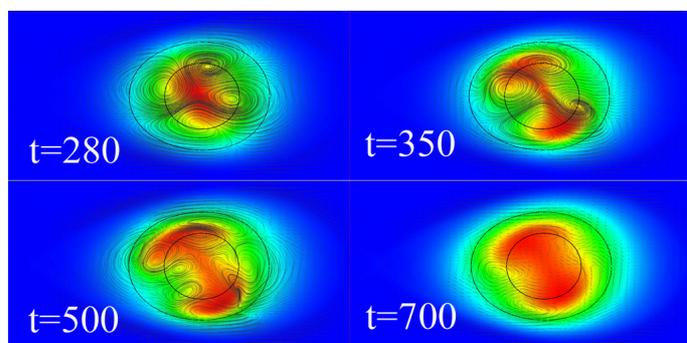


図 2.1.2-2 ポロイダル断面上の圧力等高線(青：低圧力、赤：高圧力)と、速度場のポロイダル成分のみで描いた流線。2 組 4 個の反対称渦対の相互移流により、圧力にマッシュルーム構造が形成される。

図 2.1.2-2 に示した流線はポロイダル断面中の速度成分のみを用いて描いたものであるが、3 次

元の速度場ベクトル3成分を用いて流線を描くと、図 2.1.2-3 のようになる。図 2.1.2-3 には、圧力の等値面を緑色で、また、ポロイダル断面上の圧力等高線を緑色から橙色までの色で示した。時刻は前図の $t=350$ であり、綺麗なマッシュルーム構造が形成されているのがわかる。流線は 3 次元構造をしている。渦巻状の流線は中心部で収束しており、他所へ延びては行かない。これはプラズマの圧縮性の影響である。また、強いトロイダル流れの影響で、流線はトロイダル方向に大きく傾いている。これまでのヘリカル系 MHD シミュレーションは簡約化 MHD 方程式が中心で、この場合には流れはポロイダル面内に閉じ込められた非圧縮性運動に限定されている。しかし我々の研究は、不安定性の成長の際にはトロイダル流れが成長すること、そしてその運動は往々にして圧縮性であることを示している。

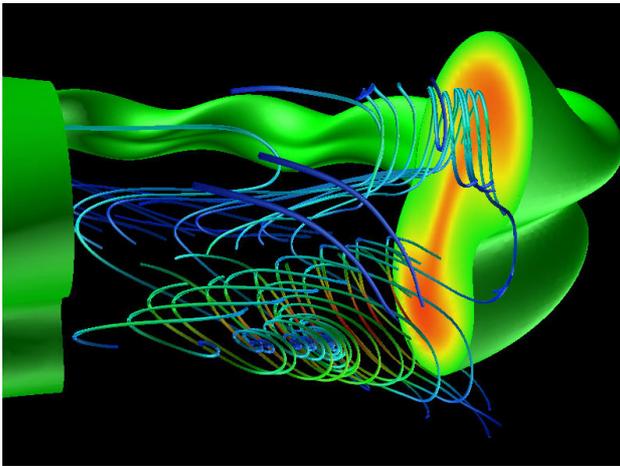


図 2.1.2-3 圧力の等値面(緑色)およびポロイダル断面上の等高線と流線。流線の渦巻きが中心部で他所へ行かず収束しているのは圧縮性の影響である。また、強いトロイダル流れの影響で渦はトロイダル方向に傾いていることがわかる。

不安定性の成長においてトロイダル運動の及ぼす影響の大きさを、トロイダル運動とポロイダル運動の運動エネルギーへの寄与の大きさの比較で調べたのが図 2.1.2-4 である。赤線はトロイダル運動の、青線はポロイダル運動の寄与の大きさを示す。この図からわかるように、初期においてこそポロイダル運動が運動エネルギーの大半を占めるが、線型成長の過程でトロイダル運動が成長を始め、非線型飽和の段階に至ると両者の差は非常に小さくなる。ポロイダル運動が速度場 2 成分の寄与を含むのに対してトロイダル運動の寄与はトロイダル方向の速度場 1 成分の寄与しか含まないことを考えると、トロイダル運動が非常に大きくなっていることがわかる。非線型飽

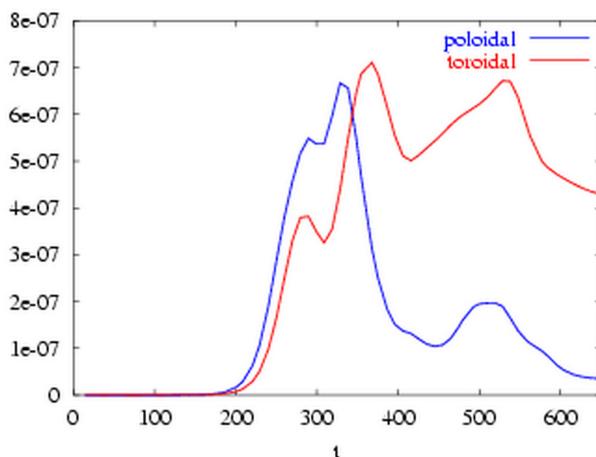


図 2.1.2-4 運動エネルギーの時間発展に対するポロイダル運動(青)、トロイダル運動(赤)の寄与。非線型飽和の前後で、トロイダル運動がポロイダル運動よりも大きくなっていることがわかる。

和の少し後にはトロイダル運動の寄与がポロイダル運動よりも大きいことがわかる。このように、トロイダル運動はプラズマの不安定性の時間発展に欠くべからざる寄与を行っている。

このように、LHD 中のプラズマ運動ではトロイダル運動や、圧縮性が無視し得ない寄与を行っている。安定性への詳細な影響はまだ研究途上にあるが、現段階ではトロイダル方向にエネルギーを逃がすことでプラズマはより安定な挙動を示すのではないかと考えられる。上のシミュレーションでは平行方向に特別な熱伝導効果は取り入れておらず、等方的な熱伝導効果のみ考慮されている。しかし、現実の実験では、磁力線平行方向に非常に大きな熱伝導効果が入っていると考えられる。平行方向への熱伝導効果は、垂直方向への熱伝導や他の物理的な効果とは完全に時間尺度が異なり、異なる二つの時間尺度階層が連結されたモデルになっている。このようなシミュレーションは非常に困難であるが、現在この磁力線平行方向への熱伝導効果を取り入れるためのシミュレーションコードの改良と精度の確認を行っている。

2.1.3 高エネルギー粒子と MHD 現象

理論・シミュレーション研究センターでは、高エネルギー粒子-MHD 統合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高エネルギー粒子と MHD 現象の研究を推進している。摂動論的シミュレーションを実行して、TFTR トカマクにおいて観測されたアルヴェン固有モードバーストと高速イオン損失を定量的に再現することに成功した。さらに、ヘリカルプラズマを対象とした MEGA コードを開発し LHD におけるアルヴェン固有モードのシミュレーションを実行するとともに、JT-60U の弱磁気シアプラズマ中心に存在する非局所的高エネルギー粒子モード(nonlocal EPM)の線形性質と非線形発展における周波数掃引について研究した。

1) アルヴェン固有モードバーストと高速イオン損失のシミュレーション研究

TFTR における NBI 加熱実験において、複数のトロイダル・アルヴェン固有モード(Toroidal Alfvén Eigenmode: TAE)がバースト的に成長・減衰を繰り返し、それに付随して高速イオン損失が発生することが報告されている。この TAE バーストと呼ばれる現象は、(a) 高速イオンの発生・蓄積- (b) TAE の不安定化- (c) 高速イオンの輸送・損失- (d) TAE の安定化- (a)、という循環過程であると考えられている。

摂動論的シミュレーションを実行して、TAE バーストの実験結果を定量的に再現することに成功した。摂動論的シミュレーションにおいては、TAE のモード構造は線形固有モードのまま変化しないという仮定の下、TAE の振幅及び位相の時間発展と高速イオンの非線形運動が自己無撞着に追跡される。再現された実験結果は、バースト時間間隔、高速イオン蓄積エネルギー、1 回のバーストによる高速イオン損失割合である。TAE の飽和振幅は実験から推定されるレベルよりも大きな値であった。高速イオンの位相空間構造の解析により、複数モードの共鳴の重なり(resonance overlap)と単独モードの高次共鳴の重なりによる KAM 面の消失が高速イオンの損失をもたらしていることが明らかになった。図 2.1.3-1 に高速イオン密度分布時間発展の鳥瞰図を示す。プラズマ中心部において蓄積した高速イオンが TAE バーストによって損失して減少し、TAE が減衰した後に再び蓄積するという過程を図 2.1.3-1 に見ることができる。

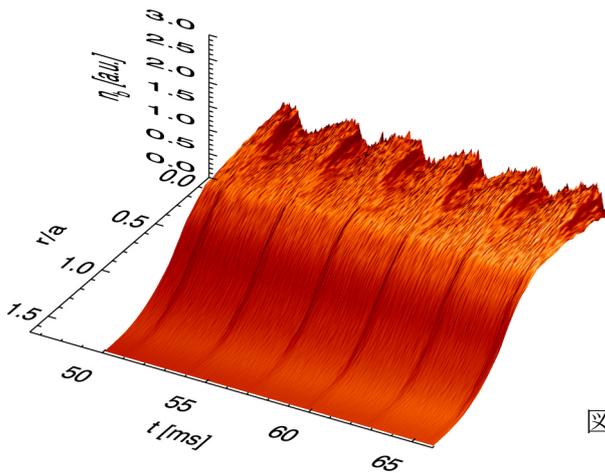


図 2.1.3-1 高速イオン密度分布の時間発展。

2) ヘリカルプラズマを対象とした高エネルギー粒子-磁気流体シミュレーションコードの開発
 ヘリカルプラズマを対象とした高エネルギー粒子-磁気流体統合シミュレーションコード MEGA を開発した。使用した座標系はヘリカル座標系であり、この座標系はヘリカルプラズマ MHD 平衡計算コード HINT に採用されている。このため、HINT コードを用いて計算した MHD 平衡データを初期条件としてそのまま使うことができるという利点がある。MHD 平衡における力の釣り合いと粒子軌道についてコードのテストを行った。さらに、LHD プラズマにおける $n=2$ トロイダル・アルヴェン固有モード(TAE)に関するシミュレーションを行い、TAE として矛盾のないモード空間分布と周波数を得た。計算の結果得られた TAE の動径方向速度場の時間発展と動径方向分布を図 2.1.3-2 に示す。

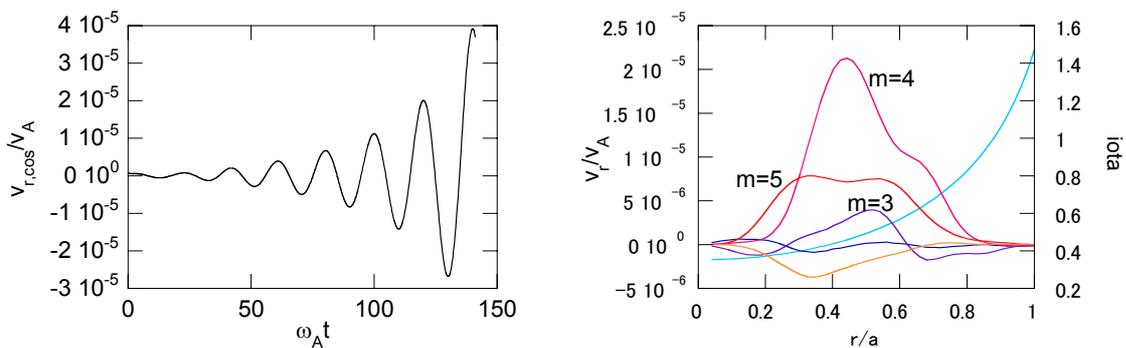


図 2.1.3-2 LHD プラズマにおける $n=2$ トロイダル・アルヴェン固有モードの動径方向速度場の時間発展（左図）と動径方向分布（右図）。右図には回転変換分布もあわせて示されている。

3) 弱磁気シアプラズマ中心に存在する高エネルギー粒子モード

JT-60Uにおける高エネルギーイオン駆動不安定性をMEGAコードを用いて調べた。調べたプラズマでは速い周波数掃引モード(Fast Frequency Sweeping Mode)が観測されている。このプラズマは磁気シアが弱く、安全係数は図 2.1.3-3 のような分布である。図 2.1.3-3 には安全係数分布に加えて、トロイダルモード数 $n=1$ のアルヴェン連続スペクトルとシミュレーションによって明らかになった不安定モードの周波数と位置が示されている。不安定モードの空間分布は安全係数分

布が平坦なプラズマ中心付近で最大値をとる。この不安定モードはTAEではない。空間分布がTAEとして予想される位置($r/a \sim 0.8$)と異なっているからである。この不安定モードの実周波数は、実験における速い周波数掃引モードの開始周波数に近い値である。シミュレーションの結果、高エネルギーイオン軌道幅と高エネルギーイオン圧力が不安定モード動径方向分布幅を非常に大きくすることがわかった。異なる高エネルギーイオン平行ラーモア半径に対する不安定モードのピーク位置(r_{peak})と動径方向分布幅(Δr_w)を図 2.1.3-4 に示す。平行ラーモア半径に安全係数値を乗じたものがおよそその軌道幅を与えるので、平行ラーモア半径に対する依存性は軌道幅に対する依存性と見なすことができる。高エネルギーイオン軌道幅が大きいほど、不安定モードの動径方向分布幅が大きいことを図 2.1.3-4 は示している。

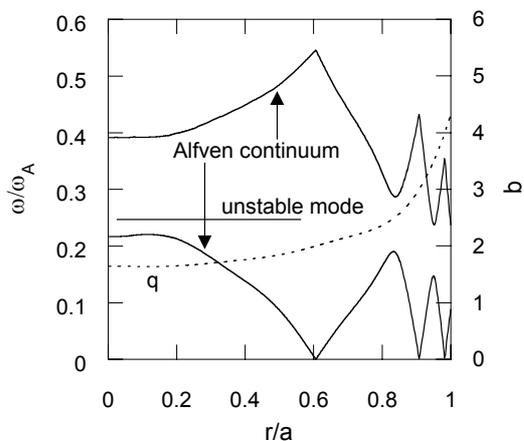


図 2.1.3-3 不安定モードの周波数と位置。安全係数分布と $n=1$ アルヴェン連続スペクトルが同時に示されている。

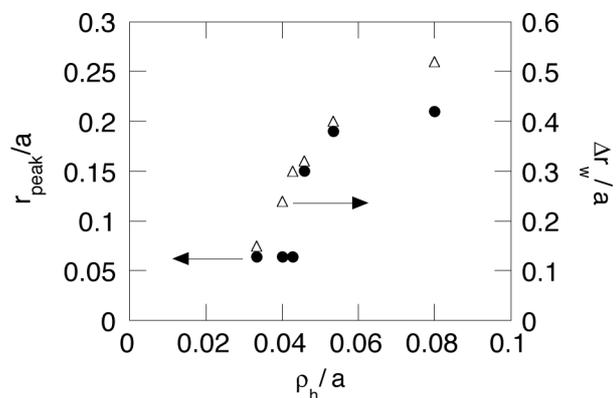


図 2.1.3-4 小半径で規格化された高速イオン平行ラーモア半径に対する不安定モードのピーク位置(r_{peak})と動径方向分布幅(Δr_w)。

調べた高エネルギーイオン軌道幅の中で最大値($\rho_h/a = 0.08$)と最小値($\rho_h/a = 0.033$)の場合の不安定モードの空間分布を図 2.1.3-5 に示す。最大値の場合が JT-60U における実験条件に相当する。平行ラーモア半径が最小値の場合の不安定モードは小半径の 20% 以内に局在している。高エネルギーイオン軌道幅を 0 にとった極限において不安定モードが存在するならば、それは磁気流体固有モードである。しかし、高エネルギーイオン軌道幅を小さくしていくと、不安定性の成長率も小さくなるため、軌道幅が 0 の場合を調べることはできない。軌道幅が 0 の場合に磁気流体固有モードが存在するのかどうかは今後の課題であるが、高エネルギーイオン軌道幅を最小にした場合のモード空間分布 (図 2.1.3-5 右図) は、高エネルギーイオンとは無関係に磁気流体効果のみで誘導できる空間分布幅の上限を与えていると解釈することができる。JT-60U の実験条件においては、図 2.1.3-5 左図に示されているように、不安定モード空間分布の動径方向の幅は右図と比較して 3 倍も広い。つまり、JT-60U の実験条件で現れる不安定モードは主として高エネルギー粒子によって誘導されている、と言うことはできる。したがって、JT-60U の実験条件で現れる不安定モードを非局所的高エネルギー粒子モード(Nonlocal Energetic Particle Mode)と名付けた。

この結論を確認するため、非局所的高エネルギー粒子モードの動径方向復元力を解析した。磁

気面ごとに圧力勾配、ローレンツ力、高エネルギーイオンローレンツ力の動径方向成分を解析し、MHD 動径方向速度の位相を考慮して、MHD 速度場の振動に寄与している力の成分 (=復元力) を取りだしたのである。さらに復元力を密度と動径方向速度の絶対値の積で除すことにより、復元力と等価な周波数を磁気面ごとに計算した。この周波数はどの磁気面においてもほぼ一定値をとり、非局所的高エネルギー粒子モードの周波数と一致した。ただし、MHD 復元力のみで一定の復元力を生み出しているわけではなく、磁気面によっては高エネルギーイオンによる復元力の絶対値が全体の6割に達し、MHD 復元力と高エネルギーイオン復元力が合わさって初めて空間的に一定の復元力が構成されていることに注意が必要である。

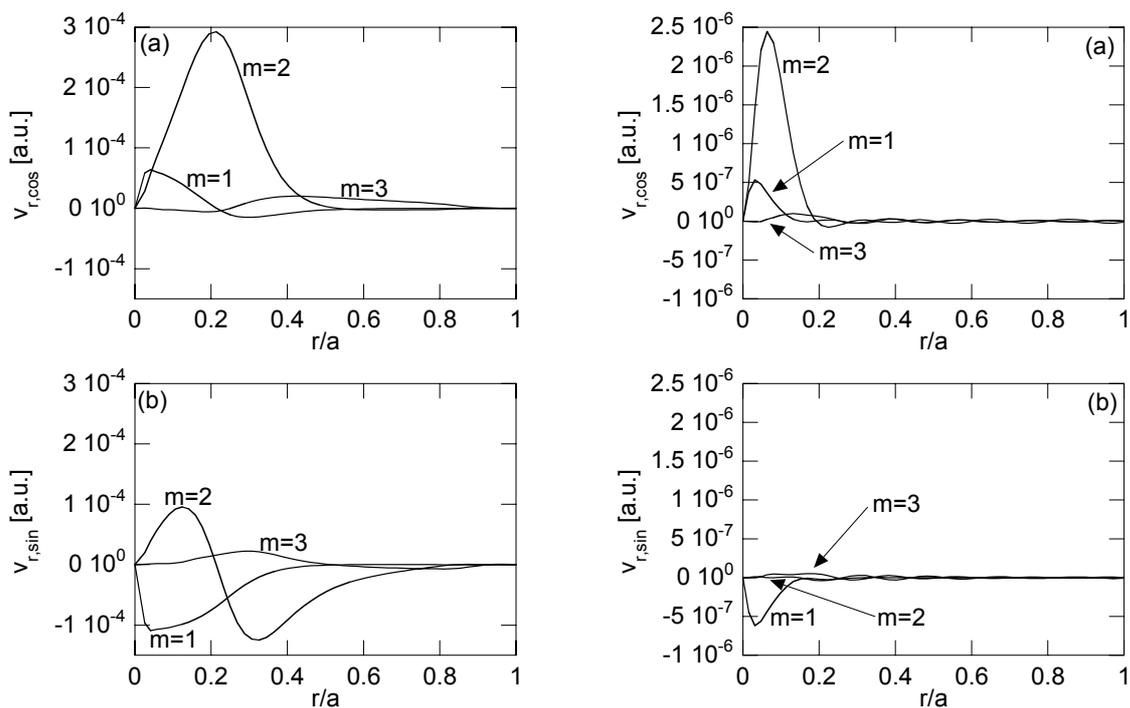


図 2.1.3-5 高速イオン平行ラーモア半径と小半径の比が $\rho_h/a = 0.08$ (左図) と $\rho_h/a = 0.033$ (右図) の場合の不安定モードの径方向速度分布。トロイダルモード数は $n=1$ であり、(a)は余弦成分、(b)は正弦成分をそれぞれ示している。

4) 非局所的高エネルギー粒子モードの周波数掃引

非局所的高エネルギー粒子モードが臨界安定状態に近い場合の非線形発展をMEGAコードを用いて計算した結果、周波数が上下に分離することがわかった。図 2.1.3-6 左図は磁場揺動の時間発展を示し、同右図はその周波数スペクトル時間発展の等高線図である。図 2.1.3-6 右図から 10^3 アルヴェン時間($\sim 0.8\text{ms}$)に上下にそれぞれ約9%($\sim 5\text{kHz}$)の周波数変化が起こっていることがわかる。この変化率はJT-60Uにおける速い周波数掃引モードの実験値に近い。また、共鳴粒子駆動による線形成長率(γ_L)と比較してモード減衰率(γ_d)が40%以上に達する場合には、位相空間において孔塊対生成(hole-clump pair creation)が起こり、周波数が上下に分離して変化することが理論的に知られている。この理論によると、上下それぞれの周波数変化は $\delta\omega = 0.44\gamma_L(\gamma_d t)^{1/2}$ で与えられる。MEGAコードによる計算結果から得られた線形成長率およびモード減衰率をあてはめると、理論

が予言する周波数変化は上下にそれぞれ約 6kHz となり、シミュレーション結果に近い値である。従って、シミュレーション結果の周波数掃引は孔塊対生成によるものと考えることができる。

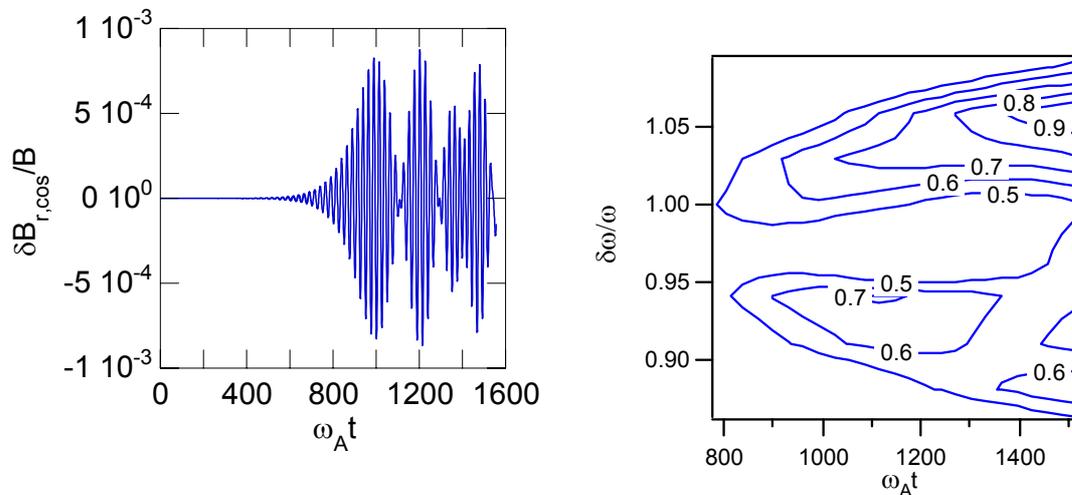


図 2.1.3-6 非局所的高エネルギー粒子モードの動径方向磁場揺動余弦成分の時間発展（左図）とその周波数スペクトル時間発展の等高線図（右図）。

2.1.4 乱流輸送の運動論的シミュレーション

トロイダル磁場配位に対応したイオン温度勾配 (ITG) 乱流のジャイロ運動論的ヴラソフ・シミュレーション・コードを新たに開発した。位相空間における分布関数構造をこれまでになく正確に再現することが可能となり、帯状流と測地線音波モード (GAM) の運動論的振る舞いを明らかにするとともに、トロイダル ITG 乱流におけるエントロピー釣り合いと分布関数の位相空間構造を高精度で再現することに成功した。

1) はじめに

磁場閉じこめ核融合装置においては、粒子間 2 体衝突に起因する古典および新古典輸送理論の予測レベルより遙かに大きな粒子および熱の輸送が生ずる。周知の通り、いわゆる「異常輸送」は、プラズマ中に発生する乱流揺動により引き起こされていると考えられ、その輸送機構の理解と輸送量の予測は、磁場閉じこめ核融合研究の中心課題となっている。基本的な方程式のレベルから乱流輸送を再現し、その機構を解明するために計算機シミュレーションが盛んに行われるようになった。特に近年、トロイダル形状を取り入れた大規模なプラズマ乱流シミュレーションが、世界各国で活発に進められている。その結果、帯状流と乱流の相互作用や乱流輸送の抑制などの重要な知見が得られており、実験との比較・検証なども試みられている。一方、プラズマ乱流輸送現象のより深い理解や、シミュレーション結果の信頼性という観点からすると、用いられているシミュレーション・モデル、手法、および得られた結果には、未だ改善の余地が多く残されている。特に近年の大型実験装置で実現される高温プラズマでは、粒子の平均自由行程が装置スケールの千倍程度にもなるため、通常の流体近似はもはや成り立たず、速度分布関数に基づく運動論的な取り扱いが必須となる。このことが、異常 (乱流) 輸送の数値シミュレーションが困難なものとなる最大の要因である。

こうしたプラズマ乱流輸送現象に取り組むために、我々はこれまでにシミュレーション手法の検討から始め、2次元スラブ配位におけるイオン温度勾配 (ITG) 乱流のシミュレーションや、運動論的流体方程式の完結モデルなどについて研究を進めてきた。平成15年度後半から16年度にかけて、新たにトロイダル配位を用いたシミュレーション・コードを開発し、その検証を行った。さらに、帯状流と測地線音波モード (GAM) のダイナミクス、および、トロイダル ITG 乱流におけるエントロピー釣り合いと分布関数構造についてシミュレーション研究を行った。以下にその概略を報告する。

2) シミュレーション・コード開発

トロイダル磁場に沿った局所領域のみを取り扱うフラックス・チューブ配位において、イオン速度分布関数についてのジャイロ運動論方程式を直接数値的に解くことのできるコード、いわゆる「ジャイロ運動論的ブラソフ・シミュレーション・コード」を開発した。この手法では、5次元位相空間における分布関数を求めることができ、これまでの粒子 (δf) 法では求めることのできなかった分布関数の微細構造をもとらえることが可能となるなど、従来とは質的に異なるシミュレーション結果が得られる。同時に、衝突項を自然な形で取り入れることができるのも大きな利点である。さらに、実空間に磁気座標を用いることで、トーラス外側に局在したバルーニング型のモード構造を正確に再現することが可能となる。この手法を用いて得られたトロイダル ITG モードの線形固有関数がある磁気面上でカラーマップにより図 2.1.4-1 に表示した。また、この計算で得られた線形固有周波数と成長率を図 2.1.4-2 にプロットした。どちらも線形解析と非常によい一致が見られる。

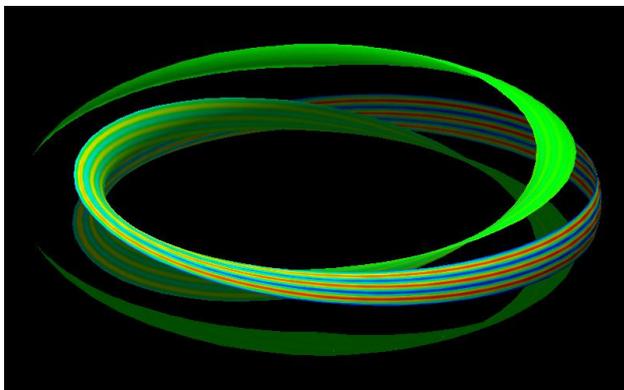


図 2.1.4-1 トロイダル ITG モードの線形固有関数

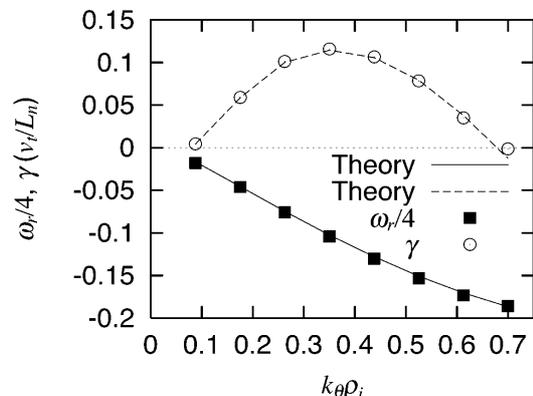


図 2.1.4-2 トロイダル ITG モードの線形固有周波数と成長率

ここで開発したシミュレーション・コードは、核融合科学研究所に現有の SX-7 システムに最適化されている。磁力線を横切る方向にスペクトル分解を用いているため、非線形項の計算にはフーリエ変換が必要となるが、その操作は共有メモリを有する単一ノード内に局所化されている。複数ノードに渡る並列化には MPI (Message Passing Interface) ライブラリを用い、ノード内での共有並列とのハイブリッドとなっている。さらにループ融合やベクトル化ループの選択などの最適化を行い、実効性能 500Gflops (理論ピーク性能の 35%) 以上という高効率を達成している。またこうした技術開発の積み重ねにより、以降に述べる大規模な運動論的プラズマ乱流輸送のシ

ミュレーションが可能となった。

3) 帯状流と測地線音波モードのダイナミクス

ドリフト波乱流、特に ITG モード乱流において、トロイダル及びポロイダル方向に一様で、動径方向にシアを持つ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 流が自発的に生成され、輸送の抑制に重要な働きをすることが知られている。この $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 流を帯状流と呼ぶ。一方、ポロイダル方向に有限のモード数（特長的にはモード数 $m=1$ ）を持ち、イオンのバウンス周波数程度で振動する測地線音波モード（GAM）が知られている。トロイディシティーにより両者は結合し、トロイダルモード数 $n=0$ の静電揺動を与える。

帯状流と GAM 振動の特性を理解するために、トカマク配位における $n=0$ モードの静電揺動に対する線形初期値問題が Rosenbluth と Hinton により理論的に考察された。無衝突プラズマのジャイロ運動論に基づく解析では、初期に与えられた $n=0$ のゆらぎは GAM 振動の励起とその減衰により振幅が減少するが、時間の経過後ある一定値に漸近することが理論的に示された。帯状流成分の ITG 乱流輸送に対する重要性に鑑みて、これはジャイロ運動論シミュレーションを検証するために必須のベンチマーク・テストの一つにもなっている。図 2.1.4-3 に示すように我々の開発したコードは、理論が予測する帯状流の残存レベル（破線）を見事に再現している（実線）ことが確かめられる。

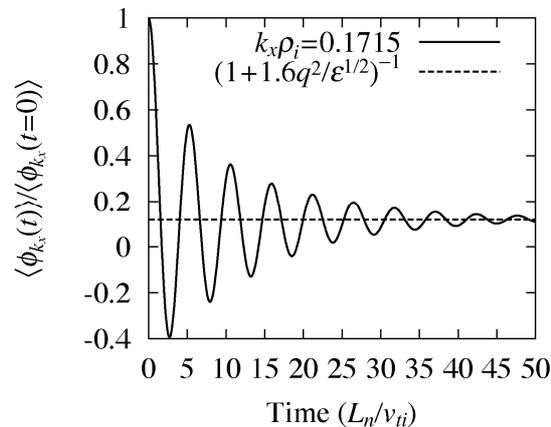


図 2.1.4-3 トカマク配位における $n=0$ モードの静電揺動の時間発展。

また、以下に述べるように、このシミュレーションにより帯状流と GAM 振動のダイナミクスに関する重要な運動論的側面が明らかとなった。分布関数のゆらぎの自乗積分で与えられるエントロピー揺動が、帯状流成分を取り除いたポテンシャルエネルギーと厳密に釣り合うこと、つまり問題としている系が一種の保存系をなすことが初めて示された。従来のシミュレーションとは異なり、分布関数の微細揺動までも分解できる我々のシミュレーションでは、こうした帯状流成分の運動論的性質を良く再現することができる。その端的な例が図 2.1.4-4 左図に示す分布関数の速度空間構造に現れている。初期に与えた Maxwell 分布が非捕捉粒子の運動にともなう位相混合により大きくゆがめられ微細構造が発達していく。これにより GAM 振動の減衰がおきる。一方、捕捉粒子には理論的な予測（図 2.1.4-4 右図）にある新古典分極効果に対応したコヒーレントな構造が保たれており、帯状流の有限な残存レベルに対応している。このシミュレーションは、帯状

流と GAM の運動論的振る舞いを、分布関数のレベルから初めて明らかにしたものと言える。

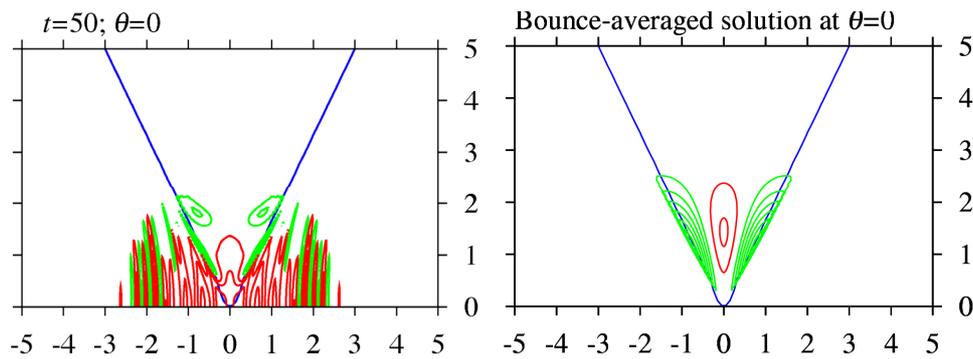


図 2.1.4-4 分布関数の速度空間構造。

4) イオン温度勾配乱流と分布関数構造

イオン温度勾配により駆動される不安定性とその非線形発展としてあらわれる乱流状態については、これまでも多くの理論・シミュレーション研究がなされてきた。上述の帯状流のダイナミクスにも見られるように、無衝突または衝突周波数の低い高温プラズマにおいては、速度分布関数に微細な揺動成分が発達し、複雑な構造を呈する。そのため、ジャイロ運動論に基づいた速度分布関数の解析が必要となる。しかしながら、従来のシミュレーションでは速度空間の解像度が不十分なため、分布関数の構造やそれと輸送の関連についてはほとんど議論されてこなかった。我々はこれまで、2次元スラブ ITG 乱流を対象として、速度分布関数の微細構造形成、それと関連したエントロピー揺動の生成・伝達・散逸過程と乱流輸送について、非常に高精度なシミュレーションをもとに研究を進めてきた。同様の観点からトロイダル ITG 乱流輸送のシミュレーションを行った。図 2.1.4-5 左と中央に線形および乱流状態でのポテンシャル揺動分布をカラー図で示す。

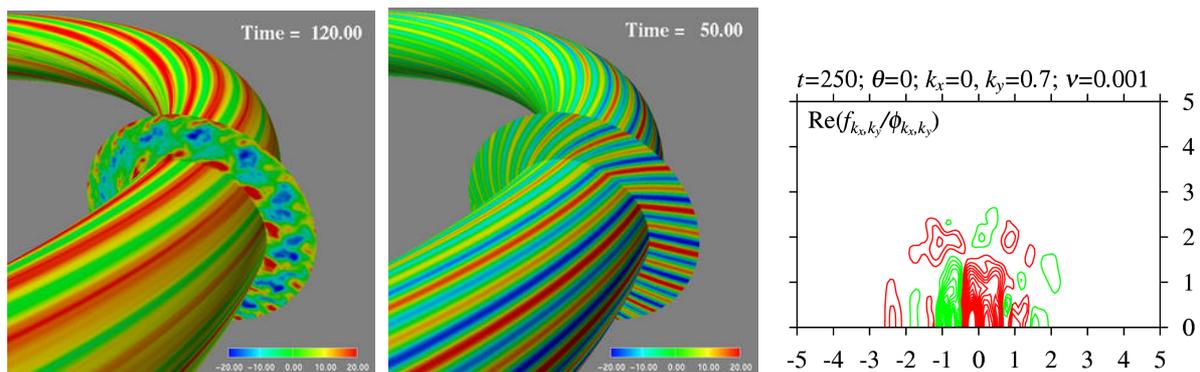


図 2.1.4-5 線形（左図）および乱流状態（中図）でのポテンシャル揺動分布。右図は速度分布関数の微細揺動成分を示す。

乱流状態では、帯状流が生成され、輸送レベルの低減をもたらしている。この時、線形不安定モードから安定モードへ、さらに、速度空間内の大きなスケールから小さなスケールへと分布関数揺動が運ばれ最終的に衝突による散逸とバランスして、定常状態が維持されることが確かめられた。図 2.1.4-5 右図に見られるように、特に安定モードにおいては、速度分布関数の微細揺動成

分が発達する。こうした分布関数の微細構造を正確に再現し、系のエントロピー釣り合いを満足するには、5次元位相空間における分布関数を高精度かつ高分解能で求める必要がある。ここで示した例ほど精密なジャイロ運動論シミュレーションは、世界的に見ても類例が無く、独創的な成果をあげているといえる。運動論的プラズマ乱流輸送の物理機構をより良く理解し、輸送係数をより定量的に予測することを目指して、手法やモデル開発を含めて、トロイダルプラズマにおける乱流輸送の運動論的シミュレーション研究を今後さらに幅広く進めていく予定である。

2.1.5 非局所新古典輸送

新古典輸送理論において、荷電粒子軌道の径方向のドリフト軌道幅の有限性や、最外殻磁気面を横切る軌道をもつ粒子の軌道損失の効果を考慮した場合にもたらされる輸送現象の非局所的な振る舞いは、主に解析的な手法で研究されてきた従来の新古典輸送理論では十分に扱うことができなかったが、プラズマ全体の非局所輸送現象のグローバルな振る舞いや、実験における閉じ込め性能をより正確に理解するうえで重要な研究課題の一つであり、トカマク型、ヘリカル型の磁場配位を問わず近年注目されている問題でもある。

我々はこの研究課題に取り組むにあたり、従来の解析モデルと比べより近似、仮定の少ない直接的な数値計算モデルをもとに新古典輸送現象をシミュレートする数値計算コード (FORTEC-3D) の開発を理論・シミュレーション研究センターの大型シミュレーション研究用解析装置を用いて行ってきた。FORTEC-3D の主な特徴は以下の通りである。

- δf モンテカルロ法を採用し、有限軌道幅効果を含めた非局所的な新古典輸送現象を数値モデル化するとともに、モンテカルロシミュレーションにおける統計的な数値ノイズと計算コストを軽減した。
- MHD 平衡を解く VMEC コードから得られる磁場配位データを参照することによって、任意の軸対称、非軸対称系でのシミュレーションを可能とした。
- フォッカー・プランク型の衝突オペレーターがもつ保存量を厳密に保持する衝突項のモデルを採用した。
- 衝突オペレーターに使われる擬似乱数の発生に関して、Mersenne twister 法を用いた並列乱数の発生法を適用することによって高い並列化効率を達成した。
- シミュレーションにおいては径方向の新古典粒子フラックスの計算と同時に、イオン、電子粒子フラックスの不釣り合いから生じる径方向電流に対応した径電場の時間発展もプラズマ全体で解くことができる。
- 従来の新古典輸送理論が扱っている輸送のタイムスケールでの準定常的な振る舞いよりも短い、粒子運動のバウンス時間程度の速いタイムスケールの現象からイオン衝突時間程度で起こる両極性電場の形成過程までの現象をシミュレートすることが可能である。速いタイムスケールでの時間発展において注目される、GAM 振動とそのランダウダンピングなどもシミュレートすることが可能である。
- この径電場の時間発展において、特にヘリカル系プラズマでは従来の δf シミュレーションが扱っていたイオン輸送だけでなく、電子輸送も同時に解く必要があるが、有限軌道幅効果の無視できる電子に対しても δf 法を採用するのは計算コスト上好ましくない。

そのため、我々の数値モデルでは電子輸送に対しては非軸対称系プラズマに対してリップル平均化したドリフト運動論方程式を数値的に高速に解ける GSRACE コードの解を用い、これに非局所的輸送効果を含んだ δf コードによるイオン輸送計算を合わせるハイブリッドシミュレーションモデルを開発した。

本年度、FORTEC-3D の開発はほぼ完了し、ベンチマークとこのシミュレーションを用いた幾つかの初期的な研究を行った。研究成果としては GAM 振動のプラズマ全体でみたグローバルな時間発展のシミュレーションを LHD 磁場配位、トカマク型磁場配位の両方で行い、10月にポルトガルで開かれた第20回 IAEA 核融合エネルギー会議でのポスター発表などを行った。図 2.1.5-1 は LHD 磁場配位における径電場の時間発展の様子を示したものである。規格化小半径 $\rho < 0.5$ において見られる径電場振動は GAM 振動である。この計算例では GAM 振動の減衰は主に無衝突プラズマにおけるランダウ減衰的な機構によって起こっている。LHD プラズマでの大きな特徴は周辺領域で回転変換が 1 より大になっていることであり、これに対応して $\rho > 0.8$ では GAM 振動はすばやく減衰しており、コアと周辺部では径電場揺動に対するプラズマの振る舞いが大きく異なっていることがわかる。また、図 2.1.5-2 では同じシミュレーションで径電場がほぼ定常に落ち着いた時点での径電場分布が示されている。赤点が我々の δf ハイブリッドシミュレーションの結果、黒点が従来の解析モデルに近いリップル平均ドリフト運動論の解から予想される両極性電場分布である。両者とも全域で負電場となっているが、電場の大きさは δf シミュレーションの方が大きい。この差については、リップル平均したドリフト運動と、 δf 法においてダイレクトに追跡している軌道との差や、有限軌道幅効果、 δf 法でのより厳密な衝突項の取り扱いによる影響など、さまざまな原因が考えられ今後も詳しく解析を行ってゆく予定である。また、 $\rho > 0.9$ において特に負電場が成長しているのが見られるが、これは周辺におけるイオンの軌道損失の効果である。現在は最外殻を横切ったイオンを単純に損失したものと扱っているが、周辺での粒子損失、リエンタリングを適切にモデル化するソース、シンク項の導入によって周辺での径電場形成とそれによる輸送レベルの変化をシミュレートできるようなコードの拡張を目指している。

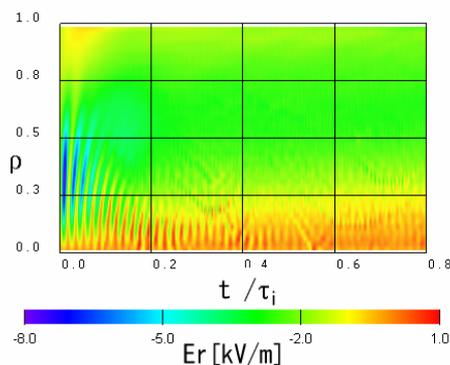


図 2.1.5-1 LHD 磁場配位における径電場の時間発展。

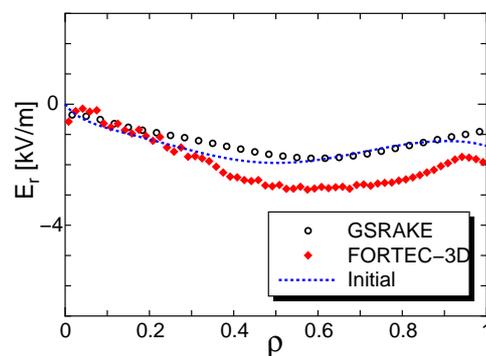


図 2.1.5-2 LHD 磁場配位における径電場分布。

2.2 プラズマ基礎過程 (複雑性の科学)

2.2.1 2次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション

核融合プラズマから天体プラズマまでの広い領域で発生する多くの非線形複雑現象の特徴は、1) エネルギー開放系であること、2) ミクロからマクロまでの様々なスケールの物理が複雑に絡み合っていること、3) その時間挙動としては非定常で、時には間欠的な現象や突発的な現象を伴うことである。本研究の目的は、このような複雑性磁化プラズマで発生する構造形成や自己組織化現象の解明を目指す研究の一環として、これらの現象を支配する重要な基礎過程の1つである磁気リコネクション機構を粒子シミュレーション手法により探求することである。

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。ここでは、まずは、リコネクション面に垂直な面内での2次元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する。

図 2.2.1-1 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、磁気中性面を横切る方向 (y 軸方向) の磁場配位の時間発展を示している。時間経過とともに、プラズマ不安定性 (ドリフトキンク不安定性) が成長し、電流層が大きく変形していく様子がわかる。この不安定性の成長期における平衡電流方向 (x 軸方向) の平均的な力の釣り合いを調べたのが、図 2.2.1-2 である。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 (図 2.2.1-2 の赤線) が生成され、凍結条件が破れていることが分かる。図 2.2.1-2 は、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 (青線) であることを示している。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。外部からのエネルギーの供給がない今の場合、この抵抗により電流が拡散して、平衡配位が崩れていくため、定常的な凍結条件の破れの議論はできない。

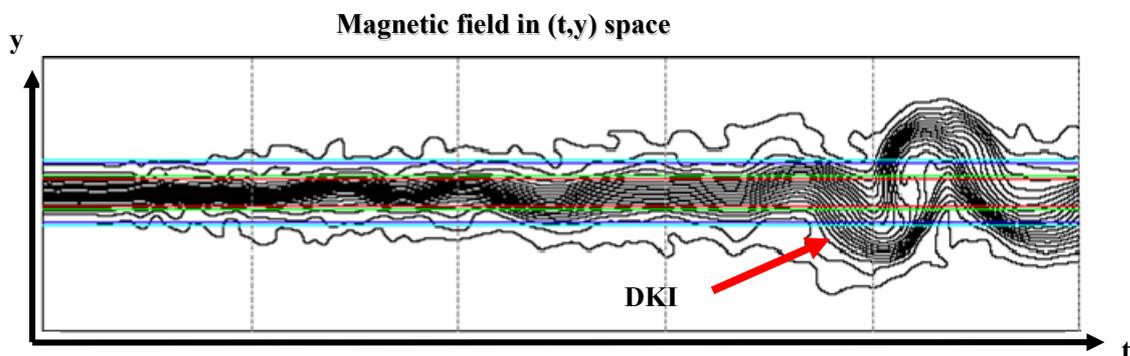


図 2.2.1-1. 磁気中性面を横切る方向 (y 軸方向) の磁場配位の時間発展。

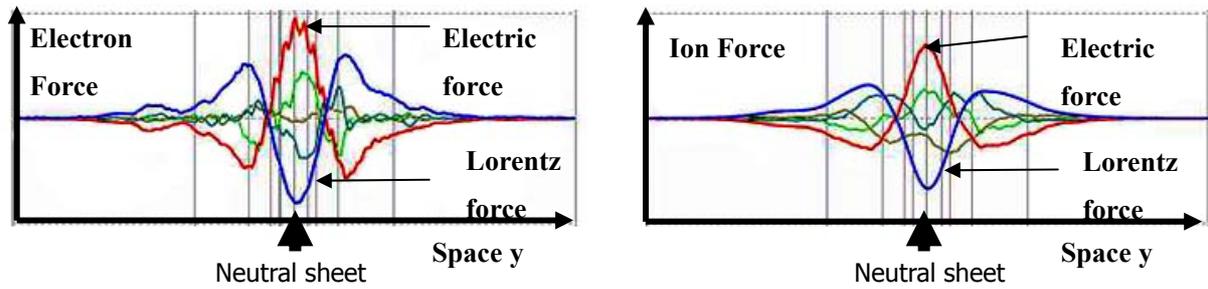


図 2.2.1-2 ドリフトキンク不安定性の成長期におけるイオン（右図）と電子（左図）に働く平均的な力の分布。赤線、青線、および緑線は電場の力、ローレンツ力、圧力テンソル項を示している。

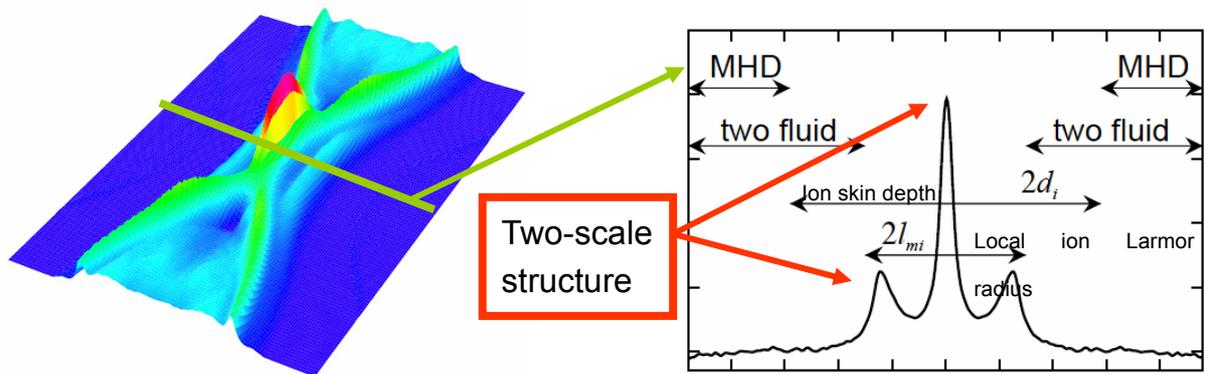


図 2.2.1-3 定常リコネクションにおける電流層の空間構造。左図が鳥瞰図で、右図が電流層中央の断面図である。

次に、外部からエネルギー補給のある開放系での磁気リコネクションの時間発展と粒子運動論効果を調べるために、開放系粒子モデルに基づく粒子シミュレーションコードを開発した。詳細は、別章の「シミュレーション方法論」を参照されたし。このコードを用いて、リコネクション面内に限定された2次元粒子シミュレーションを実行し、1) 外部系と相互作用している系において定常リコネクションが実現するかどうか、2)、定常リコネクションにおいて、磁場凍結を破る粒子運動論効果は何か、3) そのときの電流層の構造はどのような物理に支配されているのか、を詳細に調べた。

外部からのプラズマ流入のある系において、プラズマ流入パターン空間スケールがある閾値より小さな値で与えられる場合、定常リコネクションが実現することが明らかとなった。図 2.2.1-3 は、定常リコネクションが実現したときの電流分布の鳥瞰図(左図)と電流層中央の断面図である。プラズマ流入の結果、シミュレーション領域の中央付近にイオンラーモア半径程度のスケールを持った非常に発達した電流層が形成される。この図で非常に興味深いのは、電流層に2重構造が現れている点である。即ち、中央の鋭く切立った頂構造と中央から少し離れた周辺部の肩状構造である。それぞれの物理的意味を探るために特徴的な粒子運動論的な物理スケールとこの電流層スケールの時間発展を調べる (図 2.2.1-4)。電流層内に存在する荷電粒子は、磁気中性

線を横切る複雑な非磁化熱運動（蛇行運動）をする。図 2.2.1-4 より、頂構造の空間スケールは電子の蛇行運動の振幅で、肩状構造の空間スケールは、イオンの蛇行運動の振幅で与えられていることが分かる。これは、イオン蛇行運動の転回点に密度分布のピークが形成される事実と対応している。

この発達した電流層の内部には、凍結条件を破る優位な運動論効果が存在し、リコネクション電場の発生を促している。以下では、粒子シミュレーションのデータを基に、2流体方程式で表現される凍結条件を破る非理想項を評価する。図 2.2.1-5 は、イオン流体と電子流体に対する非理想項と電場のリコネクション点を通る断面上の空間分布を示している。定常状態では、空間・時間ともに一定の電場（赤線）が実現される。即ち、リコネクション点での磁束の変化率（リ

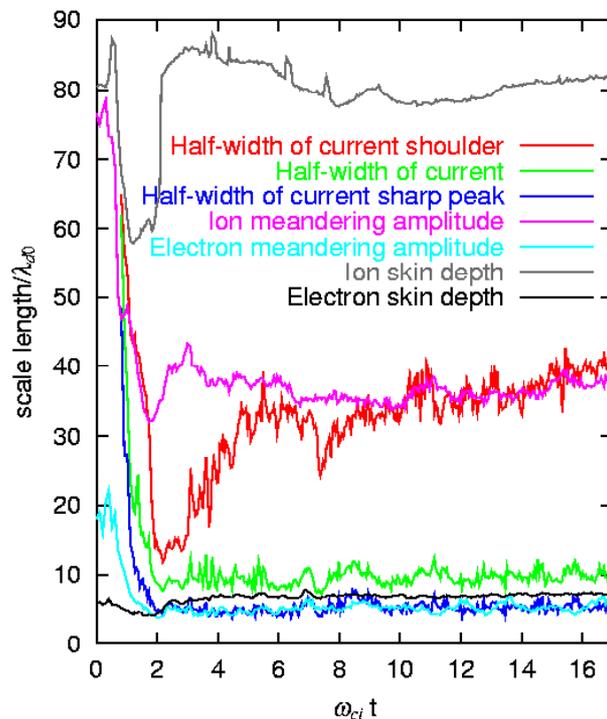


図 2.2.1-4 電流層における空間スケールの時間発展。

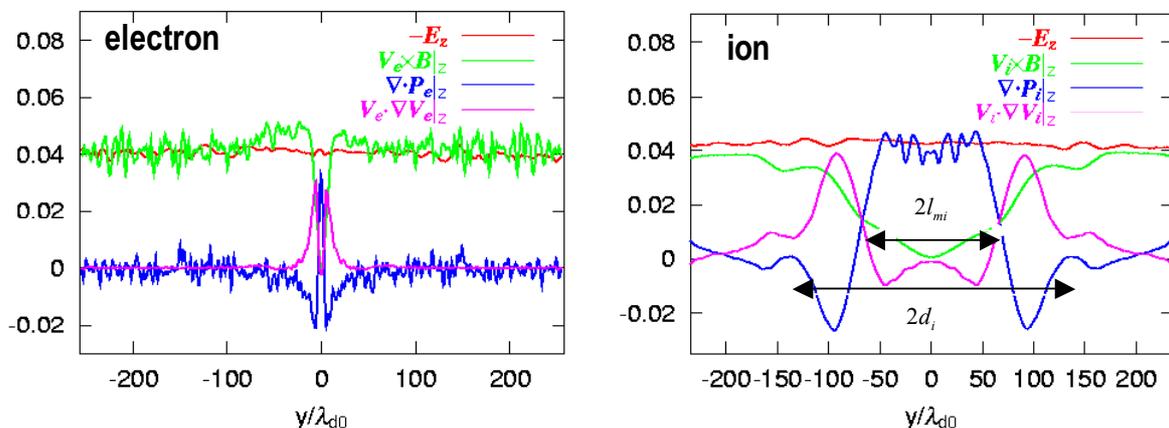


図 2.2.1-5 定常位相におけるイオン流体と電子流体に対する非理想項と電場の空間分布。

コネクション電場)が境界からの磁束流入率(駆動電場)によってコントロールされていることがわかる。さらに、電流層の中心付近でのこの大きなリコネクション電場が、イオン電子ともに圧力テンソル項(青線)によって維持されていることもわかる。この圧力テンソル項は、磁気中性面近傍での蛇行運動に代表される非磁化熱運動の効果を示すもので、磁場凍結を破る主な原因となっている。

2.2.2 3次元開放系における無衝突駆動磁気リコネクション

前章では異なる2種類の2次元粒子シミュレーションにより、磁場凍結を破るマイクロな運動論過程として、プラズマ不安定に起因した異常抵抗と粒子運動論効果を別々に調べ、その役割を明らかにした。現実の系では、両者は同時に存在し、お互いに影響を及ぼしながら複雑なリコネクション現象を創出している。ここでは、より現実に近い系のモデルとして開放系の3次元粒子シミュレーションモデルを開発し、その実行により、外部駆動源が存在する系における2種類のマイクロな運動論過程の関係を明かにした。

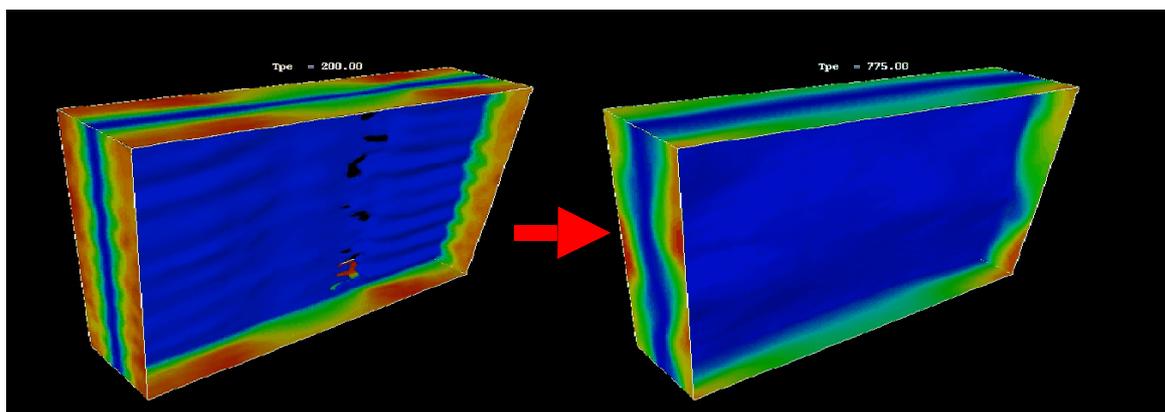


図 2.2.2-1 シミュレーションの初期位相(左)と後期位相(右)における磁場強度の鳥瞰図。ここで、青色領域が磁場の弱い電流層の中央を示している。

シミュレーションでは、上流境界に駆動電場をかけ一定の割合でプラズマを流入させる。一方、下流境界では、系の力学発展に従い、自由にプラズマが出入りできる自由境界条件を課している。2次元シミュレーションと同様に、2つのプラズマ不安定性、即ち、低域混成ドリフト不安定性(LHDI)とドリフトキンク不安定性(DKI)が発達するのを観測した。図 2.2.2-1 は、シミュレーションの比較的早い時期に電流層周辺部に波長の小さな静電不安定性である LHDI(左図)が励起される。この不安定性は、電流層中央では成長しないため、リコネクションの直接的な要因となるリコネクション電場の発生に関与しない。LHDI が非線形飽和した後、電流層中央部に長波長・低周波数の電磁不安定である DKI(右図)が励起される。この DKI の成長期における磁場の凍結条件を破る機構を解明するために、次の2流体方程式で記述される非理想項を粒子シミュレーションのデータを基に調べる。

$$n_j(\mathbf{E} + \mathbf{v}_j \times \mathbf{B}) = \frac{m_j}{q_j} \cdot n_j \left(\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_j + (\mathbf{v}_j \cdot \nabla) \mathbf{v}_j \right) + \frac{1}{q_j} \nabla \cdot \mathbf{P} + \frac{1}{q_j} \nabla p$$

特に、各項において、波による寄与とそれ以外の項に分けて考えることにする。図 2.2.2-2 は、電子流体(左図)とイオン流体(右図)における非理想項と電場の磁気中性面を横切る方向の空間分布を示している。ここで、波の寄与は赤実線で、電場は黒実線、圧力テンソル項は青実線で示している。ほぼ一様な電場分布が実現されていることから、リコネクション率は境界での駆動電場によってコントロールされていることがわかる。興味深いのは、2次元シミュレーションの場合とは異なり、このリコネクション電場を支える非理想項がイオン流体と電子流体では異なることである。イオン流体の場合、圧力テンソル項(青線)が主な磁場凍結の破れの原因となっている。一方、電子流体の場合、波による寄与(赤線)が主な原因となって磁場凍結が破れていることがわかる。これは、電流層の3次元構造のためにDKIの成長が小さく、電子電流層でのみ発達し、その周辺に存在するイオン電流層までその影響が及んでいないことを意味する。

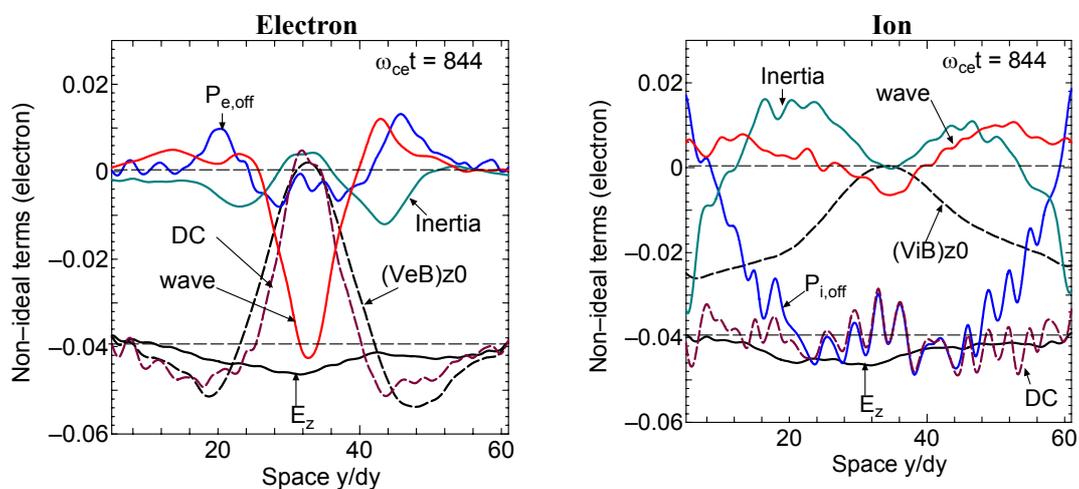


図 2.2.2-2 ドリフトキンク不安定性の成長期におけるイオン流体と電子流体に対する非理想項と電場の空間分布。空間座標の中央に磁気中性面が存在する。

2.2.3 プラズマと超高強度電磁波との相互作用

相対論的電磁粒子計算機シミュレーションにより、慣性核融合研究、天体プラズマ研究、X線源、粒子加速などで重要な役割を果たす高強度電磁波とプラズマの相互作用における非線形過程の研究を行った。

一つめの重要な成果は、レーザーとプラズマ相互作用により形成されるソリトンが一様プラズマ中においてもレーザー強度等のパラメータに依存して加速されうることを見いだしたことである。低密度で非常に長い一様プラズマに超高強度電磁波を入射するとラマン散乱過程、ラマンカスケード過程、光子凝縮などの物理過程を経た後に、電磁エネルギーが狭い領域に局在する電磁ソリトンが生成されることを観測した。以前の研究では、密度勾配のないプラズマ中ではこのような電磁ソリトンは定在するとされてきたのに対し、入射レーザー強度を大きくするに従って、定在する場合、入射レーザー進行方向と逆の方向に加速され強い散乱波を発生する場合、レーザー進行方向に加速され強い透過波として現れる場合があることを見いだした(図 2.2.3-1)。さらに、この加速の原因を電子の分布関数及び電磁力のバランスから説明した。このような電磁ソリ

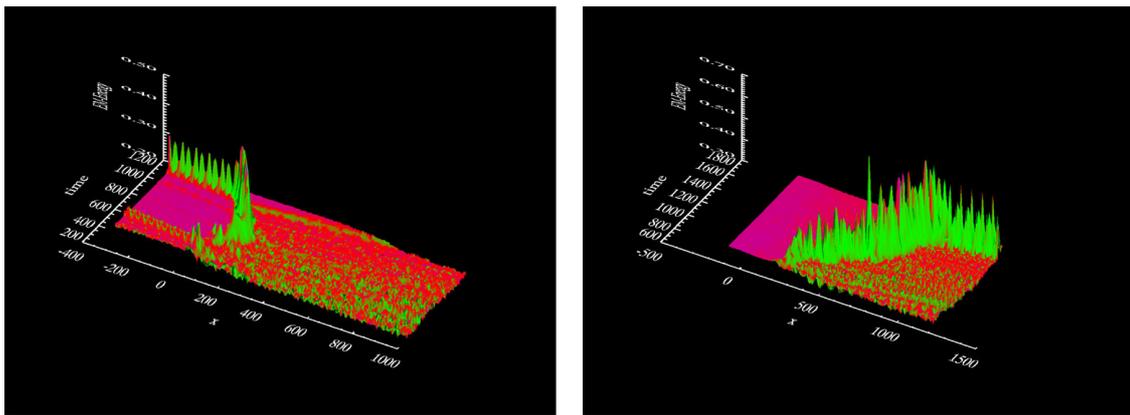


図 2.2.3-1 レーザーとプラズマの相互作用によって生成されたソリトンの運動。
レーザー進行方向と逆方向への加速（左）、進行方向への加速(右)。

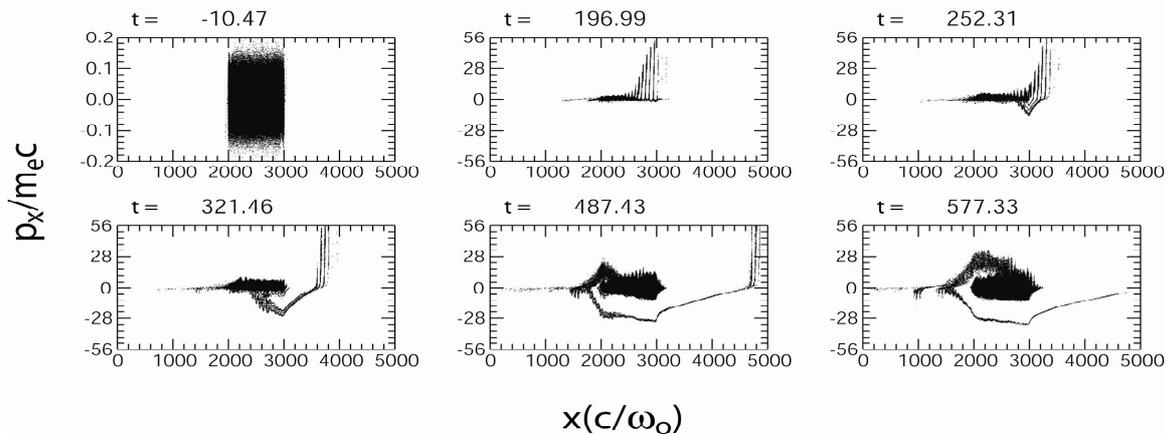


図 2.2.3-2 高強度レーザーとプラズマの相互作用による、エネルギーが狭い領域に集中した電子ビーム形成過程。

ソリトンの生成および運動は、外部とエネルギー入出力のある系での自己組織化過程と考えられ、秩序パラメータの探索など複雑性研究の一環として重要な意味を持つと考えられる。

二つめの重要な成果は、低密度プラズマと高強度レーザーの相互作用によりエネルギーが狭い領域に集中した高エネルギー電子ビームが生成するという新しい知見を得たことである。低密度プラズマへの超高強度レーザーの入射によって引き起こされるラマン散乱過程に伴う電子加速を詳細に調べた結果、適切なレーザー強度及びプラズマ密度に対して、レーザーの入射方向と

逆方向に進行するエネルギーが狭い領域に集中した電子ビームが形成されることを見いだした。この電子ビームは、ラマン散乱過程によって励起された静電電子波により電子波伝播方向に加速された電子が、プラズマ境界での時間的に変動するシース電場による反射過程を経ることによって形成される(図 2.2.3-2)。その加速及びビーム形成過程、性質、座標と運動量の位相空間上での典型的粒子の振る舞い等を詳細に解析し、明らかにした。これまでの研究で、ラマン散乱などのレーザープラズマ相互作用による電子加速、それに続くプラズマ真空境界の電子シースによるイオンビーム生成などは知られているが、このように分離した分布関数が自発的に生成される例は報告されていない。これはエネルギー開放形における、自発的な秩序の発生(自己組織化)とみることができる。

2.3 シミュレーション技法

プラズマシミュレータ(大型シミュレーション研究用解析装置)の主システムで全 160 ベクトルプロセッサエレメント(PE)を 5 つのノードに持つスーパーコンピュータ SX-7/160M5 の性能を十分に生かしたシミュレーションを行うための並列処理プログラム技法の開発を行った。このスーパーコンピュータは 1 ノードあたり 32 個の PE、256 ギガバイトの主記憶領域(メモリ)を持ち、1 ノード内は共有メモリとなっておりノード内のどの PE からでも同等に参照できる。この共有メモリ内の PE での並列処理を共有並列と呼ぶ。一方、ノードを超えた領域のメモリを参照するためには Message Passing Interface (MPI)などを用いたノード間通信をする必要がある。この複数ノードにわたる並列処理を分散並列と呼ぶ。全 160PE、1280 ギガバイトのメモリを使ったシミュレーションを行うシミュレーションを行うためにはこの分散並列が不可欠になる。なお、ノード内については共有並列手法を用いる方法と、ノード内のメモリも分割して取り扱う分散並列手法を使う方法の 2 つがある。前者は手続きが複雑となるが、シミュレーションコー

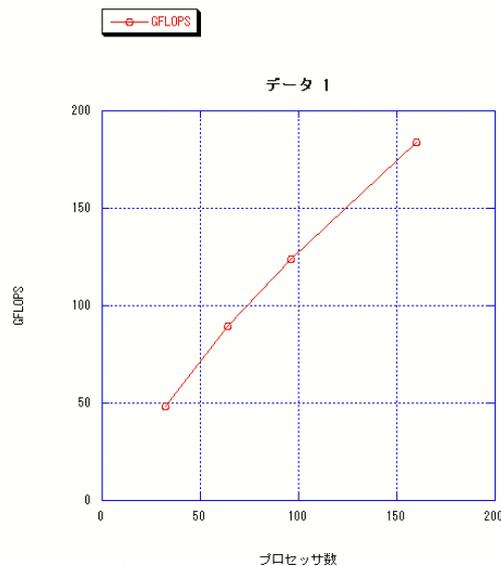


図 2.3-1 粒子シミュレーションコードのプロセッサ数に対する演算性能。

ドの構造によっては効率的となる。一方、後者は並列化の方法が単純となるという利点があり、各要素の相互作用を解く必要がないモンテカルロ法などに向いている。MPIによる分散並列はデータの転送などをプログラマーが細かく指定しなければならず、複雑なシミュレーションコードを開発する上では大きな負担となる。そのため、より負担の少ない方法として、High Performance Fortran (HPF)の導入が図られた。HPFを利用した場合、プログラマーはデータをどのように分散メモリー内に配置するかを指示すれば通信はコンパイラーが自動的に指定してくれる。実際、差分解法を用いた流体コードではわずかな指示行を挿入するだけで効率的な分散並列実行が可能となっている。一方、粒子コードの分散並列化においては、HPFを用いても、多くの変更が必要であった。

周期境界条件の粒子シミュレーションコードの並列化においては、ベクトル演算、自動並列によるノード内の共有並列、ノードを超えるHPFによる分散並列をどのように行うかを意識してプログラムする必要があった。スカラー並列機などでの並列化に際してはシミュレーション領域を分割する方法が一般的であるが、ここではSX-7/160M5が大きな共有メモリーを持つという利点を生かして、領域分割は行わないで、粒子情報のみ分散させるという手法をとった。当初のコンパイラーの特性(欠点)を考慮して、ベクトル化、共有並列化、分散並列化が機能するようデータ配置、データ分散などを指定した。その結果、図2.3-1に示すようなプロセッサ数の増加に対して効率的な演算性能の向上を達成することができた。約80億個の粒子を用いた5ノードのシミュレーションではピーク値の約16%の演算性能を達成している。このコードにより、沿磁力線シアフロー不安定性の3次元シミュレーションを行った。

上記で用いた手法を拡張して開放系電磁粒子シミュレーションコードの並列化を行った。シミュレーション領域の取り扱いが周期境界静電シミュレーションコードの場合と同様である。境界での粒子の入出力に伴う手続きに際して、ノード間の通信をできる限り少なくするようにアルゴリズムの改良を行うことによって高速化を図ると共に、粒子量から場の量を求める際の手続きを改良することにより使用メモリーの大幅な削減を行った。このコードにより無衝突磁気リコネクションの三次元開放系粒子シミュレーションを効率的に行うことに成功している。

トロイダルイオン温度勾配駆動(ITG)乱流を研究するための高精度5次元位相空間ジャイロキネティックヴラソフシミュレーションコードの高効率並列化を行った。ここでは極限までコンピュータの性能を引き出すため、自動並列とMPIを使った並列化を併用した。さらにベクトル化、自動並列のためのプログラムの最適化、MPIによる通信の最適化、MPIコミュニケーションバッファのグローバルメモリー領域への配置などを行った結果、ピーク性能の約35%である500ギガフロップスの性能を達成した。この高効率化により、異常輸送の大規模長時間高精度シミュレーションが可能となり、ゾナルフローに関する新しい知見を得た。

新古典輸送を解析するための δf モンテカルロシミュレーションコードの並列化をHPFにより行った。モンテカルロシミュレーションコードでは乱数を多用するため、効率的な乱数生成が重要な課題となる。そのため、並列乱数プログラムを作成し効率的な並列化に成功した。ベクトル化などの最適化も行った結果、ピーク性能の約30%である、400ギガフロップスの性能を達成し、有限軌道幅効果による非局所輸送現象の解明に成功した。

2.4 共同研究

理論・シミュレーション研究センターではシンポジウム、講習会などを開催し、共同研究の推進、シミュレーションの普及などに努めている。

平成16年8月2日から6日まで、全国の大学から学部学生及び修士課程の学生17名の参加者を得て、核融合科学研究所で開催された「総合研究大学院大学 物理科学研究科夏の体験入学」に協力し、2つのシミュレーション課題を担当した。

8月23日には自然科学研究機構の国立天文台、岡崎の施設のメンバーを招いて「第8回シミュレーションサイエンスシンポジウム」を開催し、自然科学研究機構各機関の計算機環境、シミュレーション研究の現状の紹介及び研究協力に関する意見交換を行った。

12月6日から7日には「第5回微粒子プラズマ研究会—プラズマ中微粒子の発生・成長と挙動、およびその制御」を全国から46名の参加者を得て開催し、微粒子の構造形成やナノチューブ形成時の理論、実験結果が多数報告され、プラズマ研究者との連携の必要性が強調された。また、核融合プラズマでの微粒子生成、成長、挙動の研究の重要性が再確認され、今後本研究会で重点的に共同研究を続けていくことが決められた。さらに「シミュレーション科学教育講座」-「総合研究大学院大学アジア冬の学校」が中国、韓国からの参加者を含めて21名の参加者を集めて行われた。前半の分子科学研究所での講義に引き続いて、12月9日から11日には核融合科学研究所において主としてプラズマ・核融合シミュレーションに関する講義が行われた。「MHD平衡および安定性」研究会が所内外から36名の参加者を得て12月14日におこなわれ、MHDに関連した様々な課題の発表討論を行った。12月15日には「シミュレーション科学教育講座」の一環として、HPF推進協議会に全面的な支援をうけた「HPF講習会」を所内外から29名の参加者を得て開催し、HPF利用の実際上の問題とその解決法、最近の進展に関する講義及び米国における並列プログラミングモデルの海外動向の現状報告等を行った。また、HPF、並列化に関しては月に1回所内外の共同研究者を対象に相談会を開催してきた。

平成17年1月11日から13日には、第9回「シミュレーション・サイエンス・シンポジウム」と核融合科学研究所共同研究「大型シミュレーション研究」合同研究会が所内外から56名の参加者を得て開催された。「シミュレーション・サイエンス・シンポジウム」は1998年より毎年開催し、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、中性流体、物質科学、生命科学などの各分野の専門家に講演を依頼してきた。今回は中国のレーザープラズマ研究、宇宙天気予報、地球シミュレータの最新の研究及び次世代シミュレータについての招待講演及び核融合プラズマ、天体プラズマ、流体など多岐にわたる講演、議論が行われた。

さらにJIFTの推進し、日米ワークショップとして統合コードワークショップ、ヘリカル系ワークショップ、高エネルギー粒子ワークショップ、レーザープラズマワークショップが開催された。日中協力事業では「複雑性プラズマにおける自己組織化の物理」という課題で共同研究を展開した。さらに、第4回セルビア・モンテネグロ（旧ユーゴ）日本シミュレーションサイエンスシンポジウムがセルビア・モンテネグロで開催された。ポルトガルで開催された、第20回IAEA核融合エネルギー国際会議では、4件の口頭発表を行った。平成17年7月には第19回プラズマシミュレーション国際会議とアジア太平洋プラズマ理論会議の合同会議を奈良で開催する予定で

ある。

3. まとめと展望

平成16年度は計画に沿った成果を上げることができたと思われる。更に当初計画に盛り込まれていない内容においても成果があった。特に以下の点を強調したい。

- 真空磁気軸内寄せ LHD 配位の線形安定性解析により、ベータ値の上昇と共にプラズマ全体のシャフラノフシフトによる自律安定化が生じ、実験結果に対応した高ベータでの安定性が得られることを明らかにした。更に、より不安定な低ベータプラズマに対して3次元非線形 MHD シミュレーションを行い、圧縮性、トロイダル流、磁力線方向の熱伝導が圧力駆動型モードの非線形発展時に不安定性を大きく抑制することを示し、理論・シミュレーションの観点から LHD 実験に大きく貢献できたと考えられる。さらにこの問題は、電流駆動型モードと比較検討することにより、プラズマの MHD 安定性・非線形発展現象の体系化に将来発展させることができよう。
- 高速イオン励起 MHD モードのシミュレーションでは、中性粒子入射、粒子間衝突、粒子損失を考慮した TAE (トロイダル・アルフヴェン・固有モード) バーストの開放系非線形シミュレーションを実行し、実験で観測されているバーストを定量的に再現することに成功するとともに、複数モードの共鳴の重なりと単独モードの非線形共鳴の重なりにより高エネルギー粒子損失が発生することを見いだしている。従来の理論では解析できない、シミュレーションならではの問題に挑戦し成功した好例といえる。さらに、2次元平衡での知見を元に、高エネルギー粒子-MHD シミュレーションコードを3次元平衡に適用しつつあり、今後の発展が期待できる。
- 極めて高精度のオイラー的解法アルゴリズムを開発し、これを用いたジャイロ運動論的ヴラソフコードの大域的シミュレーションを行った。乱流輸送と衝突散逸が釣り合い、統計的に定常なエントロピー揺動をともなう乱流状態が実現されることを実証した。更に、帯状流と測地線音波モード(GAM)の計算を行い、非捕捉粒子の位相混合により分布関数の微細構造が形成され、帯状流と GAM が減衰する機構を解明し、理論予測を裏付ける分布関数構造とその発達を同定した。この方面のシミュレーションにおいては、核融合科学研究所が開発した本高精度スキームが世界的に広まると思われる。3次元平衡への拡張も進んでおり、これらの成果は、今後ますます重要になるジャイロ流体モデルのクロージャー問題に大きく貢献するであろう。
- 有限バナナ幅効果を取り入れたドリフト運動論方程式を解くシミュレーションは、2次元平衡から3次元平衡への拡張がほぼ完了しており、GAM振動の減衰は、回転変換に依存するだけでなく、有限軌道幅効果が減衰に大きく寄与していることを明らかにした。今後は、新古典的電場のGAM振動と、摂動電場(例えばITG乱流における)のGAM振動との関係を明らかにする必要がある。
- 宇宙空間及び実験室プラズマで観測される無衝突プラズマ中での速い磁気再結合の問題は、未だ多くの研究者がMHD流体近似のシミュレーションを基本としているが、核融合科学研

研究所では、流体近時を用いず、電子およびイオンのダイナミクスを含む粒子コードで磁気再結合の物理を探求している。異常抵抗と粒子運動論効果に着目した解析を行い、イオンラーモア半径程度の薄い電流層の内部にイオンと電子両方の運動論効果を反映した散逸領域が現れること、及び、ドリフトキンク不安定性により生成された異常抵抗と粒子運動論効果の相乗作用により、電流層の中心で磁場凍結が破れ、速い磁気リコネクションが発生することを明らかにした。将来、大局的にプラズマ挙動を把握できる流体コードとどのように結合させるかという連結階層モデルの構築とその実践が課題になるであろう。

- テラフロップス、テラバイト級の大型計算機が自由に使える時代となり、本格的シミュレーション時代が到来したといえる。しかしながら、計算機の進歩は著しく、アーキテクチャーも複雑さを増すため、高効率並列化には今後一層の努力が必要となろう。この努力の過程で、極めて効率の良い並列乱数の使用法を取得できたことは特筆すべきことである。

平成16年度の計画及びその実施成果を元に、平成17年度計画を以下のように設定した。
(自然科学研究機構年度計画比較表より)

I 研究機構の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するために措置

1 研究に関する目標を達成するための措置

(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

(核融合科学研究所)

③ 核融合プラズマ閉じこめの物理機構解明とその体系化及び複雑性の科学を探求するために、特に次の研究を推進する。

1. 磁気流体力学における圧力駆動型モードの平衡・安定性・非線形発展の研究を推進する。
2. 高エネルギー粒子の物理及びプラズマ輸送に関する大規模シミュレーション研究の発展を図る。
3. 開放系における無衝突磁気リコネクション粒子シミュレーション研究の発展を図る。

2 共同利用等に関する目標を達成するための措置

(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

(核融合科学研究所)

② 大型シミュレーション研究を推進するため、以下の事項を推進する。

1. 複雑性プラズマ解析用大規模シミュレーションコードの最適化及びそれを用いたシミュレーション研究を行う。
2. シンポジウム・講習会・報告会等の開催による大型シミュレーションの普及および研究交流を進める。

平成17年度はこの計画に沿って研究を進めていくが、核融合科学研究所におけるシミュレーションは、核融合プラズマの研究を通して「シミュレーション科学」の創設を目指している。特に、時間スケールや空間スケールの大きく異なる現象を如何に取り入れるかが今後の鍵になるで

あろう。すなわち、マクロな現象には、ミクロな現象の結果として表れる物理量が含まれている。両者をどのように結びつけるかが大きな問題である。もちろんメゾスケールも含まれるので問題は一層難しくなる。しかし、このために連結階層モデルを構築しシミュレーションを行うことができれば、要素還元的なシミュレーションから、全体的な (Holistic) シミュレーションへの脱皮が可能となろう。核融合プラズマや環境問題などは、全ての要素を取り入れ全体を再現しなければ真の理解は無いと思われる。

核融合科学研究所が目指す「シミュレーション科学」の模式的表現を以下に示す。

Establishment of **Simulation Science**

**To understand the nature holistically
using large-scale computer simulations
based on the fusion plasma physics and related area**

- From individual research to **Holistic Science Research**
- Challenge to overcome the huge differences of time and spatial scales

**Development of new simulation models
(Cross-Hierarchy Model)**

**In strong partnership with
theory and experiment**



炉工学研究センターの研究成果
平成 16 年度

核融合科学研究所

炉工学研究センター報告

1. 炉工学研究センターの経緯と研究課題

炉工学研究センターは、将来の発電実証核融合炉成立に必要な長期的な炉工学研究課題について、大学共同利用機関としてふさわしい研究活動及び全国的な共同研究推進の役割を担う組織とし、平成11年4月に発足した。当初は炉工学研究のなかで最も重要とされている炉材料とブランケットシステムの課題をとりあげ、専任4名、客員2名で発足した。平成15、16年度からは所内措置により専任3名が加わり、先進核融合炉超伝導コイルシステム開発を課題として新たに追加した。

低放射化材料研究の分野では、有望とされているバナジウム合金とフェライト鋼を重点として開発及び評価、分析の系統的な研究を進めている。バナジウムについては高純度合金の工業的規模での製造、圧延、溶接等加工のプロセス開発を実施し、製作された材料の特性評価は全国の大学研究室との共同研究として進めている。フェライト鋼については、標準サイズ試験片を用いて繰り返し応力負荷試験等を実施し、大学における微小試験片実験と対応付けながら体系的理解を進化させる方向で研究を進めている。大規模製造、大型の標準サイズ試験ともに大学研究室規模では困難な部分をセンターが実施し、共同研究成果をより充実させる重要な役割を果たしてきている。材料関係の共同研究のもうひとつの柱として、平成12年以来、材料照射試験装置要素技術開発共同研究を進めている。これは核融合炉に近いエネルギースペクトルを持つ中性子源を国際協力によって建設するための技術開発研究であり、日本原子力研究所を含め、全国の大学の炉工学研究者間の合意に基づいて進められてきた。平成16年度は5年目にあたり、当初の目標をほぼ達成して終結しようとしている。ブランケットシステム開発は、これまではバナジウム合金を主要構造材料とし、液体リチウムを冷却および燃料増殖に用いる液体ブランケットを重点とする研究を進めてきている。とくに、液体リチウムの磁場中流動に伴うMHD圧力損失はこの概念の成否を左右する重要な因子であり、その解決のため、冷却管の絶縁被覆開発の研究に力点を置いている。そのほか、大型ヘリカル装置実験研究の成果に立脚しつつ進められているヘリカル型炉設計の研究活動と連携し、とくにブランケット成立の鍵となる燃料増殖、中性子強度分布の評価を中心に活動を進めつつある。超伝導コイルシステム技術開発は、平成15年度から始まった研究活動である。将来の核融合炉に必要な高磁界・低放射化の要求を満たす線材の開発、中性子照射が超伝導コイル要素材料に与える影響の評価を当面の課題とし、大学、原子力研究所、物質材料研究機構を含めた共同研究を推進しつつある。以上、述べてきたことから明らかであるが、炉工学研究センターの研究活動の標的は発電と燃料増殖を実際に行う将来の核融合炉に置かれており、そのために必要な研究を系統的、体系的に進めることである。そのための長期にわたる研究は全国の諸機関で進められているが、センターはその中核となり、個々の研究および共同研究を充実したものとしていくために積極的な役割を果たすべき位置にある。

2. 平成16年度研究活動と主な成果

センターは前節で述べた方針に沿って研究活動を進めており、平成16年度の主要な活動は(1)材料・ブランケットに関わる研究、(2)先進超伝導コイルシステム開発に関わる研究、(3)材料照射試験装置要素技術開発共同研究の3項目に整理される。今年度に顕著な進展をみせたいくつかの研究活動と成果について以下に要点を述べる。

2. 1. 材料・ブランケットに関わる研究

平成13年度までに高純度バナジウム合金工業規模製造（大型溶解）により、不純物の少ない 30 kg (NIFS-HEAT-1), 166 kg (NIFS-HEAT2)インゴットが製作された。圧延，成形，加工，溶接，熱処理等プロセスの最適化，それぞれのプロセスにおける不純物とその析出の効果については，平成15年度までに多くの成果の蓄積がある。特に重要なのは，大型溶解においてこれまでに例のない高純度化（酸素濃度 200 wppm 以下）を実現し，そのことが溶接を含めた加工性を著しく増進させたことである。平成16年度はその成果の上に立って，合金の使用上限温度の決定因子のひとつである高温クリープ試験，及びプラズマ対向面保護材として有望とされているタングステン被覆の開発，試験を実施した。Fig.1 は開発されたバナジウム合金板材，管材，クリープ試験用チューブ，タングステンコーティング材，レーザー溶接材であ

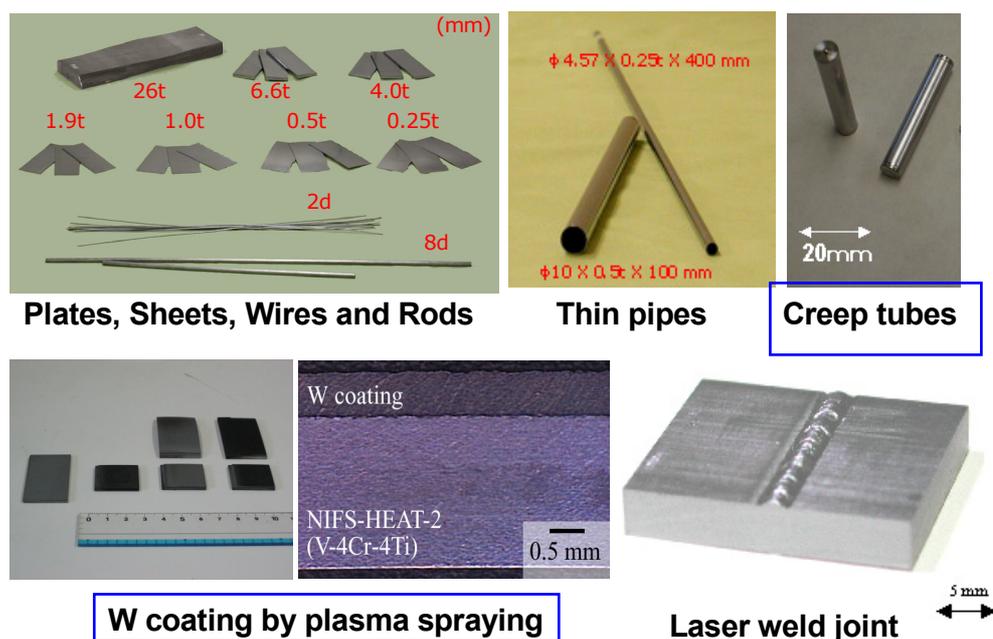


Fig. 1 Products of vanadium alloy manufactured with high purity ingots

る。クリープ試験は，溶接により数 10 気圧の高圧ヘリウムを充填した密閉管を製作し，液体リチウム中に浸漬して長時間の変形を見る試験である。Fig. 2 に得られた試験結果を示す。

Creep rate は円筒管中央部の径増加を精度よく測定し求めている。この結果により，想定される目標設計応力 100 MPa，Creep rate $\sim 10^{-6}/\text{h}$ 以下が 700 °C で達成される見通しが得られた。タングステン被覆試験では，0.5mm 厚までのプラズマスプレイコーティング接合部基板バナジウムの硬化が十分小さいことが確認され，さらに厚いコーティング膜作成の可能性が確認された。

フェライト鋼の繰り返し応力試験は，室温および 873 K までの高温条件で実施され，標準サイズ試験片については初めてのデータが得られた。この試験の過程で，これまで大学で行われてきた微小試験片を用いる試験片ではわからなかった，転位と不純物の相互作用に起因すると見られるセレーションが認められ，この現象が機械特性に与える影響の評価の重要性を認識する結果となった。

バナジウム合金を構造材料とするブランケットシステムでは，液体リチウムを冷却・燃料増殖材として用いることが最適とされている。最大の問題は液体金属が磁場中を流れることになるため，流体と壁との間に誘導電流が流れ，電磁力による圧力損失を生じることである。それを防ぐため，絶縁コーティング膜

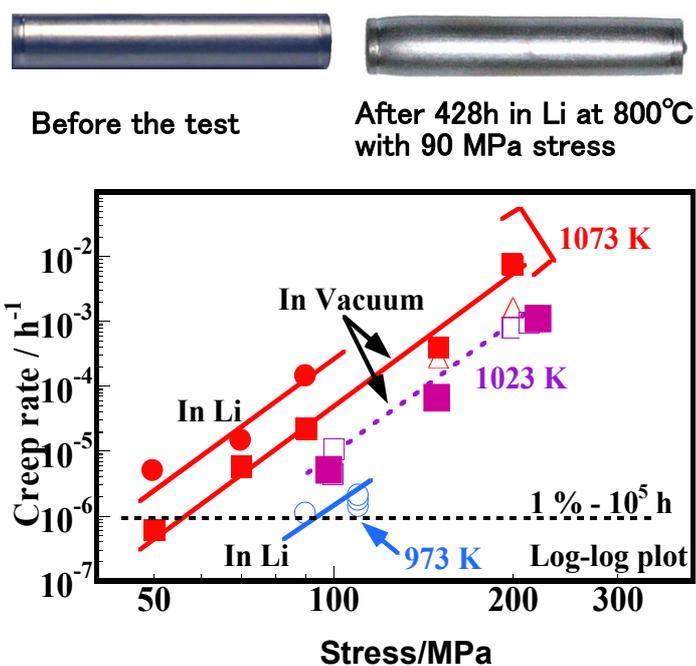


Fig.2 Results of creep tests

の開発を進めてきており、エルビウム酸化物が耐リチウム腐食特性に優れることが平成15年度までの研究でわかってきた。今年度は基盤となるバナジウム合金に酸素を予注入し、リチウム中にエルビウムを流すことで自ら膜をその場で形成できることを実験で示した。この結果により、絶縁膜のその場被覆、補修の展望が開かれた。エルビウム酸化物をはじめ、いくつかの絶縁材料について、FNS(Fusion Neutron Source; 原研東海研)における中性子照射を試み、以前に実施した原子炉照射の結果とあわせ、中性子照射中の絶縁特性劣化は十分に小さいという見通しも今年度の実験で得られた。

ヘリカル炉設計 FFHR (Force Free Helical Reactor) のブランケットは、FLiBe を冷却材に、フェライト鋼 JLF-1 を構造材に使用することを主案として進められている。その成立性、Li または FLiBe にバナ

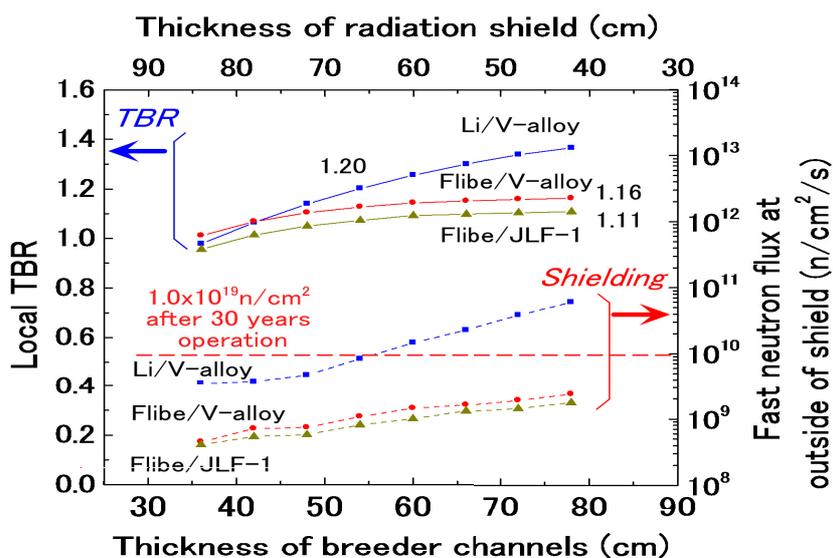


Fig. 3 Results of calculation for TBR (tritium breeding ratio) and neutron flux in FFHR blanket

ジウム合金を組み合わせる可能性、それらの成立を確実にしていくための課題を明らかにする目的で、今年度ブランケット体系の中性子核計算を行った。FFHR で許容される 1200 mm というブランケット厚みを拘束条件として計算し、得られた結果を Fig. 3 に示す。トリチウム増殖、中性子遮蔽それぞれについて有利、不利はあるが、Li, FLiBe 双方について成立の可能性が認められた。

2. 2. 先進超伝導コイルシステム開発に関わる研究

ヘリカル炉設計で提示されている 13.3 T の高磁界で必要な臨界電流密度を達成し、しかも低放射化コイルを実現することを目標に、バナジウム系の超伝導コイル材料を開発している。V 金属を母材とした Hf, Zr 混合粉末/V 複合体を出発構成形態とし、Ta シースを用いて 5 本の(Hf,Zr)/V フィラメントを有する多芯線材の加工に今年度は成功した。この線材に、急熱急冷法を適用し、さらに熱処理条件を最適化することによって 15 – 16 T の高磁界で用いられる超伝導コイル材料の見通しを開くことができた。4.2 K における臨界電流値の磁場強度依存性を、熱処理温度をパラメータとし、Fig. 4 に示す。

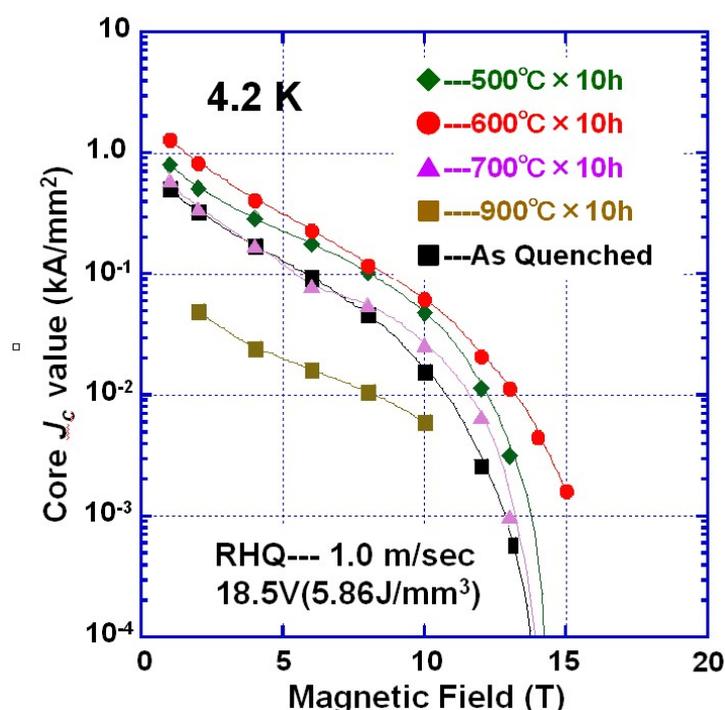


Fig. 4 Critical current density

将来の核融合炉において、ブランケットあるいは一次遮蔽壁の外部に漏洩する中性子照射のコイルシステムに与える影響評価と対策は必須の課題である。そのため、FNSを用いた中性子照射試験を、コイル線材、絶縁物等について実施することを計画し、平成15、16年度にかけて実験装置を製作してきた。Fig. 5 にセットアップされた照射試験部の写真を示す。16年度にはNb₃Sn, Nb₃Al, MgB₂ などの線材、GFRP, ポリスチレン等の絶縁材の第1回目の照射試験を行った。その結果、10¹⁶n/cm²という比較的少ない照射線量でT_cが変化しているように見えるデータが得られ、超伝導研究者の間で強い関心を集めている。この変化が真の結果であるかどうか、さらに追試を行って確認をしていくこととなっている。

2. 3. 材料照射試験装置要素技術開発共同研究

本共同研究は、IEA 協定下における強力中性子源 IFMIF の要素技術開発試験(KEP)開始を契機とし、平

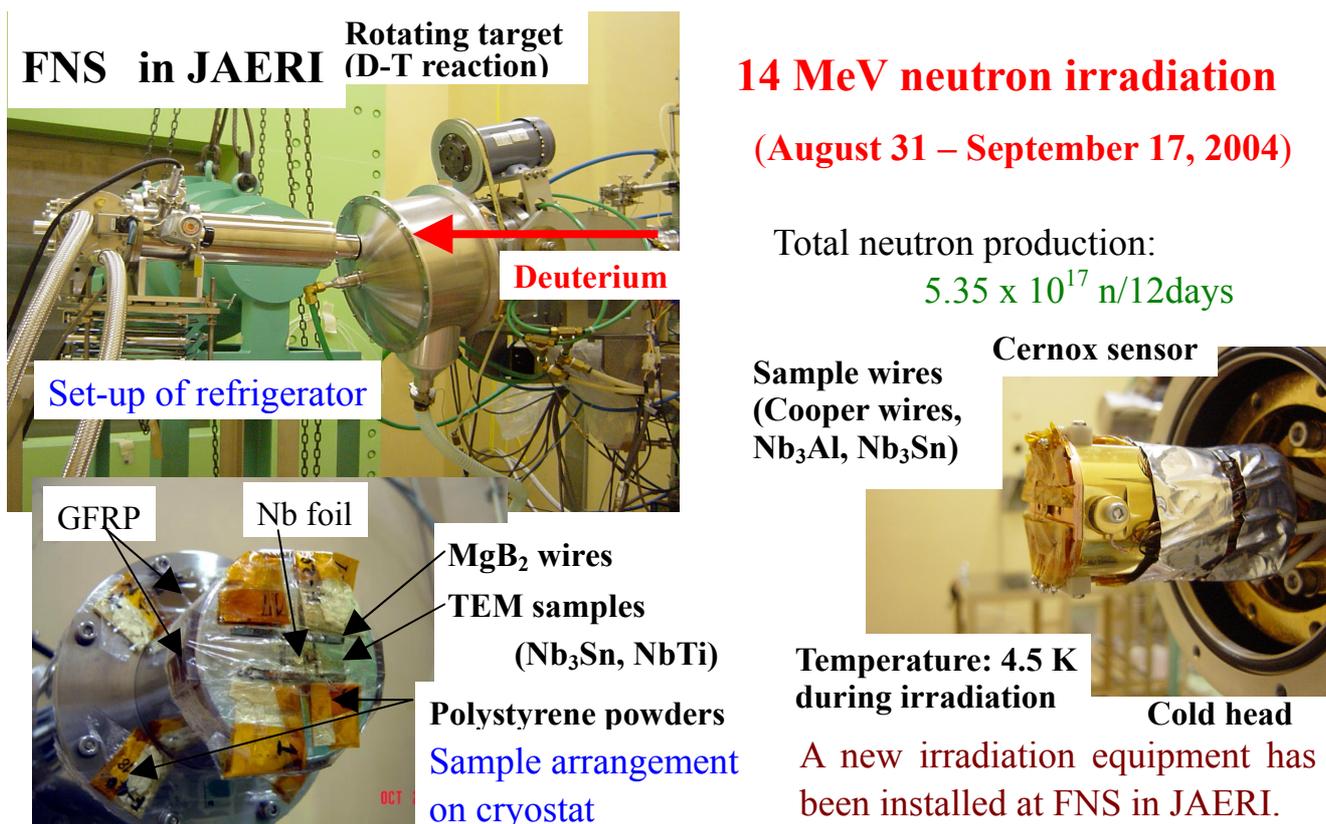


Fig. 5 Setup of fast neutron irradiation tests for superconducting materials

成12年度から炉工学研究センターの共同研究として実施されてきた。課題として(1)液体金属リチウムターゲット自由表面の実験研究(阪大),(2)熔融リチウム中非金属不純物の制御(東大,九大),(3)IFMIFテストセルのガス冷却温度制御に関する研究(九大),(4)微小試験片による低放射化材料の破壊靱性試験,評価法の確立(東北大,京大),(5) ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応中性子のエネルギー・空間分布に関する実験研究(東北大)が取り上げられ,主要な成果として以下を得た。

- ① リチウム自由表面流について実機定格の15m/sの安定な高速流を達成し,ノズル設計の妥当性を確認した。また自由表面波形状の観察結果を理論と比較し,IFMIF条件での予測を可能とした。
- ② イットリウムによるリチウム中の水素回収実験を300~500℃で行い,400℃以上での回収を実証した。得られた実験結果を1次元拡散方程式による計算結果と比較し,従来からの研究の外挿線上で定量的理解が可能であるとの見通しを得た。また,イットリウム表面の窒化物抑制にV-Tiゲッター材が有効であることが確認された。
- ③ テストセルについて中性子束に対して直行する横長の試験片ブロックを置く独自の案を提案するとともに,伝熱流動数値シミュレーション,構造解析などの数値解析だけでなく,伝熱性能実験との比較による問題点抽出,解決を図り,実機設計にとって必須かつ有用なデータが得られた。
- ④ フェライト鋼について,Compact Tension試験法によって得られる破壊靱性値のサイズ効果,微小3点曲げ試験片による破壊靱性値評価の妥当性について系統的な研究を行い,それぞれ重要なデータベースと評価基準を得ることができた。
- ⑤ サイクロトロン加速器を用いてIFMIF設計と運転に必要な中性子収率,中性子生成微分断面積,放

射線核種生成断面積について詳細かつ信頼性の高いデータを得た。

5年間の共同研究の終結にあたり、12月には成果報告会が開催され、報告書が出版されている。5年間にわたる共同研究の経緯と成果の全容についてはこの報告書に詳細に述べられている。

3. まとめと今後の展望

低放射化材料については、センター設立依頼の高純度バナジウム合金製造、加工技術と各プロセスにおける不純物挙動と機械特性との関係の理解など、開発と系統的な理解の両面で16年度も研究が進展している。ブランケットシステムについては、バナジウム・リチウム系の重要課題である絶縁コーティングの研究が進み、その場コーティングの可能性も切り拓かれている。なお、この研究では博士課程の学生が研究推進の一翼を担っており、本研究を通じて成長していること、平成17年度に学位論文をまとめられる見通しになっていることを付記しておく。FFHR 炉設計に関する核計算による寄与など、ブランケットシステムとその要素技術の研究は拡充されつつある。炉における高効率エネルギー変換システムの成立が核融合炉成立上の重要な課題として認識されつつある現在、これまで以上にブランケット開発を前面に据えた研究の展開を今後図っていくことが重要と考えている。超伝導コイルシステム開発は、低放射化と高磁界を意識し、線材開発、中性子照射実験が緒に就いたところであり、17年度以降具体的な成果を得ていく計画である。材料照射試験装置要素技術開発共同研究は多くの成果を産み出して5年間の活動を完了しつつある。その中でさらに展開すべきいくつかの研究については、LHD 計画共同研究に引き継がれ、継承発展させられていくことが期待される。