

自然科学研究機構 核融合科学研究所
平成 23 年度外部評価報告書
NIFS Peer Review Report in FY2011

2012 年 3 月

March, 2012



核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

External Review Committee, NIFS Administrative Council

目 次

第1章	これまでの経緯	1
第2章	項目別の評価	5
	[1] 研究成果	5
	[2] 研究体制・環境の整備	15
	[3] 共同利用・共同研究の推進	24
	[4] 国際連携・共同研究の推進	31
	[5] 人材育成	35
	[6] 将来計画	38
第3章	評価のまとめと提言	42
	(1) 評価のまとめ	42
	(2) 提言	48
第4章	おわりに	49
参考資料 評価結果一覧		
添付資料1	平成23年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿	
添付資料2	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3	平成23年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程	
添付資料4	外国人委員評価書	
資料編		

第1章 これまでの経緯

大型ヘリカル装置（LHD）は、大学における核融合研究を推進する主装置として、大学共同利用機関である核融合科学研究所の設立と併せて建設され、平成10年より実験研究を開始した。核融合コミュニティの総意と期待を背負って計画されたLHDは、我が国独自のアイデアであるヘリオトロン型磁場を超伝導コイルで発生することを特長とし、高出力の加熱によりヘリカル方式による高性能プラズマを生成させると共に、環状型磁場閉じ込め核融合炉の実現を見据えた物理的・工学的課題を解明することを目的としている。LHDは今日まで14年間にわたり順調にプラズマ性能を向上させると同時に、トカマクプラズマには見られない独自の性能を発揮させるなど、核融合研究の最先端装置として国内外の共同研究に供されている。

この間において、国内学術研究体制の変化があり、核融合科学研究所は平成16年度より大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一機関として全国共同利用・共同研究をより一層推進することになった。法人化に当たっては、6年間の中期目標・中期計画を掲げ、その進捗状況について毎年評価を受けるという制度が導入された。この年度評価は主として管理運営面のものであるが、核融合科学研究所においては研究成果についても外部の有識者による評価を受けることが重要と判断し、運営会議の下に外部評価委員会を組織して研究面の評価を毎年実施している。評価項目は運営会議で決定し、運営会議所外委員に加えて評価項目に対応した専門家を委員として構成した外部評価委員会で評価を行うものである。評価委員会は評価結果を運営会議に諮問し、核融合科学研究所はその結果を尊重して次年度以降の研究活動の改善に役立てている。核融合科学研究所の第1期中期目標期間の評価結果を鑑みても、この制度は有効に機能しているといえる。

核融合科学研究所では平成22年からの第2期中期目標期間の開始に当たり、プラズマ・核融合研究分野でのCOEとしての求心力を一層強化するため、LHD、シミュレーション、核融合工学の3分野で研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向けこれらの成果を統合していく研究計画をスタートさせた。このために平成22年度には所内研究組織の改編も行った。特に、中心として位置づけられるLHDについては核融合科学研究所発足当初よりプロジェクト研究として大型ヘリカル研究部と技術部を中心に運営を進めてきたが、今回全研究職員を一つの研究部にまとめた上で、プロジェクトへの参画を自由とする体制を取ったことで、シミュレーションや核融合工学との連携がこれまで以上に容易となり、新しい課題に対して臨機応変に対応出来ることが期待される。

核融合科学研究所運営会議では第1期中期目標期間の中間にあたる平成19年度にLHDの外部評価を実施した。そこでは、LHDは重点的な研究投資と研究職員の高いモチベーションの下、全国共同利用研究により飛躍的な成果を上げているという評価と共に、幾つかの提言をした。それらは、①第2期中期計画においては加熱装置を増強し、閉ダイバータ

を実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現して欲しい。また、より高密度・高温条件下での定常実験を期待する、②人材養成を含めた今後の共同研究活動の一層の発展に向けて、更なる取組を期待する、③世界の COE に相応しい役割を自覚し、新しい研究に果敢に挑戦する勇気と意欲を持って、今後の LHD 研究を推進して欲しい、というものであった。その後4年が経過し、新たな中期目標と体制の下で、LHD が世界の COE としてまた全国共同利用装置としてどのような研究成果を挙げてきているのか、平成 19 年度の提言も踏まえながら改めて評価を行うことは研究所の将来を見据える上でも重要である。加えて、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災での福島第一原発事故の影響で、安全な「究極のグリーンイノベーション」を目指した核融合を取り巻く環境も変化してきている。このため、核融合の実現に向けた学理の体系化の加速を図ることが益々重要となり、LHD はその一翼を担うものでなければならない。以上のことを踏まえ、運営会議では LHD を対象として外部評価を実施することとした。そこで外部評価委員として運営会議の所外委員 9 名と外国人委員 4 名に更に 5 名の専門委員を加えて外部評価委員会を構成し、評価作業を行った。

平成 23 年 10 月 28 日に開催した第 1 回外部評価委員会において、本年度の外部評価の進め方について協議し、評価の観点及び具体的な評価項目を決定した。その内容を章末に示す。平成 23 年 12 月 10 日に開催した第 2 回外部評価委員会及び専門部会では、核融合科学研究所の担当者から、この評価の観点及び評価項目を踏まえたビューグラフや活動報告書などの資料（資料編参照）を用いての詳しい説明を受け、質疑応答が行われた。その後、平成 24 年 1 月 23 日に第 3 回の専門部会を開催し、研究所との更なる質疑応答も含め外部評価委員会で定めた評価の観点と項目に沿った評価作業とその取りまとめを行った。専門部会での評価案が出揃った段階で平成 24 年 2 月 21 日に第 3 回外部評価委員会を開催し、最終報告書を取りまとめた。外部評価委員会及び専門部会の日程を添付資料 3 に示した。

本報告書は、「第 1 章 これまでの経緯」、「第 2 章 項目別の評価」、「第 3 章 評価のまとめと提言」、「第 4 章 おわりに」の 4 章で構成されている。なお、外国人評価委員からの評価レポートは、ご本人の許諾を得て「添付資料 4」としてそのまま掲載した。

核融合科学研究所運営会議に提出され承認された後、核融合科学研究所長から自然科学研究機構長に提出されることになる。その後、機構の教育研究評議会及び経営協議会に提出され、承認を受けた後、文部科学省に提出する「自然科学研究機構年度計画（平成 24 年度）」及び「平成 23 事業年度に係る業務の実績に関する報告書」の参考資料となる予定である。本報告書は印刷物や WEB ホームページを通じて公開される。

「大型ヘリカル装置（LHD）計画」の評価の観点を以下に記す。下記の評価の観点は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の定める中期計画において、大学共同利用機関核

融合科学研究所が責任を有する、LHD 計画の評価に必要な不可欠なものから成っており、達成度評価及び研究水準の評価を基本とする。

なお、平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の 3 点を、今回の評価において留意するものとした。

1. 加熱装置を增強し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか
3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

[1] 研究成果

制御核融合の実現に向け、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解について、国際的に高い水準の研究成果をあげているか

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか
(上記の留意点 1. 参照)
- (2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

[2] 研究体制・環境の整備

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができているか

- (1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか
- (2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・增強、装置の改良を適切に進めてきているか (上記の留意点 1. 参照)
- (3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

[3] 共同利用・共同研究の推進

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

- (1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか
- (2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか
- (3) 大学の研究発展に寄与しているか

[4] 国際連携・共同研究の推進

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

- (1) 国際的な包括協定や機関間の学术交流協定などによる活動の中心として LHD は成果をあげているか
- (2) ITER 計画・幅広いアプローチ (Broader Approach: BA) 活動との連携、貢献を図っているか

[5] 人材育成

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成に LHD は貢献できているか

[6] 将来計画

今後の 10 年間程度を見越した LHD 計画は、第 2 期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

第2章 項目別の評価

第2章では LHD 研究における研究成果と関連した共同研究活動について、第1章で掲げられた具体的な評価項目に従って、各委員から示された評価を集約して記述する。括弧内の数字は意見の内容がほぼ同じであった件数である。外国人からの意見については、ほぼそのまま記載している。

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

平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の3点を、今回の評価において留意するものとする。

1. 加熱装置を増強し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か

Does the LHD project strive for improvement in plasma performance as scheduled by means of upgrade of heating capability, installation of closed divertor and deuterium experiment? Is the approach towards steady-state experiments in the regime with higher density and high temperature appropriate?

2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか

Does the LHD project develop collaboration activities to enrich and stimulate the research and educational activities such as human resource development in universities?

3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

Does the LHD project conduct new and original research as a global COE?

[1] 研究成果

Research achievements

制御核融合の実現に向け、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解について、国際的に高い水準の研究成果をあげているか。

Does the LHD project produce high-level achievements in accordance with international standards regarding the systematization of physics and engineering for a helical system and comprehensive understanding of toroidal

plasmas directed towards controlled fusion?

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか（上記の留意点1. 参照）

Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system ,at a high level by international standards ? (refer to the note from the last review)

- LHD は高性能プラズマに向けて優れた成果を挙げており、国際的にも高い水準を達成していることは、極めて高く評価する。（11名）
- LHD のミッション研究及び物理研究に対して系統的に課題を設定して取り組んできた。かつ数百の学術論文を毎年公表している。ダイバータ、高温プラズマ、高ベータ、定常の何れにおいても、高性能プラズマに向けて優れた成果を挙げており、国際的にもトップレベルにある。（8名）
- 超高密度プラズマの長時間維持、超伝導ヘリカルコイル電源の増強と中性粒子ビーム入射（NBI）パワーの増力による高いイオン温度の達成、電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）の増力による高い電子温度の実現などは、核融合炉を見通すうえで重要な成果である。特にベータ値 5.1%、密度 $1.2 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ の達成、またイオン温度 7 keV、電子温度 20 keV を得た成果は重要であり、核融合炉実現へ着実な進展が見られる。（6名）
- より高い磁場強度での高ベータ維持に向けた実験を着実に実施していることは、高く評価する。（2名）
- ヘリカル方式による核融合炉を見通すためには、ヘリカル・ダイバータの原理検証、その性能改善（科学的・工学的検証）が不可欠である。今回限られた領域ではあるが、閉構造ダイバータの中性ガス圧縮の性能が確認できたことは、フル・ダイバータ実験の先行実験の成功として高く評価する。関連して、共鳴磁場摂動や不純物ガス入射による非接触ダイバータの制御が実証され、3次元モデリングとの比較研究が可能となったことは、大きな成果である。（2名）
- ヘリカル系特有の研究課題として掲げ、とりわけ3つのNの課題（非線形（Non-linear）、非局所性（Non-local）、非対角項（Non(off)-diagonal）について、明確に位置づけを行うことにより、軸対称系における、ヘリカルモード摂動、非局所輸送、非対角項輸送研究への本質的な貢献を目指している。即ち、真の意味での軸対称系は存在せず、むしろ、わずかであっても非軸対称効果が異常輸送や平衡の安定性に本質的である可能性があり、極めて優れた課題設定と言える。第2の課題設定としては、やはり核融合炉の定常運転であるが、抜きこんでた成果を示している。（2名）

- 閉構造ダイバータの部分的設置によって、周辺部における密度抑制が可能になり、超高密度コアの持続時間が6秒に達したことは高く評価する。(1名)
- ヘリカル方式としては世界最高性能プラズマを達成しており、トカマクと比肩する研究レベルである。特に、超高密度、定常運転、および無電流プラズマ系での閉じ込めや電磁流体的(MHD)特性など、トカマクと相補的な研究で国際的に高い水準の成果を挙げている。(1名)
- ヘリカル方式による高性能プラズマの実現ということに限れば、間違いなく国際的に第一番の高い水準となっている。しかもその水準の高さが一過性のもではなく、炉心プラズマ物理と技術開発の成果の上に研究所の総力を上げ正面から取り組んで得られた結果であることに大きな敬意を表したい。(1名)
- 当初の目標プラズマ性能に向けた取り組みを積極的に行っている。垂直 NBI を 6 MW 増力し、また、1 MW 以上のジャイロトロンを開発・導入し、目標に向け着実に成果を上げている。特に、超高密度 (SDC) 放電に見られる超高密度プラズマの発見はこれまでに無い核融合炉条件を可能にする優れた成果である。(1名)
- 垂直入射 NBI によりイオン温度 7 keV を達成し、内部輸送障壁形成に伴う不純物ホール生成ならびにトロイダル回転の増大を明らかにしたことは非常に高く評価する。(1名)
- ハードウェアの整備とともに、着実に運転領域を拡大させ、高性能プラズマの実現に向けた取り組みにおいて、国際的に評価されるべき水準を維持・向上させていると評価する。(1名)
- 地道な研究だが、水素イオンのリサイクリングを抑制するイオンサイクロトロン共鳴加熱 (ICRH) を用いた壁コンディショニングの開発は評価に値する。(1名)
- 研究所の指導体制や組織作りにも尽力し、チャレンジングな研究課題の設定やそれを実現する優秀な所員の育成にも努めている (1名)
- 今後の重水素放電においては、核融合エネルギー増倍率 $Q \rightarrow 1$ に向けて取組んでもらいたい。目標に向けたパラメータの拡大は、今後も大きな課題であり、不断の取り組みが必要である。(1名)
- LHD の最終目標で期待される実効的なエネルギー増倍率 ($Q=0.3$) に対する達成値はまだ十分ではなく、今後のより高い成果を期待するものである。さらに、同じ環状系のトカマクにおいては 10 年以上前に 1 を超えるエネルギー増倍率を実現していること、また方式としては本質的に異なるが、レーザー核融合ではエネルギー利得 10 を目指す計画が進行中であることを踏まえ、他方式との比較においてもその達成度を評価すべきである。(1名)
- 高エネルギー粒子の存在し将来を見通せる熱・粒子束の値の下で、装置内壁の熱収支、壁排気・放出を含む粒子バランスの研究を先駆的に進めることが重要である。(1名)
- 物理の理解の進展によって達成された個々の成果を総合して、高性能プラズマ実現の

統合的なシナリオへと展開することを強く期待している。(1名)

- 国際的に高い水準の LHD パラメータを他のヘリカル装置との比較だけに終わらせず、トカマクの Q 値の上に LHD の等価 Q 値を描くなどすることで、ヘリカルの現状が理解できる。その方があとどれくらいの努力が必要であるのかがわかり、研究のドライビングフォースになる。また、イオン温度 (T_i)、加熱パワー (P_{heat}) 及びプラズマ密度 (n_e) との関係、 T_i - P_{heat}/n_e のグラフにトカマクのデータを重畳することによってヘリカル装置の立ち位置が理解でき、研究者への刺激となる。(1名)
- 核融合炉を見通すことができる高性能プラズマということであれば、ヘリカル炉ではいわゆる (1) 高温・低密度運転領域ではピークイオン温度は 15~20keV なので、目標としているイオン温度の設定自体が低い。しかし (2) 低温・高密度運転領域であれば 10keV 程度であれば十分なので設定目標は良い。このように 10 年前と異なり、実験も炉設計も研究が著しく進展したので、ここらで目標値を再検討して進むことを期待したい。(1名)
- ハードウェアの整備やプラズマの更なる高性能化の途上であり、今後の研究開発に期待したい。(1名)
- 数年後には W-7X が稼働すると期待される。今後は W-7X との相補的な研究上の連携・競争を期待する。(1名)

- The technological and physics achievements of the 14 years of LHD Project since its start-up in 1998, are very impressive and exceed the international standards in fusion research world-wide. Especially, in the last 4 years of operation after 2007 review, LHD has been extending its operational regimes in confinement, temperature and beta with steady-state and higher performance plasmas targeted for reactor-relevant regime.

Referring to the note from 2007 review, the heating system upgrade, especially radial-NBI systems, is performing well, the closed helical divertor installation and operation is progressing steadily, and shows very promising physics results. The planning and preparation for deuterium operation is also made good progress toward complete implementation of required systems.

- Assessing the achievements of LHD during 2011 one must bear in mind that Japan has experienced the disaster unprecedented in human history in terms of all aspects of life. Yet, NIFS remains the forefront leader of the world fusion research. Achievements are very ambitious and address an extremely broad range of issues confirming the high reputation of NIFS. They comprise the realization of a high fusion triple product, demonstration of a stable long pulse operation, achievement of very high plasma parameters values, the control of plasma-wall interactions by means of closed helical divertor with the baffle-structure and employing advanced

materials for studies relevant for a fusion reactor. Indeed, the progress in 14 years of operation is impressive last year being no exception. Specifically, the super density core regime offers a path to a reactor based on the stellarator concept. Impurity hole discovery accompanied by increased poloidal rotation benefits the super density core regime of operation in LHD. Heating capacity has been significantly enhanced providing for reactor relevant modes of operation. Machine capabilities are envisaged to reach its maximum capacity in a few years time employing an upgrade of the heating power, closed helical divertor and a long overdue deuterium running experiments.

- The LHD is the biggest stellarator in the world and with its superconducting coil system clearly the leading device in the field. The scientific results obtained with LHD are highly significant and internationally competitive. The research team is well trained, experienced and has access to world-class diagnostics and heating systems (currently 30MW NBI, 4MW ECR, 2MW ICH). The LHD pellet injector (fueling) system, for example, is envied by the world and has opened the gate to the very high density operation (SDC).

As already pointed out in the 2007 review of LHD, the biggest challenge is the integration of the discharge scenarios, i.e., to obtain high plasma temperature (low v^* collisionless regime) at reasonable densities (at least 10^{20}m^{-3}), high energy confinement time (a few s), and everything steady-state. This combined is all required for a fusion power reactor! In one presentation, a graph was shown with the discharge duration vs. the fusion triple product. It shows that present days tokamaks are still way off the target for a power reactor (often noted as DEMO). Their very good plasma performance tends to deteriorate for longer discharge times (for various reasons). But stellarators have to improve very much as well, first of all in the plasma figures of merit. As a consequence, what is called in the diagram “reliable extrapolation” means work for a generation of scientists. In particular the trend indicated in the diagram must be reversed. What probably needs to be done is the following:

- Better plasma parameters: The planned upgrades for the heating systems (see below) will certainly help to obtain even higher electron/ion temperatures. It seems that relatively stable high density discharges can be established with pellet injection fuelling.
- High power long pulse operation: The planned upgrade to 4MW cw heating power is an important step in this direction (at present only 1.5MW cw). For

density control of long high-power discharges, a completed and actively pumped divertor will be necessary. The design value of the cw heat load of the planned divertor will limit the cw heating power.

Integrated discharge scenarios: A focused and dedicated program should be conducted to integrate the scenarios for reactor-relevant (H and D) plasma conditions. A first step would be a thorough analysis of the present status, e.g. a comparison of β_N -values for all discharges from LHD and the other stellarators. This would provide a scientific basis to judge if the specific magnetic field configuration of a heliotron is a limiting factor or not.

- LHD has made substantial progress since its last review and has become one of the leading fusion research facilities in the world and is establishing the basis for extrapolatable performance by helical systems. Of particular importance are the separate achievements of 5% beta and its sustainment for more than 100 energy confinement times, 1.5 atmospheres of central pressure, high central ion and electron temperatures (7 and 20 keV, respectively), and the identification of the impurity-hole expulsion. In addition to increasing the heating power, LHD has increased performance by implementing the initial modules of the closed divertor and improved the graphite wall conditioning. This indicates that further improvements are likely with installation of the rest of the divertor including cryo-pump, and use of other wall-treatment strategies. The strategy for further increasing absolute performance and $nT \tau_E$ is reasonable, but may require.

LHD has implemented an extensive diagnostic system giving a comprehensive perspective on the plasma transport. This is validating a growing understanding of LHD plasma physics including numerical models, which will provide the physics basis for extrapolation of helical systems to the reactor scale. The initial comparisons between data and models look promising, but were not shown for all the important regimes.

Future experiments to improve the basis for extrapolation could include studies of the confinement scaling with single dimensionless parameters, such as ρ^* or S , holding the others fixed. These could clarify which transport mechanisms are most important. Very interesting experimental data of the S , ν^* , and beta variation with magnetic field was shown, which might be possible to analyze in this way. Comparisons of the profile variations in these experiments with the numerical models may also be effective.

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

- 輸送や MHD、ダイバータ物理など、3次元磁場がもたらすプラズマ物理はトカマクとの相補性の視点からも重要であり、LHD において環状プラズマの総合的理解を積極的に意識した学術研究が展開されていることは、極めて高く評価する。(9名)
- ヘリカルプラズマに本質的な3次元(3D)効果は、トカマクの詳細解析にも極めて重要なものである。特に最近、最重要課題と言われる境界部のプラズマは3D効果が本質的であると言われ、またエルゴディク・ダイバータについても、トカマクのダイバータへの応用が期待できる。さらに、Edge Localized Mode (ELM)の物理や、タングステンに関わるプラズマ壁相互作用(PWI)物理、共鳴摂動磁場(RMP)を用いた非接触プラズマによる熱流制御技術、電子バーンスタイン波(EBW)やICRF等の波動加熱の物理などもLHDの学術的成果が環状プラズマの総合的理解に大きく貢献している。(5名)
- LHD研究の発展は、コアプラズマと境界プラズマの輸送、プラズマ壁相互作用、MHD安定性、ダイバータ工学等の分野でトカマクとの共通性や違いなど、環状プラズマの理解を深化させた。非局所輸送現象、長距離相関揺動、トロイダル流、磁場のストカスティック構造などの研究において、LHDの成果があつて初めて環状プラズマの総合的理解が可能になってきたとも言え、その成果を極めて高く評価する。(3名)
- エッジプラズマにおいて、LIDコイルを用いたRMPによるダイバータデタッチメントの安定化、電子温度低下を起こすことによる輻射損失増大の制御、RMPによる磁気シアアの制御、RMPによるELMの低減のメカニズムなどを解明するなど、今回RMPの新しい手法を開発して環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させたことは極めて高く評価する。また、赤外線カメラによるダイバータ熱流束の測定の結果、ベータ値とともにそのピーク値がずれていくなどの結果は炉においても重要であり、WダイバータのLHDにおける照射実験におけるユニポーラアークのフラクタル次元の解析など大変面白い。(1名)
- 学術研究としての進展を図るうえで、理論・解析モデルの拡充は必須の課題である。LHD実験解析で開発された3次元の解析手法は、既に3次元的な解析の必要性が高まっているITERなどのトカマクを含む環状プラズマの総合的理解に大きく貢献しており、極めて高く評価する。(1名)
- ヘリカル系の特徴である3次元磁場構造が、径電場を介して乱流構造や輸送、巨視的構造、さらにMHD安定性にどのように影響を与えるかを、精密測定可能な計測器の開発によって系統的に解明してきたことは高く評価する。(1名)
- コアプラズマの研究において、トレーサ内蔵固体ペレット(Tracer-Encapsulated Solid Pellet: TESPEL)による非局所輸送や、スパイラル形状の長距離相関揺動の発見

は、環状プラズマの総合的理解のために大きな進歩であり極めて高く評価する。特に高速イオンによって励起される GAM による電位揺動によるバルクイオンの加熱が示唆されるなど、アルファ・GAM チャネリングの可能性があり、核融合炉のイグニッション研究にとっても極めて重要であり、さらなる進展を期待する。(1名)

- 最外殻磁気面形状の推定法、外部共鳴摂動磁場のプラズマ中への浸透、圧力駆動型低次 MHD 不安定性の制御研究の進展、磁気島の物理研究の進展、閉じ込め改善に関する実験と理論・データ解析の進展等は、環状プラズマの総合的理解に関する学術研究として高く評価する。(1名)
- 近年の高ベータプラズマ、高 T_i 、 T_e プラズマの実現と維持など環状プラズマ装置としての高いパフォーマンスを達成し、毎年チャレンジングな課題にも積極的に取り組み実現する体制は高く評価される。また、このような多様な学術研究を遂行しているながら物理的なバックグラウンドを忘れていない姿勢は大学共同利用研究機関として重要であり、評価する。(1名)
- 3つのN(非線形(Non-linear), 非局所性(Non-local), 非対角項(Non(off)-diagonal))を課題として掲げて学術を発展させていることは極めて高く評価する。この発展の過程で、3つのNに由来する、異常輸送・平衡・高エネルギー輸送に関する制御と改善へと研究を集中させることが期待される。環状プラズマの相互理解として、3つのNの課題以外に基本的なものとして、定常高温プラズマ運転、定常熱・粒子束制御、定常燃料リサイクリング・灰排気制御などの課題は炉成立の根幹課題であり、ヘリカル系の優位性を世界に示すべきである。特に ITER での 400 秒運転を見通せるための熱負荷・粒子負荷条件に近い条件を設定し、想定しうる運転上の問題点を探索することが期待されている。提言としては、4つのミッション課題のマシントイム、関連する研究者数、発表論文数などの整合を図るべきである。(1名)
- LHD を用いた原子・分子過程研究は 2010 年度から始まったが、天体物理、原子分子物理学といった基礎研究ばかりでなく、極端紫外光源開発などの応用研究に寄与する重要な研究展開である。タングステン分光データや、希土類元素の分光計測、太陽プラズマ研究のための鉄イオン発光線計測など、新たな学問分野の開拓が予感され、期待が大きい。(1名)
- 高温プラズマを利用した光源としての活用を図り、原子分子研究の新たな展開に寄与する点など評価するし、今後も他分野での学際的研究も視野に入れて活動の枠を拡げてほしい。(1名)
- 炉の制御にとっては好ましくないとされるスパイラル形状の長距離相関揺動がどのような条件の時に現れ、どのような条件でそれを取り除くことができるか、また強いポロイダル回転の導入で取り除くことは可能か等研究すべきことは多いので、さらなる進展を期待する。(1名)
- 環状プラズマの総合的理解も重要ではあるが、30 年後にヘリカル炉を実現させるには

なお多くのヘリカル装置自体の課題が目の前に横たわっており、例えば何故イオン温度がそれほど高くはならないのか等のヘリカルプラズマ特有かもしれない個々の問題の理解と解明も大変に重要である。時間は多く残されているようには見えるが、何かやるには時間がかかるので、よく考えて焦点を絞って研究を進展させることも望まれる。

(1名)

- 実験、理論の研究結果が [A] ヘリカル炉の (a) 高温・低密度運転領域 (b) 低温・高密度運転領域、どちらの領域の研究か、[B] トカマクも含めて環状プラズマの総合的理解の研究、[C] 核融合の他の分野の研究、[D] 炉設計データ用研究等、どの分野に属するかを分類し、表を作っておくと研究テーマの設定と選択が全体的にバランスよく配置されているかどうかがよくわかる。一度そのような方向で検討してみることを提案したい。(1名)

- 新しく発見され、計測データが揃いつつある現象について、その物理機構を解明するための定量的な物理モデルを確立することが望まれる。(1名)

- With outstanding technological and performance achievements during last 4 years, the LHD Project also made great stride in advancing scientific research with additional width and depth of research themes to understand toroidal plasmas. Especially, the core transport study with 3D effect and fluctuation-driven physics produced very high quality results that elucidate linkage of physical mechanism to determine transport in toroidal plasmas. It is also worthwhile to note that the control of ELM in MHD area could contribute to resolve the major issue of tokamak operation using inherent 3D physics capability of LHD.

The LHD approach with 6 physics oriented theme groups is showing effectiveness of collaboration of experimentalists and theory/simulation scientific staffs to advance scientific understanding of toroidal plasmas.

- Research results are at the cutting edge of the international fusion research. It is confirmed by the attainment of ion and electron temperatures relevant to a fusion reactor, the world record of steady state beta value and long pulse operation of 1 hour at almost 3 MW of auxiliary heating. The discovery of the Internal Diffusion Barrier resulting in the super dense core regime of operation opens a new route to the reactor operation of advanced stellarators complementary to be realized on JT-60 SA and ITER.
- The scientific quality of the LHD team is excellent and one literally feels the strong efforts to understand the physics happening in the device. As usual in plasma research, however, it is often difficult to disentangle the causality of the various parameters. E.g., the IH is still lacking a convincing physics explanation, which is actually of paramount importance if one wants to extrapolate this – very much

desired - discharge mode to other, more reactor relevant regimes. A crucial point is always the close and fruitful collaboration between experiment and theory. NIFS has excellent, world-wide regarded researchers in his theory department. It is difficult for me to judge how close the collaboration is on the working level, day by day. But this is a key point to achieve scientific excellence in the field of toroidal plasmas. The NIFS management should carefully monitor the situation and the project structure should foster internal collaboration as much as ever possible (cf. also question [2]).

There is, indeed, a lot of challenging physics problems courageously attacked by the LHD team: The old problem of linkage between radial electric field and transport, zonal flows and GAMs in helical systems, non-local phenomena in turbulent transport, magnetic field stochastization and much more. Here the collaboration with the Japanese universities seems to have a very positive effect.

The publication record of LHD is internationally competitive. In fact, for the scientific review committee of the Max-Planck Society, my institution has conducted a thorough publication analysis of the leading research institutes in the world. NIFS has always ranked very high by all criteria, except the number of high-impact papers. The latter can be explained by the lower number of stellarators in operation, but NIFS should nevertheless encourage the LHD researchers to publish their results in the major journals of the world.

- LHD now has a mature and comprehensive diagnostic set that is comparable to the best tokamaks, and includes unique capabilities for a large facility, such as the HIBP and collective scattering. This is allowing LHD to do world class and leading research across the full spectrum of fusion physics topics, including core transport, MHD stability, divertor and edge transport, energetic particles, and wave interactions and heating. The group is using its wealth of diagnostic information to make detailed comparisons with numerical simulations and theoretical predictions, strongly improving the general understanding of fusion plasmas. It also is allowing detailed comparisons with similar results from tokamaks and tokamak-theories, demonstrating an understanding of the role of 3D magnetic shaping. These studies are making a strong contribution to our understanding, including
 - the role of GAMs and zonal flows in 3D turbulence,
 - non-local transport,
 - ELM mitigation by RMP perturbations
 - Energetic particle stability and coupling to GAMs
 - Tungsten dust production and retention of hydrogenInnovative new techniques have been developed, such as the use of heat pulse

propagation to identify magnetic islands and stochastic regions. These are being adapted to tokamaks, showing further impact.

[2] 研究体制・環境の整備

Development of research system and environment

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができるか

Does the LHD project develop the required steps to execute the missions described in [1].

(1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

- 新しいプロジェクト体制によって、テーマグループ体制を機動的かつ柔軟に活用することができ、実験提案数も平成 19 年度の 220 件から平成 23 年度の 267 件に増えたことは、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献したと判断され、高く評価する。
(8名)
- プロジェクト制度による新たなテーマグループの発足もこの制度の柔軟性を示しており、高く評価する。ただ、もう少し、長期的に判断する必要も有り、次回の外部評価でもこの点の再評価が必要である。(2名)
- プロジェクト制の導入が年度の実験サイクルにおける実験課題の優先度を明確にしたことが、テーマグループ内における所内・所外の共同研究を促進させ、担当機器をもつ運転グループの士気も高め、結果として研究、共同研究の推進に繋がっている。
(1名)
- LHD 研究の効率的な推進や LHD 共同研究の機会拡充だけでなく、JT-60SA や ITER への実験参画の在り方も視野に入れて、システムの一層の改良を期待したい。(1名)
- LHD プロジェクト制は LHD 実験のみならず LHD 装置の整備にも大きく貢献している。特に、稼働率が 99%を超えている超伝導マグネット運転、加熱系の順調な設置などが、LHD 実験の進捗に大きく貢献している。このため優れた結果が蓄積されてきたといえる。LHD の順調な運転は LHD 研究の推進や共同研究の順調な実施に大きく貢献している。このようなことから、極めて高く評価する。今後の重水素放電に向けた準備研究も順調に進めており、極めて高く評価する。(1名)
- 研究プロジェクトと研究系が柔軟に関与しあっている、22 年度から導入された体制はミッション研究、物理テーマ研究、工学テーマ研究を遂行する上で、極めて効果的な研究運営体制として評価する。学外者によりテーマリーダー制の導入などにより、共同研

究・共同運営が可能になっており、高く評価する。(1名)

- 共同研究者の人数は2010年から2011年にかけて大きく増加している。特にLHD実験に関係する共同研究者数の伸びが著しい。これはLHDプロジェクト制度の導入による共同研究の機会の拡充によるものと考えられ、評価する。また、プロジェクト間の連携(例えばLHDプロジェクトと数値シミュレーションプロジェクト)もうまく進んでいるように思われる。(1名)
- 新しいプロジェクト体制はLHD研究にflexibilityをもたらし、核融合プラズマの実現に向けての研究に効率性と、共同研究の拡充に貢献しているので、極めて高く評価する。特に外国からの実験提案も受け付けるようになった点、核融合工学との連携が以前より強くなった点が良い。(1名)
- 研究制度改革が研究成果に結実するまでには一般には時間がかかることであるにもかかわらず、LHDプロジェクトの成果を鑑みれば、ヘリカル研究部とプロジェクトとの縦系横系の体制が、研究の効率化や共同研究の機会拡充に貢献している。(1名)
- プロジェクト制になって所内の研究者同士の交流が容易になった点は評価する。3つのプロジェクト(LHDプロジェクト、炉工プロジェクト、数値炉プロジェクト)は、独自の研究において高い研究成果を挙げているが、核融合炉としてのヘリカル方式を推進する上では、いわゆる“3本の矢”であろう。しかし現時点では、相互の交流や研究的な貢献はまだ十分とは言えないので、今後のさらなる連携を期待する。(1名)
- The newly adopted LHD project system has changed “organizational structure” from “line management” to “matrix system” in appearance. With 4 major projects including LHD Project, Numerical Simulation Research Project, Fusion Engineering Research Project, and Coordination Research Project, the Department of Helical Plasma Research is consisted of 7 Research Divisions(plus Rokkasho Research Center for BA related activities). Then, LHD Project has been organized 4 Mission Oriented Theme Groups and 6 Physics Oriented Theme Groups. This new approach has targeted for promoting flexibility by theme group system. The initial outcome of new system looks promising and judged to be effective by significant increase of experimental proposals, and stronger leadership role of TG leaders.
However, the well-known weakness of “matrix system” on engineering baseline management with limited human-resource, needs to be watched out, for technical projects.
- The Project system is very well defined and highly consistent with the important goal of achieving the fusion energy. It is transparent and very efficient in exercising both domestic activities and the very broad range of international interactions.
The special attention is paid to the safety and the robustness of operations following exactly the chosen timescale and the scope of highlights of the research program.

Indeed, high availabilities of the superconducting system have contributed to highly efficient LHD plasma experiments. Further increase of the NBI heating power to 28 MW enabled to obtain high Ti regime (7 keV) thereby amplifying the reactor relevance of LHD results. The progress in ECRH capability holds the promise of the reactor relevant long pulse operation.

- First of all, the implementation of the new project system of NIFS is very much applauded. The LHD project system is very much based on a matrix organization. This has many advantages, since researchers and engineers can organize their work in an interdisciplinary way and the human resources are more efficiently used. The drawback of a matrix structure is always a lower level of responsibility, since the work priorities not strictly defined. This requires a high level of responsibility and commitment to the overall goals of the project, something that seems to be the case in the LHD team, though. Like for other large-scale fusion projects, a task force like structure was implemented. This is of utmost importance, especially to foster external collaboration. The figures for experiment proposals develop quite well (>600 collaborators, 267 experiment proposals), which confirms the approach chosen by LHD. In a task force system, the key for success are strong and competent task force leaders. In other large-scale experiments it has turned out to be most efficient to appoint task force leaders year-by-year, chosen from the group of senior scientists but eventually giving skilled younger scientists a chance. I recommend the NIFS management to pay highest attention to the topical task forces as the chief tool for steering the joint research done on LHD. Finally, The communication with the other projects (engineering, numerical simulation) seems to be well organized with a fruitful exchange of knowledge.
- The new LHD organization features 11 Theme Groups, focused on and responsible for either Mission-oriented or Physics-oriented topics, with rotating leadership drawn from the working researchers. This is a very good and flexible structure, ensuring that all the critical topics receive responsible attention and active engagement. The Theme leaders have authority to allocate allotted run-time to accomplish their mission and responsibilities. This provides a relatively open structure for researchers to pursue ideas and contribute to the overall LHD missions. It has resulted in a ~30% increase in the number of experimental proposals, including a doubling of the proposals submitted by collaborators. The Theme groups are co-led, with one of the leaders being from a collaborating university. This ensures good connections and openness to collaborators, and is consistent with the substantial increase in the number of LHD collaborating researchers. The rotating

leadership of the Theme groups will be very beneficial in training new leaders and outstanding researchers for the future.

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか（上記の留意点1. 参照）

Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

- LHD の性能を最大限に発揮させるために、特にイオン温度向上のための垂直入射 NBI 装置の整備や ECH の増強・長パルス化、高性能プラズマの長時間維持に不可欠なバップル構造ダイバータの整備、超伝導コイル用 DC 電源の増強など、必要な機器整備・増強、装置改良が適切に進められてきたと極めて高く評価する。（10名）
- 加熱パワーの増強や閉ダイバータへの配位への改良はプラズマ性能の向上に寄与するものであり、適切に進めてきた。前項までの成果を達成する上でこれらの整備・増強が不可欠であったことは明らかである。この努力について、極めて高く評価する。（5名）
- NBI の増力、ECH の増力、ICRF の改良など加熱装置の整備増強は着実に実施されている。特に、NBI は短期間で所定の性能を引き出し、また、ECH の性能は開発したジャイロトロンの性能向上に伴い著しい進展を見せている。閉ダイバータ構造の導入は、LHD のヘリカル構造に組み込むことは困難を伴うと思われていたが、適切に整備され、よい成果を生み出している。また、超伝導コイルの運転等本体の維持管理も秀逸で LHD の優れた成果の礎と言える。（3名）
- 整備に関しては2種類の考え方が必要である。即ち LHD の基礎となる機器の整備、ミッションあるいは物理テーマ毎の戦略的な整備計画とその実施である。閉ダイバータ化を優先して進めていることはこの観点で、LHD の基本性能の向上が期待できるものであり、大いに評価する。すでに良好な成果が得られており、速やかな完了が期待される。課題毎の整備に関しても、NB、ECH、ICH などの高パワー化が戦略的に推進されており、この観点では、高パワーでの定常運転が何によって制約を受けるかの研究が極めて重要であり、世界から期待されている。3MW 1hour を当面の目標として設定するだけでなく、400s を一つの“運転時間”として設定し、高パワー、高密度、高高速イオン密度条件下での研究を戦略的に進め、世界で唯一 ITER に貢献しうる研究所として Data base を確立することが重要である。（1名）
- 超伝導コイルとそれを動かすためのクライオスタット系や電源系の稼働率が極めて高く、これが LHD の安定的な運転を支えるとともに、実験の可能性を拓げる基盤技術として役立っている。古くなったシステムの更新や高速応答可能な DC 電源コントロール系の整備など不断の努力の賜物であり、高く評価する。（1名）

- 超伝導システムの稼働率 99%は、LHD 実験の効率的実施に大きく貢献しており、高く評価する。(2名)
- 閉ダイバータへの改造を高く評価されるべきで、閉ダイバータの全領域化を出来る限り早期に実現すべきである。加熱装置系の改良も適切に進捗している。(1名)
- 加熱や本体機器の整備・増強は、その予算獲得が律速となるが、その範囲ではよく頑張っていると言え、高く評価する。14年間にわたり超伝導コイルを高い信頼性で運転してきた実績は世界的にも高く評価されており、ITERの超伝導システム設計にも多大な貢献が期待されている。加熱機器もプラズマ実験の要請に従って順調に増強されてきていると言え、高く評価する。特に負イオン源などの技術はITERへの貢献としても期待されている。(1名)
- LHDの性能を最大限に発揮させるためには、超高密度プラズマの研究において、プラズマのより内側へのビーム侵入長を上げるための負イオンNBIの電圧の増大等については言及がなく、その点が物足りない。即ち、すでに指摘したように、ヘリカル炉ではいわゆる(a)高温・低密度運転領域と(b)低温・高密度運転領域の2種類があり、それらをどう攻めていくのかをよく認識して計画を立案することが望まれる。(1名)
- 低磁場ではベータ値は5%と大きいですが、磁場を大きくするとベータ値は減少する。強磁場でベータ値をあげるには加熱パワーのさらなる増強が必要と思われるが、ベータ値と加熱パワーの関係を表すグラフがあれば、後どれくらいのパワーが必要であるのかわかる。そのような外挿性を予測できるグラフの作成が望まれる。(1名)
- High availability record (~ 99%) for the superconducting systems including SC coils, cryogenic system, and power supply, demonstrated LHD Project's capability of maintenance of main device and facility at the highest level. The newly developed and installed "closed helical divertor", "radial NBI heating system" and "HAS ICRF antenna" demonstrated upgrade capability and improvement of main system and heating systems are also in the highest level of competence.
- LHD project development is very sensitive to excellence in the maintenance, upgrade and technological improvements of the main device and heating systems. To this end, major changes of Cryogenic systems, upgrade of DC power supplies for LHD superconducting coils and motor-driven switch gears will be implemented in the near future. Closed helical divertor has been designed and tested in order to enhance the LHD performance. Improvements in fueling and heating systems are addressed in a rigorous manner. Design studies of the negative-NBI and positive Deuterium ion source are underway.
 These technological developments are bound to deliver further improvements of the LHD performance.
- The level of engineering on LHD is clearly world-class. The availability and shot-

frequency of LHD is outstanding. The foreseen upgrades of heating systems for LHD are quite impressive (about 40MW), and the device them seems to be adequately powered. There is a certain lack of cw-power (see also question [1]), but this is consistent with the present design of the divertor. I very much appreciate that the closed helical divertor is now integrated step-by-step into the machine. Until the end of 2012 it is foreseen to have 8/10 divertor modules and one cryo-pump installed. The missing elements are planned to follow 2013/2014. This upgrade is of utmost importance and should be aggressively pursued. A powerful tool for density control is the versatile fuelling system, and the improved pellet injector turns out to be indispensable for LHD operation.

- The continuous upgrading and development of the LHD auxiliary systems has been key to its achievement of high parameters and its broad range of experiments to develop understanding of helical systems. This includes the upgrading of the heating systems (NBI, ICRF, ECRH), the divertor and pumping, and the fueling systems. It is critical that this upgrading process continue, in order to maintain momentum towards higher parameters and to enable LHD to stay at the world forefront in fusion physics. The availability of new capabilities (including new diagnostics) has fueled the group's ability to make discoveries and breakthroughs in understanding.

The high availability of the superconducting coils and cryogenic systems has established an excellent benchmark for future superconducting fusion systems. This is an important accomplishment, demonstrating that such systems can be made reliable and dependable.

The completion of the closed divertor upgrade (with pump) and the ability to operate in deuterium will be very important for the next phase of LHD. Following that, non-carbon plasma-facing components and methods to improve the magnetic field shape (reduce the effective ripple) should be considered.

- (3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

- トムソン散乱システムの改良による電子温度データの質の改善、重イオンビームプローブの開発、運動シュタルク効果による磁場の回転変換の測定、高エネルギー粒子計測法の整備、データ収集系の改善などが進展し、精度の高い計測結果が提供されるとも

に、質的に優れたデータと理論・解析モデルの拡充とが車の両輪として効果的に機能し、優れた成果を達成していると高く評価する。(7名)

- コアプラズマ計測としては、電子サイクロトロン放射計測、反射計、重イオンビームプローブ計測など高い精度を有する計測器が整備され、周辺プラズマ計測では、高速掃引プローブ(マッハプローブ、イオンセンシティブプローブ)、赤外線カメラ計測などが整備されており、環状プラズマの総合的理解に貢献するデータが得られている。(1名)
- LHD プラズマにおける MHD 安定性解析、ペレット入射シミュレーション、高速イオンによるアルヴェン固有モード励起、乱流輸送シミュレーション、周辺輸送モデリング、コア輸送統合モデリング等が着実に進展しており、理論・解析モデルの拡充は高く評価する。(1名)
- 重イオンビームプローブ(HIBP)をはじめとして、今までも先進的な計測器を開発してきている点は高く評価する。今後も独創的な計測器の開発に力を注ぐべきであろう。また X 線イメージング結晶分光器(XICS)のように、海外の最先端計測機器を導入するのも有効であるので、積極的に推進すべきである。データ収集やネットワークも重要な分野であり、世界標準を目指して今後も頑張ってもらいたい。(1名)
- これほどの大型装置でありながら重イオンビーム計測機器を整備するなど、精緻な計測器が充実していることは、所員ならびに共同研究者のたゆまぬ努力の成果であり大いに敬意を表したい。解析モデルも充実しており、世界の重要な 3D コードなどの実験へのベンチマークとしての位置付けられている点は高く評価する。こうした精緻な計測を戦略的に 3N に向けて戦略的にさらに整備すること、実験との検証作業を通じて、ITER への世界標準コードの開発を明確に位置づけることが期待される。(1名)
- 解析モデルとしては、乱流シミュレーションコードとして GKV-X が開発され、またヘリカル系統合シミュレーションコード TASK-3D の改良が行われている。また周辺プラズマ解析コードとしては EMC-3 コードが整備され、不純物輸送や非接触プラズマ生成等の解析が行われている。(2名)
- MHD 解析用のツールの拡充、ダイバータシミュレーションコードの、流体モデル、統合輸送シミュレーションコード(TASK 3D)、帯状流(Zonal Flow)の解析等、環状プラズマの総合的理解のために着々と精度の高い理論・解析モデルの拡充をしてきていることは極めて高く評価する。(1名)
- 既存の計測系の整備の他、新たな重水素放電実験に向けた準備研究のための中性子計測やトリチウム計測等に取り組んでいる。また、プラズマ計測と共に理論解析なども充実させており、環状プラズマの理解に貢献している。このような点から、高く評価する。(1名)
- ヘリカルは 3次元プラズマを対象とするので、トカマクのような軸対称系よりも解析モデルや計算機シミュレーションコードの開発に時間を要するが、着実に成果を挙げて

いると言えよう。特にベータ値限界や輸送シミュレーションでは世界的にも高い評価を得ており、今後のさらなる発展を期待する。(1名)

- 学術研究分野では、高性能な計測機器が新たなブレイクスルーを引き起こすといっても過言ではない。数 keV の核融合炉心プラズマが定常的に生成できる LHD は、このような高性能計測機器の開発を推進するためのプラットフォームとしての役割が期待される。また 3 次元配位での物理やその理論・解析研究は、LHD が世界を牽引する立場であるので、3 次元物理のプラットフォームとしての役割を期待する。(1名)
- 計測器は順調に拡充されている。また、重水素実験の準備研究も着実に進められている。ヘリカル系の MHD 挙動に理解が進みつつあり、また、評価の高い MEGA コードのヘリカル系での結果が出つつあり、トロイダル系の物理の総合的理解に向けて着実に進展している。(1名)
- 共同研究体制に合わせ、双方向研究を推進する九州大学や筑波大学をはじめ各装置のデータを一括管理するプラットフォームを整備し、Fusion Virtual Laboratory (FVL) 計画を進めるなど国内基盤組織としての整備も評価でき、今後の進展が期待される。(1名)
- 重水素実験用の計測に対する準備研究も進めている点や、多くのシミュレーションコード開発と解析モデルの構築を進めるなど着実な進展がみられる。核融合科学研究所内の実験グループと理論シミュレーショングループ間の連携をさらに密にし、トラス系プラズマの総合的理解をますます進めてほしい。(1名)
- 高精度計測の開発は相当な進展であるが、中性子計測はまだ緒についたばかりの印象である。理論・解析モデルの拡充としてゾーナルフローの 3 次元シミュレーション結果には感銘を受けたが、数値実験炉へ如何に接近したかについては判断できない。(1名)
- SDC の様な炉としても期待されている超高密度プラズマになると計測が行いにくいといった困難さはあるが、どのようにしてそのプラズマを計測していけばよいか計測グループはそこに挑戦していこうとする意欲があるのかどうか、また、理論解析グループは超高密度プラズマの解析に興味を持っているかどうか、超高密度プラズマではどのように面白い理論的なことが期待されるか、といったことがいっこうに見えてこないのが気がかりである。環状プラズマの総合的理解のためだけではなく LHD の重要な結果をいかすための方策をも考えるべきであろう。(1名)
- 輸送現象は多くの物理機構が非線形的に結合しており、総合的なモデリングの重質が望まれる。(1名)
- Diagnostic systems of LHD are now in mature stage so that continuous upgrade of existing diagnostics improved data quality significantly. However, diagnostics development toward new concept and deuterium experiment seems to be a bit lagging due to uncertainty of target for deuterium operations. The theory support and data-analysis for LHD experiments achieved its goal in very high level as

described in the previous section for LHD scientific research excellence.

- Novel diagnostics such as Heavy Ion Beam Probe unique for LHD, Microwave Doppler reflectometry, H/He ratio measurement system and 2 Beam Emission spectroscopy enhance significantly the knowledge and the understanding of the LHD plasmas. Among theoretical achievements one should mention the MHD analysis of short wave ballooning modes and pellet plasmoid injection in LHD, three dimensional simulation of the collisionless driven reconnection in LHD plasmas, anomalous decay of cyclotron motion in a waveguide. Furthermore, 3 D Monte Carlo code is being developed for reentering energetic particles to be included in it. 3D MHD equilibrium reconstruction is developing in order to benchmark the HINT 2 code which played the crucial role for many years of LHD operation. . Simulation science center has also achieved good results implementing TASK3D transport code. The capability of the center is enhanced by upgrading the capacity of the new computer operating in Japan at present.

- The diagnostic equipment of LHD is ranking world class and provides excellent information on the key plasma quantities. As usual, the continuous development and improvement of diagnostic instruments is mandatory for the success and is well implemented on LHD.

The strong theory and simulation research division contribute efficiently to the understanding of physics issues. This review does not include the evaluation of the theory and simulation activities; a thorough revision of the available codes and concepts is therefore postponed to one of the next reviews.

- LHD has had a long-term program of investment in its diagnostics and modeling. This has produced a comprehensive diagnostic set that is comparable to the best tokamaks, and includes unique capabilities for a large facility, such as the HIBP. The recent work on diagnostics includes upgrades to existing diagnostics, such as Thomson scattering and HIBP, and development of new diagnostics in preparation for deuterium operation. Continued diagnostic upgrades are crucial for maintaining the momentum and impact of LHD research.

This work is complemented by improvements in plasma modeling and the joint work with the NIFS Numerical Simulation Research Project. The evolution of Task3D into a useful predictive code is very impressive and initial detailed comparisons with LHD diagnostic data is very encouraging. This joint development and refinement of capability is crucial for establishing a validated model for future extrapolation. LHD and the Numerical Simulation Project should be embark on a systematic, quantitative validation of the models for confinement in 3D helical

configurations, as the model and diagnostic capabilities allow.

The opportunity to test the predictions of the models for deuterium operation has been recognized. This should be systematically exploited in planning and carrying out the deuterium campaign.

[3] 共同利用・共同研究の推進

Promotion of Collaboration

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

- 一般共同研究における LHD 実験研究、研究成果を LHD に反映させる LHD 計画共同研究、6つのセンターからなる双方向型共同研究における LHD へ寄与するプロジェクト的研究は LHD の研究成果を格段に進展させている。よって、極めて高く評価する。(8名)
- 3つの共同研究は、核融合コミュニティにとって大変有意義な制度であり、大学の附置センターから講座レベルの研究まで、幅広い柔軟な共同研究が可能となっており、高く評価する。(5名)
- 一般共同研究では、たとえば東北大学とは電極バイアスによる電場分岐の実験、LHD 計画共同研究では、東海大学とのモジュールモデルを用いた高密度・ダイバータに関する物理研究、双方向型共同研究では、筑波大学とのジャイロトロン開発など、それぞれの共同研究の特長を活かし、多くの優れた研究成果をあげている。(6名)
- 一般共同研究と LHD 計画共同研究の参加者は 2007 年度の 533 人から 2011 年度の 644 人へと大きく増加しており、所外共同研究者が主著者として出版する論文の比率も増加している。大学等との連携による開発が LHD 実験に反映されつつあるだけでなく、独創的な成果を生み出しつつある。(3名)
- 大学のアイデアを用いた、LID (Local Island Divertor) コイルによる RMP (Resonant Magnetic Perturbation) に関する優れた研究成果をあげているのは特筆に値する。(1名)
- 計算機研究のためのプラズマシミュレータは総演算性能 77Flops、総主記憶 16TB、外部記憶装置容量 0.5PB という高い能力を有するが、平成 24 年 9 月の中間レベルアップではさらに大幅な能力の向上が予定されている。(1名)

- 外部からの研究者によるリーダー制などを積極的に取り入れている点は、こうした優れた研究成果やあたらしい視点の導入を図る上で重要であり、高く評価する。(1名)
- 学生を含む若手研究者に優れた研究環境を提供している点を極めて高く評価する。(1名)
- 人材育成、研究分野間交流など LHD を中心として拮がりを見せており、評価する。(1名)
- 全体の予算が縮小している中、今後、質・量両方の拡充を目指すことは難しいと考えられる。採択率が下がっても、ある程度の集中的な予算配分が必要である。さらに、人材育成との関連で、大学と核融合科学研究所との研究者間で大学院生のテーマ設定を行い、その内容の共同研究を立ち上げる等の共同研究活性化の施策が必要と考えられる。(1名)
- 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究はさまざまな形の共同研究に対応できるよう整備された共同研究システムであり、それぞれ優れた成果をあげている。LHD 計画共同研究は大学における研究活動の活性化と学生教育にも貢献しており、それを通して核融合科学研究所における共同研究をより活発にする効果をもたらしている。それらが優れた研究成果をあげる一つの原動力となっているものと考えられる。具体的には、優れた研究成果はたとえば IAEA 主催の Fusion Energy Conference (FEC) における共同研究者による多くの研究発表などに現れている。(1名)
- LHD を用いた研究で、大学の研究者が世界的にも評価される高い成果を挙げているが、さらなる一層の努力を期待する。(1名)
- Since last review on “Collaborative Research Activities of NIFS”, LHD Project produced steady stream of excellent research output through 3 collaboration programs. Especially, LHD Project Collaboration has accommodated increased participation with very fruitful research outcome, that has been feed-back to increase participation on General Collaboration.

The Bilateral Collaboration now seems to serve a platform of sharing of expertise of participating organization to promote exchange of ideas and technology.

- The most attractive feature of the collaboration system adopted in Japan is the direct access to the best hard and soft ware in the world concentrated at NIFS thereby making the cutting edge of fusion research within the reach of many Japanese universities varying in size.

General collaborations include mainly facilities available at NIFS and provide the budget for researches coming to NIFS in order to carry out experiments important for the NIFS research program. LHD project collaborations are focused on LHD experiments thereby safeguarding the excellent use of the unique facility. Bilateral collaborations complement the program by carrying out relevant for NIFS research

on other large facilities located at university research centers. These collaborations are mutually enriching and provide the positive feedback between NIFS and major universities beneficial for both sides.

- With the growing number of collaborators within Japan, LHD is serving as the key experimental device for high temperature plasma physics in Japan and Asia. The number of participants in general collaboration and project collaboration has significantly increased from 2007 to 2011. (It would be nice to know the associated FTE figures.) The bilateral collaboration is still working as a strategic link to strong university activities, both in plasma science and technology.

- LHD is clearly operating as a major collaboration center both for fusion and for the Japanese research system. This was evident throughout the presentations, both in terms of the researchers presenting results, but also in the leadership of the groups. In particular:

- 1/3 – 1/2 of LHD publications in leading journals have non-NIFS first authors
- One of the co-leaders for each Experiment Theme Group is a university collaborator
- There were more than 600 collaborators in 2011 through the “General Collaborations” and “LHD Project Collaborations”. This has increased ~20% since 2007. The contributions of the collaborators appear to be broadly distributed across all the research topics

There is a strong outgoing collaboration program, with NIFS scientists participating in University research sites more than 200 man-days/year.

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

- 高温プラズマを地上で実現し、天体分野の研究者との研究交流を図るなど、学術研究の進展に寄与しており、極めて高く評価する。(4名)
- LHD プラズマの広いパラメータ範囲を利用した原子・分子過程の研究によって、原子物理学、天体物理学、光源開発等の他研究分野における基礎研究との連携が推進されていることは高く評価する。(4名)
- 太陽コロナの加熱機構の解明を目的とした LHD と太陽観測衛星「ひので」による非平衡プラズマの研究、実験室プラズマの自発回転と太陽の差動回転との共通の物理を探る研究など、「乱流」や「回転」の基本的物理の理解を深める幅広い学際的展開に寄与し

ていると判断される。(4名)

- 回転磁化プラズマにおける乱流場と流れ場の相互作用に関して、国立天文台との連携研究が進行していることは評価する。(2名)
- 原子分子過程における研究においては、リソグラフィ光源など工業応用分野、天文学分野との連携がはかられており評価する。(2名)
- 他分野の研究者との連携による成果が見えつつあるものの、連携している分野は限定的であり、さらに広い学術分野との学際的な連携研究を期待する。幅広い学際的展開に大きく貢献するためには、一層の努力が必要である。(2名)
- 原子物理学、天体物理学、光源開発の基礎分野を始め、所外提案による共同研究課題が主体となりつつある。特に太陽物理学の分野では、紫外線・X線輝線による精密なプラズマ分光診断を基礎にして、磁気再結合や差動回転といった実験室プラズマと天体プラズマの物理の多くの分野で相乗効果を挙げつつある。(1名)
- 高温プラズマを地上で実現し、天体分野の研究者との研究交流を図るなど、学術研究の進展に寄与しているという、核融合開発研究のこのような側面を社会と研究者に広く発信し、“加速器のみが人類の知の好奇心”をみたすもので無い点を強調すべきである。加速器は、物質とは宇宙の始まりとは、という“知”にのみ挑戦するが、高温プラズマの“広範囲な活用”はプラズマの地上での精緻な模擬実験によって能動的に支えられている。今後ともこうした分野研究者に“能動的研究”の重要性を認識させるべきである。そのためには直接核融合に結びつかなくても、高温プラズマの活用という観点での共同研究の構築が必要である。(1名)
- 核融合研究を今後も継続するためには、物理・工学両面での他分野との連携推進は不可欠である。例えば、核融合分野で開発された優れたプラズマ生成・計測技術、分子動力学計算によるプラズマ・材料相互作用解析技術などをベースとしたプラズマプロセスなどの工業応用分野との連携などを積極的に推進する必要がある。(1名)
- 連携している分野は限定的であり、さらに広い学術分野との学際的な連携研究を期待する。例えば、輸送での非線形現象や自発回転の物理などは、核融合プラズマのみならず広く物理一般に共通性があると思われるので、他の学際的分野への学術発信を期待する。(1名)
- 今後さらに情報発信を積極的に行うことで、幅広い分野の研究者に関心を持ってもらい学際的研究の発展に寄与することが求められる。(1名)
- 核融合分野以外の研究者を含めた、より広い分野からの共同研究への参画による学際領域の研究展開という観点からは、LHDプラズマを、より幅広い視点から研究対象・利用対象としてアピールすることも考えてよいのではないか。(1名)
- It needs to be recognized that LHD Project work hard to promote interdisciplinary research cooperation in wide range of research fields including industrial applications to astrophysical plasmas. New initiative has been launched for NAOJ

for astrophysical applications.

- NIFS handles the collaboration system very skillfully offering the flexible scheme able to benefit and reconcile all schools of thought and research on fusion existing in Japan. LHD Project collaborations benefit the access of the community to the most modern device currently operating in Japan. Bilateral collaborations program is relatively new promoting many other research programs with a long history and focusing them on timely and topical issues. General collaborations works well for supporting various research activities. Interdisciplinary development is provided by the NINS infrastructure and can be amplified further.
- There are strong efforts of the LHD team to foster interdisciplinary research. Examples are plasma-astrophysics and spectroscopy, laser plasma physics, and image processing. Attractive opportunities should be taken, but I think that LHD is already doing a very good job.
- LHD results were presented on several topics which directly contribute to non-fusion fields, including:
 - High-Z and rare-earth spectroscopy, checking atomic and molecular physics models. This is providing fundamental atomic physics data, important for a wide range of plasma physics applications beyond fusion, including solar and astrophysics, laboratory plasma sources, and UV light sources for lithography.
 - Gyrotron development, in collaboration with Tsukuba University
Modeling and understanding rotation in turbulent plasmas, relevant for solar and astrophysics.

(3) 大学の研究発展に寄与しているか

Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

- 国内の多くの大学が核融合科学研究所の共同研究の制度を活用して研究と大学院教育を進めており、その寄与は極めて大きい。LHD の共同実験を通じて大学院生や若手の大学研究者の育成にも大いに貢献しており極めて高く評価する。(7名)
- LHD 実験は 14 年間、加熱装置、計測装置等の整備を着実に進め、超伝導装置にもかかわらず、極めて順調な稼働を実現しており、あらためて敬意を表する次第である。大学関係の大型実験装置による共同研究の場を継続的に実現・提供していることは、LHD 実験の現場の保守管理の関係者の努力の賜であり、全国の大学における核融合プラズマ及び核融合装置関連研究は、LHD 共同研究により大きく発展してきた。大学関係の核融合共同研究の大きな成果として、極めて高く評価する。(5名)
- 共同研究のために核融合科学研究所の研究者が大学等に派遣されるようになったことは評価する。核融合科学研究所の高い研究レベルを大学のセンターや講座レベルの研究

に還元する上で大変重要な役割を果たしており、今後もさらに活性化させてゆく必要がある。(4名)

- 共同研究枠での計測機器の貸し出し制度は、高額機器を容易には購入できない大学研究者にとって有用であり、さらに整備をしてほしい。LHD で使用しなくなった機器だけでなく、制度枠予算をさらに増やして共通性の高い計測機器などを新規にそろえるなど、利用しやすいシステムを整えていくことで、関係する大学機関にとって活用する機会も増え、また計測装置を通しての連携展開も図りやすくなる。(4名)
- 核融合科学研究所の LHD に関わる研究は毎年 200 件程度実施されている。また、LHD 関連の協力研究者は約 650 名であり、高く評価される(2名)
- 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究などの多様な共同研究の推進、特別利用共同研究員制度による大学院生の受け入れなど、予算及び人的面より、大学の研究発展に大きく貢献していると評価される。(2名)
- 大学をはじめとする所外共同研究者の出版する論文の比率も増加している。共同研究に留まらず、大学や他機関との積極的な人事交流がなお一層活発になることを期待したい。(1名)
- 大学機関にとって研究所との連携研究活動は、特に大型研究に参画する際には必須であり、核融合科学研究所が積極的に共同研究を推奨している体制は大変有益であり今後も継続して進めてほしい。(1名)
- 今回の震災に当たり早急に対策室を設置し、大学での研究活動の応援体制を整えていただいたことに改めて感謝申し上げたい。(1名)
- エネルギー研究に興味を持ち「核融合」を研究対象として希望する学生が、LHD 実験に参画する機会を与えられ経験をすることは教育的効果も大きく、また有能な若手研究者の育成が期待できる。(1名)
- LHD 研究にとっても次代を担う若手研究者が多く活躍する場を拡げることは必要であり、今後も共同研究を通じて人的交流を活発にさせることを期待する。(1名)
- 双方向研究を推進するセンター組織を有さない大学及び高等専門学校において核融合研究の継続は困難な状況にある。大学共同利用機関としての核融合科学研究所の基盤を確固たるものにするためにも、継続的な大学・高等専門学校への研究活動支援が重要である。具体的には、(1)計測機器等共同利用の更なる拡充、(2)核融合科学研究所の研究者の大学・高等専門学校への派遣による共同研究の推進、(3)特別利用共同研究員制度の受け入れ教員としての助教の採用、(4)外部資金獲得実績となる共同研究予算配分(一部で可)などがあげられる。(1名)
- 本年度新たにスタートしたネットワーク型共同研究は、個々の大学における研究基盤に基づいて大学間の連携研究を活性化させる効果があり、学生に対する教育効果という観点からも大学の研究発展に寄与する可能性が高い。今後の成果が期待される。(1名)

- As the “Inter-university” fusion research facility, LHD Project has contributed enormously by promoting participation of university researchers to LHD experiment and related R&D. Now NIFS is carrying out bidirectional researches by visits by NIFS staffs to universities to broaden collaboration with universities.
- The development of research at universities includes mainly the exploitation of LHD available at NIFS and provide the budget for researches coming to NIFS in order to carry out experiments important for the NIFS research program. Many universities are mostly instrumental in solving specific problems important for the NIFS program. The value of their contributions is born out by the fact that 5 of the theme leaders are from major Japanese universities. Indeed, Kyushu addresses the physics of the compact tokamaks, Osaka - development of the inertial fusion and the effect of magnetic shear on transport, Kyoto - optimization of magnetic configuration and time-resolved measurements of Balmer line, Tohoku University – electrode biasing experiments, Tokai University – close divertor studies and Tsukuba – high power gyrotron development and the study of the electric field potential in open configurations. It has to be kept in mind that the organizational tasks faced by NIFS in exercising the inter-institutional academic exchange program are very difficult due to a very complex problem of fusion research and very large number of participating in the program bodies. Yet, it appears that the problem is solved in the excellent way invoking the transparent and accountable infrastructure..
- From the European perspective, LHD is a paramount example for networking with a strong university system. There is a large number of joint projects with universities, both in science and technology/engineering. An impressive number of graduate students are participating in the LHD program. In this way, LHD is serving extremely well its role as an inter-university research facility.
- There is clearly a very strong collaboration with University research, including opportunities for development of University staff members
 - Many of the research results presented have lead-researchers from Universities
 - One of the co-leaders for each Experiment Theme Group is a university collaborator

NIFS scientists participated at University research sites more than 200 man-days/year.

[4] 国際連携・共同研究の推進

Promotion of international cooperation and collaboration

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をして

いるか

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

- 炉心プラズマ物理である Edge Localized Mode (ELM) や Resonant Magnetic Perturbation (RMP) に関して、米国の研究所 (プリンストン大学プラズマ物理研究所 PPPL、ジェネラルアトミック社の DIII-D 装置グループ、オークリッジ研究所) や日本原子力研究開発機構との共同研究を開始している。PPPL とは高性能計測器の導入、ダイバータ板の熱流束や粒子束の正確な測定をドイツマックスプランク研究所と、エルゴディック層に関してドイツユーリッヒ研究所 TEXTOR グループと共同研究を行うなど、国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として成果をあげており、高く評価する。(10名)
- 核融合科学研究所は日米、日欧、日中、日韓などの国際共同研究の活動拠点としての役割を十分に果たしており、現在締結されている多数の協定はその具体的な成果の現れであると評価する。これらの協定の実施にあたっては、各大学の研究者との連携をとりつつ活動が進められており、LHD はその中心としての役割を十分に果たし成果をあげていると評価する。具体的にも、海外からの LHD 実験の参加者は 2007 年の約 20 名から 2011 年の 70 名余りと大きく増加しており、LHD 実験が評価を得ていることが理解できる。(7名)
- 核融合科学研究所の共同研究では、外国人も研究代表者になることができ、国際共同研究が益々発展するとみなせる。英語のフォーマットを用意するなど、海外との共同研究に対して細心の準備と努力をしており、この点も高く評価する。(2名)
- 多くの外国人が訪れ、また研究所からも各国の実験に参画していることは評価する。今後も核融合界の国際的 COE としての役割を果たしてゆくことを大いに期待する。(2名)
- 2次元装置における3次元効果の研究の重要性を発信し、DIII-D などと国際共同研究として展開しており、評価する。(1名)
- ELM 制御の国際共同研究に見られるように、先駆的な研究プラットフォームとして世界から注目され、また、LHD 実験への海外の研究者の参加が年々増加していることから、LHD が世界的な活動の中心拠点として貢献をしている。(1名)
- ITER の実験に向けて、数 keV のプラズマを対象としたトーラスプラズマ物理の理解、斬新な計測機器の開発、さらには加熱機器の試験などのプラットフォームとして、LHD

は世界的にも期待されている。(1名)

- 外国研究機関から実験提案できるシステムは、LHD が国際的な活動拠点としての機能を更に充実させるものであると評価する。(1名)
- NIFS has promoted strong international collaboration with many fusion research institutions world-wide. Now LHD Project has dramatic increase of “foreign researchers” participating in LHD experiment. Also, LHD has increased collaboration effort to participate in research at “foreign devices”.
- Fruitful and important international activities within the framework of comprehensive agreements are carried out with USA, China, Korea and the EU (also within the framework of IEA), Russian Federation and Ukraine. All of them are focused at their specific tasks and missions emphasizing and complementing the very well defined major lines of the LHD research. NIFS also helps Max-Planck Institut (MPI) fuer Plasmaphysik in Germany to accelerate the Wendelstein 7X (W7X) program. Lively academic exchange program exists between NIFS and Australia resulting in joint publications and workshops. International Joint Research Base Network aimed at advanced characterization of turbulent regimes in experiments and simulations on fusion and space plasmas is an important part of the broader NINS activity.
- LHD has more recently made a bold move to extend the collaboration with the US in the field of experimental physics. As a consequence the number of collaborators from abroad has made a jump. This is very much appreciated and should be further extended, if possible. Also the collaboration with European research institutes has been extended. There are now clear responsibilities and a defined procedure how to submit experiment proposals. LHD is on a very good way towards internationalization, a path that should be further followed in the future. The LHD team should also consider appointing researchers from abroad as theme group leaders. (This requires of course a longer stay at NIFS.)
- LHD is well recognized as a world-center for fusion research. There has been a strong increase in the number of international researchers contributing to the LHD program to more than 70 in 2011. In addition, a number of the collaborations involve joint-experiments with international facilities, including tokamaks. This is reflection of the strong capabilities of the LHD diagnostics and the facility flexibility. Topics include
 - Joint experiments with tokamaks on RMP stabilization of ELMs, role of magnetic stochasticization
 - Comparisons on effect of divertor stochasticity with TEXTOR and DIII-D

- Collaborations with KSTAR on energetic ion GAMs

Development of diagnostics and validation of numerical models developed internationally.

(2) ITER 計画・幅広いアプローチ (BA) 活動との連携、貢献を図っているか

Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

- 国際トカマク物理活動 (ITPA) に 50 名中 13 名の委員を出しており、特に 3 次元効果の物理面からの貢献に特徴がある。参加する研究者が増加することを期待すると共に、ITPA 活動に参加する核融合科学研究所からの研究者数が維持されていることは高く評価する。(9名)
- いくつかのトピカルグループにおける積極的な活動の中で、LHD の成果を反映した「3次元磁場構造」に関わる貢献は高く評価する。(4名)
- JT-60SA リサーチプラン検討体制にも国内検討代表者として LHD 実験担当の 3 名が選出されているなど、貢献している。JT-60SA 実験がスタートした後は、キーパーソンを中心に、研究において主導的な役割を果たすことが期待される。(7名)
- ITER 計画における加熱機器、低温冷却系等の装置技術やデータ収集システムへの貢献など、ハードを中心として ITER への貢献が増えてきたことは高く評価する。(4名)
- JT-60SA 研究計画へは、大学研究機関が一体となって推進する体制づくりが行われており、LHD からも物理的・工学的な貢献がなされている。JT-60SA の超伝導コイルの核融合科学研究所における性能確認試験への貢献は評価する。(4名)
- 現状の制度下で ITER 計画・BA 活動との連携は限られているが、最大限努力していることに敬意を表したい。この点から、極めて高く評価する。(1名)
- ITPA 活動を通しての磁場配位の 3 次元効果、高エネルギー粒子による不安定性励起、プラズマ壁相互作用等への貢献は高く評価する。(1名)
- 輸送係数の対称成分、非対称成分などの定量化に今後も精力的に研究を進めることが、LHD の世界における優位性をさらに高める。局所理論である非軸対称系の新古典理論、非局所輸送効果 (これは定常的に存在するのか、それともある摂動的な現象発現時のみかなど) の定量化と区別化のなかで、新しい輸送低減の方策を提案していくことを大いに期待する。前述したようにこの分野では定常運転に関する貢献が期待されているし、指導性を発揮できる。(1名)
- ITER の実験開始 (2019 年) を目指して、LHD での経験を生かし、共同研究を実施している。(1名)
- ITER への直接の日本側窓口が日本原子力研究開発機構となっていることもあり、直接的関与を行う状況ではないが、加熱や超伝導技術など個別の装置技術において国際協力を行っている点は評価する。(1名)
- JT-60SA が稼働するまで LHD は国内唯一の大型装置であり、その実験データは ITPA や

JT-60SA のリサーチプラン策定に充分活用されるように活動を継続する必要がある。

(1名)

- ITPA への貢献、幅広いアプローチプロジェクトの International Fusion Energy Research Center (IFERC)活動やサテライトトカマク活動への貢献を、高く評価したい。
(1名)
- ITER 計画・BA 活動は、全日本的に取り組むべきものであり、今後とも、LHD の重要な使命の一つとして取り組んでいただきたい。(1名)
- ITER 計画・BA 活動との連携は重水素実験を視野に入れた LHD 計画にも有用であり、今後も進めていくことを期待する。(1名)
- LHD から次の原型炉を目指す上では、ITER 計画・BA 活動により、一層貢献することが重要と思われる。(1名)
- ヘリカル装置はヘリカルで独自に開発する項目、研究する項目も多く、それ自体を発展させるためには多くの努力を必要とする。従ってヘリカル装置の中から自然に得られる知識や概念をもって ITER への貢献と考えることも重要だと考えられる。その方がむしろ ITER に対する大きな貢献につながる可能性は大きい。特にディスラプションのないヘリカル装置の核融合研究に対する貢献は ITER に直接貢献するよりも大きいと思われる。(1名)
- NIFS tried hard to participate and contribute in ITPA physics activities for ITER project, and also made formal bilateral cooperation agreement with ITER organization. Also LHD staffs participate and contribute in BA on JT-60SA physics as well as engineering works. (Other BA-related works of NIFS is represented in “Rokkasho Research Center”.)

Stronger and wider participation to scientific as well as technical activities of ITER project needs to be encouraged by LHD staffs and university researchers.

- In general, the interest of tokamak research in the 3D effects has been significantly amplified in recent years due to novel schemes of the ELM's control relying upon so called Resonant Magnetic Perturbations. Recently, NIFS has signed the technical collaboration agreement with ITER IO. Now the characterization of ICH oscillation tube for ITER is investigated by using the facility in LHD. The code developed for cryogenic system in LHD is used for the real-time simulation of the cryogenic plant process for ITER. The conceptual design of data acquisition system for ITER is supported by the fast data acquisition system developed for steady state operation of LHD. Yet, the cooperation must be further enhanced by contributing to topical for ITER physics and technology issues. These include the use of Tungsten in helical closed divertor experiments, modulation ICH experiments and intrinsic toroidal core rotation studies. LHD is particular well equipped for these purposes because of a

wide range of unique diagnostics and large heating power available at LHD. Long pulses capability is another very attractive feature of LHD for ITER/BA operation in future. However, deuterium runs are long overdue and cannot be delayed any further in view of their importance for ITER/BA.

- The LHD team is doing his best to support ITER and the BA. It should be kept in mind, that running a machine and conducting a comprehensive experimental program binds most of the resources, such that contributions requiring a lot of man power and other resources cannot be made.
- The LHD team is making good contributions to the ITER and EU-JP BA programs. There are about 20 LHD researchers participating in the ITPA meetings. LHD is making contributions to a number of ITPA databases, to help produce a comprehensive understanding of the toroidal plasma confinement. LHD members are also contributing to the JT-60SA research plan and reviewing the program. The LHD team is also contributing to the technological developments for ITER and JT-60SA in a number of areas including cryogenics, ICRF sources, data acquisition, and superconductors.

I suggest that LHD offers the use of their superconductor testing facility to ITER. I have heard that some ITER superconductor developments are limited by the availability to test facilities, due to the 2011 earthquake damage. If the LHD facilities were able to help, this may be an important contribution.

[5] 人材育成

Human resource development

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成に LHD は貢献できているか

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

- LHD 計画に係わる共同研究者とともに、大学院生の教育、ポスドクの育成、助教クラスの若手人材による LHD 実験のリーダー、サブ・リーダーの養成に積極的に取り組んでおり、核融合研究の人材育成に LHD は大きく貢献しており高く評価する。(5名)
- 国内外の優れた研究者が集結した環境が提供され、国際的な視野を持った人材育成がなされている。若手研究者をリーダーに据えることによって、世界に伍して LHD 研究を推進する戦略的教育がなされている点は高く評価する。(3名)
- LHD 共同研究には毎年大学院生が 150 名程度参加している。LHD 共同研究は、世界的にみて、大学院生をはじめとする若手育成に最も貢献している。この点から極めて高く評価する。(3名)

- 大学院教育を総研大、連携大学院等を通じて実施しており、大型装置に携わる研究テーマでの博士育成に努めている。多くの留学生の教育も実施しており、人材育成に寄与している。(2名)
- 人材育成はLHDの重要な使命であり、十分にその使命を果たしていると評価する。(1名)
- COE 研究員の採用ならびに恒常的な助教の採用を継続していることは高く評価する。(1名)
- 今後さらに優秀な日本人、外国人学生を集め、有能な研究者として育成するプログラムを進展させてほしい。(1名)
- 大学院生・ポスドクに続くキャリアパスの生成がなお一層必要である。(1名)
- 新しい実験遂行システムの中で様々な実験テーマに応じてグループを構成し、そのグループリーダーとして外部の研究者を含め若手を起用し、責任ある立場で活躍する場を提供していることは高く評価する。実験提案やデータの取りまとめ、さらに実験総括を行うことで多くの研究者をまとめていく作業は他では得られない経験となり、有能な若手研究者を育成することにつながる。さらに国際学会等での発表や優秀な論文発表を通じ、発言力のある若手を育成することを今後も引き続き心がけてほしい。(1名)
- 若手研究者をLHDでの研究を通して育成するという面では貢献は大きい。共同研究を軸として大学における博士課程の学生を受け入れる体制(奨学金等の制度を含む)が整備されれば、人材育成におけるLHDの貢献度はさらに大きくなるものと考えられる。(1名)
- ハード開発はこうしたミッション・物理研究課題の推進を支えるものであるが、ややもすれば一時的に陰に隠れがちである。若手を順次ハード開発に従事させることによって、研究を継続的に推進していくことが重要で、そのためにはハード開発に関してもこうした戦力的な若手育成とその意義付けを徹底することが重要である。(1名)
- 若手研究者の海外との交流がやや弱いように感じるので、この点を強化する必要がある。海外にはヘリカル装置が少ないがトカマク装置でも良いから、若手研究者を長期に海外に派遣するのが有効であろう。人材育成に関する核融合科学研究所およびLHDの役割は、ポスドクや助教などの30代から40代前半の若手研究者の育成である。助教レベルの研究者が将来のLHD、核融合科学研究所、さらには核融合界のリーダーとなるような人材育成を期待する。(1名)
- 国際的視野を有するという観点での研究者育成の方策が明確ではない。国際的に活躍できる研究者としての育成のためには、LHDでの研究成果を環状閉じ込め核融合研究全体の中で俯瞰的に捉え、発表できる能力の涵養が重要であり、そのような教育がなされるべきと考える。(1名)
- **Steady involvement of “graduate students” in LHD project above 150 every year, seems very important contribution to cultivation of human resource in longer-term**

fusion research and development. Also selection of young scientists to leads LHD Theme Group would cultivate leaders for future experiment and device.

It would be important to extend activities of new and young scientists to international collaboration further so that they could become leaders of world-wide fusion research program including ITER.

- The important task of training and educating of young Japanese researchers is facilitated by the broad program of courses, lectures and seminars organized by NIFS. It also provides unique possibilities to introduce young people to advanced studies and to avoid typical errors. The training and educating system offers unique opportunities for a future carrier in international fusion research. Yet, it is also important to participate in the international activities aimed at fostering the new generation of fusion researchers. This can be achieved by providing fellowships to young Japanese scientists in order to encourage them to spend part of their education program at international centers connected to NIFS via international comprehensive agreements and academic exchange agreements. This can be done at both master and doctoral level timely facilitating the international experience for a future generation of Japanese fusion researchers.
- The number of graduate students involved in the LHD program is quite high. From the provided information, however, it is not clear to me to what percentage the graduate students actually work on site, investigate dedicated LHD problems or do other (surely meaningful) plasma physics. It is appreciated that relatively young scientists serve as theme group (resp. task force) leaders. It is not so evident for me to what extent NIFS is promoting a dedicated postdoc-program, if possible including longer research stays abroad. This is, in my opinion, an extremely important instrument to develop the global network in fusion sciences. One possibility is an (internal) award for the most skilled graduate students that includes a fellowship for research stays abroad. In any case, a dedicated program for promotion and internationalization of young scientists would be extremely useful.
- I think LHD is doing a good job in training and developing young people. They had more than 180 graduate students involved in LHD experiments in 2011, including ~70 from collaborating institutions. They are encouraging young researchers to serve a Theme Group Leaders. By rotating the Theme Group Leaders, they encourage the development of a broad and global perspective by large number of researcher, as well as giving important leadership experience. At conferences and meetings, I see a large number of young LHD researchers, indicating their strong engagement.

[6] 将来計画

Future plan

今後の10年間程度を見越したLHD計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

- 核融合炉を見通すことができる高性能プラズマを実現するという目標に対して、加熱装置の増強、閉構造ダイバータの設置、重水素実験という施策は、適切であると高く評価する。(5名)
- 適切であると評価する。(3名)
- LHD計画の目的成就を第3期中期計画の終了ごろに見定めているが、重水素実験についての地元の理解を早く得られるよう、取り組みを強化することが期待される。(1名)
- 研究所の組織をプロジェクト化して研究効率がよい体制にした。この体制の下、炉を目指すLHD研究は適切であり、その推進が期待される。この点から、極めて高く評価する。(1名)
- 加熱パワーの増強、ヘリカル閉ダイバータの設置、それらの相乗効果等を狙った実験計画、さらに重水素実験に向けての計測器や建物の改造などの検討、また閉じ込めに対する重水素質量依存性の理論的研究を強力に推進するなど、重水素実験が可能になるような準備を着々と進めていることなど、今後の10年間程度を見越したLHD計画は適切なものとなっているので、極めて高く評価する。さらに炉設計もさらに進展し、デモ炉を見通せる所に近づきつつあるところは極めて高く評価する。(1名)
- ヘリカル型閉じ込め方式の優位性を示すためにも定常運転を指向した長時間運転が可能な改造を進めることも重要。(1名)
- LHD計画の目標達成のためには、精密科学としての評価に耐えうる計測および理論解析モデルの予測性の向上が必要不可欠であり、これらの推進にも期待する。(1名)
- 核融合プラズマ物理の体系化に向けて、計測装置の開発、系統的なデータベースの整備、定量的なモデリングの開発を、一層推進することが望まれる。(1名)
- LHD装置の総合的パラメータを向上させるとともに、現在進めている物理的、工学的視点に立った個別研究テーマを実施し、革新的な研究成果を上げてほしい。(1名)
- 重水素実験を遅滞なく実施することで大型の核融合実験装置としての基盤を確立し、ITERやJT-60SAとの連携を進めることで核燃焼プラズマについての理解を深め、次期装置設計への展望を明確にする必要がある。(1名)
- LHD実験を「社会の中の科学、社会のための科学」として推進し、その取り組みを通じて、エネルギー問題解決への積極的な貢献を実現していかなければならない。(1名)

- 今後のヘリカル炉を展望する場合、（１）高温・低密度運転領域と、（２）低温・高密度運転領域の２つの可能性をよく考慮した上で炉を作るのに最適な計画を常に炉設計グループと実験グループ、理論解析グループがひとつにまとまって議論していく必要があるだろう。特に理論解析グループには今まで得られたデータを基にして炉のパラメータ予測をするという核融合研究にとって非常に重要な役割をもっと積極的に果たすことを期待する。（１名）
- ヘリカル方式による核融合原型炉設計に必要なデータベースの確立と、核融合炉心環状プラズマの総合的理解のための学術基盤の確立という２つの研究課題の設定は、大学共同利用機関の基幹装置としての LHD にふさわしいものと評価する。これまでの成果に基づいて、プラズマ性能のさらなる高度化（各パラメータの最高値の同時達成）に向けた統合的な研究開発戦略の展開が望まれる。（１名）
- LHD 計画は我が国のエネルギー開発における重要かつ唯一の学術研究機関で実施されているプロジェクトである。福島原発の重大事故発生後、我が国だけでなく世界的にエネルギー開発計画の見直しが行われている。その中で自然エネルギーの“即戦力”としての優位性と実現性が着目され、非定常性の“欠陥”をマスクするのに役立っている。こうした非定常性は化学的なエネルギーへの変換と蓄積が可能であるとの仮定の上で“問題が解決可能であり、定常発電として成立する”との主張により、国民に広く広報されている。しかしながらこれも原子力村の安全神話同様、自然エネルギー活用村の論理であろう。従って、今後核融合がエネルギー開発において重要な位置をしめていくためには、村の論理を幅広く再構築する事が必要である。LHD は学術研究のみに貢献すればよいという考え方は明らかに間違っており、そこに逃げ込むことは我が国のエネルギー開発計画を誤ったものにする。（１名）
- こうした背景の下で、LHD の今後の計画実現に関する地道な努力が地元の“核融合開発の社会的受容性”を高めており、これは敬服するに値する。“核融合村”から総合的な視点を有する真に我が国のエネルギー開発に貢献する機関としての指導性を発揮することが極めて期待されている。エネルギー開発とは何かという理論的な立場でも、実現性の立場においても、また倫理性の観点においてこうした指導性を大いに期待する。（１名）
- 核融合科学研究所としての将来を見据えた場合、プラズマ物理の学術的貢献を目指した将来計画についても議論すべきだと思う。核融合研究開発をより強固にするためにも、裾野の広い核融合炉心プラズマ研究を目指すのが核融合科学研究所の使命であると言える。今後は、このような視点も踏まえて Post-LHD に対する将来計画の議論があつてよいと思う。なおそのような柔軟性のある独創的な将来計画に向けて、若手研究者がその中核となり議論することを期待する。（１名）
- 今後 10 年程度を考えた場合、LHD 実験終了を視野に入れた、若手・中堅研究者を中心に次期 LHD 計画に関する議論を本格化させる必要があると考えられる。（１名）

- LHD 計画の最終目的達成を第3期中期計画の終了頃と位置付けているのは妥当であると考えられるが、その後の方向性については不透明な部分もあり、相当の自助努力が必要である。(1名)
- 今後の LHD 計画というのが必ずしも明確に伝わってこなかった。今後 10 年程度という期間に限定した場合、ITER の運転期における LHD の役割の整理、ITER 時代の日本の核融合研究開発体制全体の中で LHD の位置づけの明確化が必要ではないか。(1名)
- 2014 年度までは加熱の増強をすることが分かるが、その後は何をどのように進めて原型炉設計に必要なデータベースを構築し、新しい段階への判断に決定的役割をはたすのかが記述されていないのではないか。Q=0.3 を達成することが目標であるなら、その目標とそこへ至る過程を記述すべきであると思う。核融合の将来計画の立案は大変難しいものがあって現段階でやむを得ないことは認めた上で、このような評価にさせていただいた。(1名)
- Upgrade plan for LHD Project seems well laid out in heating systems as well as “closed helical divertor”. Preparation of deuterium experiment needs to be reviewed for practical target line.
 Also approached to extend LHD performance and comprehensive physics understanding seems to be well planned utilizing previous mid-term experience and achievement.
 However, the plan for participation of ITER operation and “DEMO Reactor” preparation needs to be further elaborated.
- Major steps are envisaged upgrading the ICH and ECH heating power and enhancing the closed divertor performance by employing the baffle & dome and cryo-pump hardware.
 Reliable extrapolation to a reactor from the present status of the research are to be pursued.
 Being fully aware of political difficulties due to public relations problems the deuterium operation still appears to be a major step forward given the organization of the neutron diagnostics task force in place and the development of neutron diagnostic system in the near future.
- The LHD plan for the period -2014 is ambitious and meaningful. The planned hardware upgrades are very well justified and should be realized. In this way LHD can maintain its role as the leading stellarator device in the world for the next years. As mentioned in the answer to questions [1], the main challenge will be the complete integration of operation scenarios, including the closed helical divertor, under (if possible high-power) steady state conditions. As for reactor studies, I recommend to participate strongly in the international study groups and to contribute with

concepts, operation experience and performance data from LHD. In any case, the stellarator/heliotron option should be kept even for the first demonstration reactor (DEMO), depending on a thorough comparison of advantages and disadvantages of the two major Magnetic-Confinement Fusion (MCF) concepts.

- The planned future LHD program is to continue to increase LHD plasma parameters and the detailed comprehensive understanding of plasma behavior in helical systems. This is of critical importance for the future extrapolation and utilization of helical systems, and probably for the long-term availability of fusion energy. This will require that LHD continue to have a strong upgrade program, providing new capabilities to enable a vital and effective research program. This includes
 - Completion of the closed divertor, including its pump
 - Heating and diagnostics upgrades and improvements
 - The deuterium program
 - Continued development of comprehensive numerical modeling
 - Long-pulse operation at higher power

As a follow on to the planned divertor program, LHD should consider installation of non-carbon divertor and main chamber plasma facing components to prepare for future burning-plasma helical systems. This could involve either solid or liquid metal surfaces.

第3章 評価のまとめと提言

第2章で記載された意見及び外部評価委員会での議論を基に、評価の要点をまとめ、LHD研究の推進に重要ないくつかの提言をする。

(1) 評価のまとめ

[1] 研究成果

Research achievements

制御核融合の実現に向け、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解について、国際的に高い水準の研究成果をあげているか。

Does the LHD project produce high-level achievements in accordance with international standards regarding the systematization of physics and engineering for a helical system and comprehensive understanding of toroidal plasmas directed towards controlled fusion?

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか（上記の留意点1. 参照）

Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system ,at a high level by international standards ? (refer to the note from the last review)

LHD は高性能プラズマの実現に向けて優れた成果をあげており、国際的にも高い水準を達成している。超高密度プラズマ(SDC)の長時間維持、超伝導ヘリカルコイル電源の増強と中性粒子ビーム入射(NBI)の増力による高いイオン温度の達成、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)の増力による高い電子温度の実現などは、核融合炉を見通すうえで重要な成果である。特にベータ値 5.1%、プラズマ密度 $1.2 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ 、イオン温度 7 keV、電子温度 20 keV を達成したことは重要であり、定常実験に向けた取り組みでも抜きん出た成果をあげている。ヘリカル方式による制御核融合の実現に向けて着実な進展が見られ、かつ毎年、数百の学術論文を公表している。これらの成果は、**極めて高く評価**する。

- (2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

輸送や電磁流体力学(MHD)、ダイバータ物理など、3次元磁場をもたらすプラズマ物理はトカマクとの相補性の視点からも重要であり、LHDにおいて環状プラズマの総合的理解を積極的に意識した学術研究が展開されていることは、**極めて高く評価**する。ヘリカルプラズマに本質的な3次元効果は、コアプラズマと境界プラズマの輸送、プラズマ壁相互作用、MHD安定性、ダイバータ工学等の分野でトカマクとの共通性や違いなど、環状プラズマの総合的理解を深化させ、当該分野の研究を大きく進展させた。周辺局在モード(ELM)の物理や、タングステン・プラズマ壁相互作用(PWI)物理、共鳴磁場摂動(RMP)を用いた非接触プラズマによる熱流制御技術、電子バーンシュタイン波(EBW)やイオンサイクロトロン周波数帯波(ICRF)等の波動加熱の物理などもLHDの学術的成果が環状プラズマの総合的理解に大きく貢献している。

[2] 研究体制・環境の整備

Development of research system and environment

上記を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができているか

Does the LHD project develop the required steps to execute the missions described in [1].

- (1) 平成22年度から導入されたLHDプロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

新しいプロジェクト体制によって、テーマグループ体制を機動的かつ柔軟に活用することができ、特に重水素放電に向けた準備研究を順調に進めつつ、実験提案数も平成19年度の220件から平成23年度の267件に増えたことは、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献したと判断され、**高く評価**する。今後もう少し、長期的に判断する必要もあり、次回の外部評価でもこの点の再評価が必要であろう。

- (2) LHDの性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか

Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

LHDの性能を最大限に発揮させるために、特にイオン温度向上のための垂直入射NBI装置の整備やECHの増強・長パルス化、高性能プラズマの長時間維持に不可欠なバップル構

造ダイバータの整備、超伝導コイル用 DC 電源の増強など、必要な機器整備・増強、装置改良が適切に進められてきたと**極めて高く評価**する。定常実験については、フルトーラス閉ダイバータ化改造を早期に完了し、高パワー、高密度、高高速イオン密度条件下での研究を戦略的に進める必要がある。

- (3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

トムソン散乱システムの改良による電子温度データの質の改善、重イオンビームプローブの開発、運動シュタルク効果による磁場の回転変換の測定、高エネルギー粒子計測法の整備、データ収集系の改善などが進展し、精度の高い計測結果が提供されるとともに、質的に優れたデータと理論・解析モデルの拡充とが車の両輪として効果的に機能し、優れた成果を達成していると**高く評価**する。

[3] 共同利用・共同研究の推進
Promotion of Collaboration

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

- (1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究は、大学との様々な形態の共同研究に対応できるよう整備された共同研究システムであり、大学との連携による研究開発が LHD 実験に反映されているだけでなく、独創的な成果も生み出しつつある。この3つの共同研究は核融合コミュニティにとって大変有意義な制度であり、大学の附置センターから講座レベルの研究まで、幅広い柔軟な共同研究が可能であり、**極めて高く評価**する。

- (2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

太陽コロナの加熱機構の解明を目的とした LHD と太陽観測衛星「ひので」による非平衡プラズマの研究、実験室プラズマの自発回転と太陽の差動回転との共通の物理を探る研究、LHD プラズマの広いパラメータ範囲を利用した原子・分子過程の研究などによって、原子物理学、天体物理学、光源開発等の他研究分野における基礎研究との連携が推進されていることは**高く評価**する。

核融合分野以外の研究者を含めた、より広い分野からの共同研究への参画による学際領域の研究展開に向けて、LHD プラズマおよび関連技術を、幅広い視点から研究対象・利用対象としてアピールすることが望まれる。

- (3) 大学の研究発展に寄与しているか

Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

国内の多くの大学が核融合科学研究所の共同研究の制度を活用して、高度な学術研究と専門性の高い大学院教育を進めており、その寄与は極めて大きい。LHD の共同実験を通じて大学院生や若手の大学研究者の育成にも大いに貢献している。特に大学の研究者に対して、大型実験装置による共同研究の場を継続的に実現・提供していることは、LHD 実験の現場の保守管理の関係者の努力の賜であり、大学関係の核融合共同研究の大きな成果として、**極めて高く評価**する。

核融合科学研究所の研究者の大学等への派遣、共同研究枠での計測機器の貸し出し制度は、核融合科学研究所の高い研究レベルを大学のセンターや講座レベルの研究に還元する上で大変重要な役割を果たしており、今後もさらに活性化させてゆく必要がある。

[4] 国際連携・共同研究の推進

Promotion of international cooperation and collaboration

核融合科学研究所の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

- (1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

多くの国際的な包括協定や機関間の学術交流協定を積極的に推進し、国際共同研究の活動拠点としての役割を十分に果たしており、**高く評価**する。

特に最近、多数の外国人研究者の受け入れや、外国の高性能な計測機器の導入を図っており、今後のさらなる発展が期待される。また核融合科学研究所の共同研究では、外国人も研究代表者になることができ、国際共同研究が益々発展することが予想され、今後も核融合界の国際的 Center of Excellence (COE)としての役割を果たしてゆくことが期待される。

(2) ITER 計画・幅広いアプローチ (BA) 活動との連携、貢献を図っているか

Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

ITER 計画では国際トカマク物理活動 (ITPA)への積極的な参加、ITER の加熱機器や低温冷却系等の装置技術への貢献など、BA 活動では JT-60SA リサーチプランへの貢献や JT-60SA 用超伝導コイルの性能確認試験など、幅広い分野での連携や貢献を図っており、**高く評価**する。

JT-60SA が稼働するまで LHD は国内唯一の大型装置であり、その実験データは ITPA や JT-60SA のリサーチプラン策定に充分活用されるように活動を継続する必要がある。また ITER 計画・BA 活動との連携は重水素実験を視野に入れた LHD 計画にも有用であり、今後も進めていくことを期待する。一方、ヘリカル独自の研究開発から派生する成果からの ITER への貢献を図ることも重要だと考えられる。

[5] 人材育成

Human resource development

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成に LHD は貢献できているか

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

大学等の大学院生の教育、ポスドクの育成、助教クラスの若手人材による LHD 実験のリーダー、サブ・リーダーの養成に積極的に取り組んでおり、核融合研究の人材育成に LHD は大きく貢献している。特に若手研究者をリーダーに据えることによって、世界に伍して LHD 研究を推進する戦略的教育がなされている点は**高く評価**する。

今後も優秀な日本人、外国人学生を集め、有能な研究者として育成するプログラムを発展させ、国際的に活躍できる研究者の育成が望まれる。

[6] 将来計画

Future plan

今後の10年間程度を見越した LHD 計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

核融合炉を見通すことができる高性能プラズマを実現するという目標に対して、LHD 計画の目的成就を第3期中期計画の終了ごろに見定め、加熱装置の増強、閉構造ダイバータの設置、重水素実験という施策は適切であると**高く評価**する。特に重水素実験についての地元の理解を早く得られるよう、取り組みを強化することが期待される。

ITER の運転期における LHD の役割、ITER 時代の日本の核融合研究開発体制全体の中で LHD の位置づけを明確にする必要がある。核融合科学研究所としての将来を見据えた場合、プラズマ物理および核融合工学の学術的貢献を目指した将来計画についても議論すべきだと思う。さらに、若手・中堅研究者を中心とした次期 LHD 計画に関する議論を本格化させる必要があると考えられる。

(2) 提言

最後に、今後の LHD に関する提言をまとめた。

- (1) 共同利用・共同研究の中核装置として、核融合研究開発の世界的な大型実験プラットフォームとしての役割を今後も担って頂きたい。
- (2) 閉構造ダイバータ化を完了し、早期に重水素実験を実施して、LHD の最高性能化に向けた研究の加速を期待する。
- (3) 今後とも LHD の活動の一環として、ITER 計画・BA 活動に対しても取り組んで頂きたい。
- (4) 今後の世界の核融合研究を先導し、国際的に活躍する人材の育成を期待する。
- (5) 重水素実験の終了後を見据えた将来計画に対する議論を進めて頂きたい。

なお、核融合科学研究所には、核融合コミュニティの中核機関として、核融合エネルギーに対する社会の理解と支援を得るための、一層の努力を期待する。

第4章 おわりに

大型ヘリカル装置（LHD）は、これまで14年間、ヘリカル型核融合装置としてプラズマ性能を格段に向上させるとともに、大学の核融合研究を推進するため、活発な共同研究を展開してきた。LHDの外部評価は、第1期中期目標期間の中間にあたる平成19年度に実施され、LHDは全国共同利用研究により飛躍的な成果を挙げているという評価結果であった。また、更なる向上のための提案もなされた。平成22年度からの第2期中期目標において、新たにLHD、シミュレーション、核融合工学の3つの研究プロジェクトが結成され、これらの成果を統合して炉実現に向けた研究計画をスタートさせた。このような背景のもと、再度、LHDの外部評価を実施することになった。

第1回外部評価委員会及び専門部会では、外部評価の進め方について協議し、評価の観点及び具体的な評価項目を決定した。第2回外部評価委員会及び専門部会では、核融合科学研究所の担当者から、評価の観点及び評価項目について説明され、活発な質疑応答が行われた。第3回の専門部会では、外部評価委員から提出された評価結果に関する取り纏め案について審議した。第3回外部評価委員会では、最終報告書を取り纏めた。この最終報告書は、核融合科学研究所運営会議に提出された後、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。

平成19年度に実施された外部評価において幾つかの提言があった。これらの提言を以下に記す。

1. 加熱装置を增強し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか。また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か。
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか。
3. 世界のCOEとして、LHDにおいて独自で新しい研究を進めているか。

今回の外部評価においては、これらの提言を留意するものとした。

今回実施された外部評価の項目と、それらについての評価結果の要点（ゴシック体）を以下に記す。

〔1〕研究成果

制御核融合の実現に向け、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解について、国際的に高い水準の研究成果をあげているか。

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか。

LHDは高性能プラズマの実現に向けて優れた成果をあげており、国際的にも高い水準を達成し

ている。また、ヘリカル方式による制御核融合の実現に向けて着実な進展が見られ、かつ毎年、数百の学術論文を公表しており、極めて高く評価する。

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか。

3次元磁場に起因する輸送、電磁流体力学挙動、ダイバータ物理などの研究の発展は、トカマクとの相補性の視点からも重要である。LHD において環状プラズマの総合的理解を積極的に意識した学術研究が展開され、その成果は環状プラズマの総合的理解に大きく貢献しており、極めて高く評価する。

[2] 研究体制・環境の整備

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができているか。

(1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか。

新プロジェクト体制により、実験テーマグループ体制を機動的かつ柔軟に活用している。実験提案数も平成 19 年度の 220 件から平成 23 年度の 267 件と増えたことは、研究効率の向上と共同研究の機会拡充に貢献しており、高く評価する。この体制については、再度、長期的な観点からレビューする必要がある。

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか（上記の留意点 1. 参照）。

垂直入射中性粒子ビーム加熱装置の整備や電子サイクロトロン加熱の増強・長パルス化、ダイバータ部のバッフル構造ダイバータの整備、超伝導コイル用直流電源の増強など、必要な機器整備が適切に進められてきており、極めて高く評価する。

(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか。

電子温度計測法の向上やデータ解析の改善や種々の新しい計測法を開発し、精度の高い計測を実現し、質的に優れた理論・解析モデルの拡充しており、優れた成果を達成していると判断され、高く評価する。

[3] 共同利用・共同研究の推進

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか。

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか。

これらの共同研究体制は、様々な形態で大学と共同研究できるように整備されている。大学との共同研究は、双方の研究水準を高め、かつ多くの研究成果を挙げている。また、この3つの共同研究システムは核融合コミュニティの発展にとって重要な制度となっており、極めて高く評価する。

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか。

太陽観測衛星「ひので」による非平衡プラズマの研究など、原子物理学、天体物理学、光源開発等の他分野との連携が推進されており、実績が挙げられていることから、高く評価する。

(3) 大学の研究発展に寄与しているか。

多くの大学がこの共同研究を活用して、高度な研究と高い専門教育を進めており、その寄与は極めて大きい。LHD 実験は、若手の育成にも大いに貢献している。特に 14 年間にわたり、大型実験装置として共同研究の場を継続的に提供していることは、大学の核融合研究を大きく推進しており、極めて高く評価する。

[4] 国際連携・共同研究の推進

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか。

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として LHD は成果をあげているか。

多くの国際的な包括協定や機関間の学術交流協定を積極的に推進し、国際共同研究の活動拠点としての役割を十分に果たしており、高く評価する。

(2) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献を図っているか。

ITER 計画では、国際トカマク物理活動 (ITPA) に積極的に参加し、ITER の加熱機器や低温冷却系等の技術向上に貢献している。BA 活動では、核融合材料、中性子源、JT-60SA リサーチプランや超伝導コイル試験など、幅広く連携しており、高く評価する。

[5] 人材育成

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成に LHD は貢献できているか。

LHD では、COE 研究員の育成や助教クラスの若手による LHD 実験リーダーの養成に積極的に取り組んでおり、人材育成に大きく貢献していることから、高く評価する。今後も世界を先導する若手研究者の育成が望まれる。

[6] 将来計画

今後の 10 年間程度を見越した LHD 計画は、第 2 期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか。

核融合炉を見通すことができる高性能プラズマを実現するという目標に対して、目的成就を第 3 期中期計画の終了ごろに見定め、加熱装置の増強、閉構造ダイバータの設置、重水素実験の実施は適切であり、高く評価する。将来を見据えたプラズマ研究や核融合炉工学研究の計画についても議論が求められる。

LHD の成果、研究環境の整備、3 つの共同研究体制と大学の研究発展への貢献について、極めて高い評価結果となった。その他の項目、計測や理論・解析の拡充、他分野との連携、国際連携、人材育成及び将来計画についても、高く評価するとの結果であった。何れの評価項目に関してもかなり高い評価となったのは、LHD 関係者の高い研究・技術レベルと継

継続的な努力によるものといえよう。

今回の外部評価委員会において、更なる向上のために、どうあるべきかについても議論を行い、これらを以下のように提言としてまとめた。今後役に立てて頂きたい。

- (1) 共同利用・共同研究の中核装置として、核融合研究開発の世界的な大型実験プラットフォームとしての役割を今後も担って頂きたい。
- (2) 閉構造ダイバータ化を完了し、早期に重水素実験を実施して、LHD の最高性能化に向けた研究の加速を期待する。
- (3) 今後とも LHD の活動の一環として、ITER 計画・BA 活動に対しても取り組んで頂きたい。
- (4) 今後の世界の核融合研究を先導し、国際的に活躍する人材の育成を期待する。
- (5) 重水素実験の終了後を見据えた将来計画に対する議論を進めて頂きたい。

なお、核融合科学研究所には、核融合コミュニティの中核機関として、核融合エネルギーに対する社会の理解と支援を得るための、一層の努力を期待する。

参考資料

平成23年度 外部評価「大型ヘリカル装置（LHD）計画」の評価結果 . . .	1
評価項目別の平均点数	2
評価項目別の人数分布	3

平成23年度 外部評価「大型ヘリカル装置(LHD)計画」の評価結果

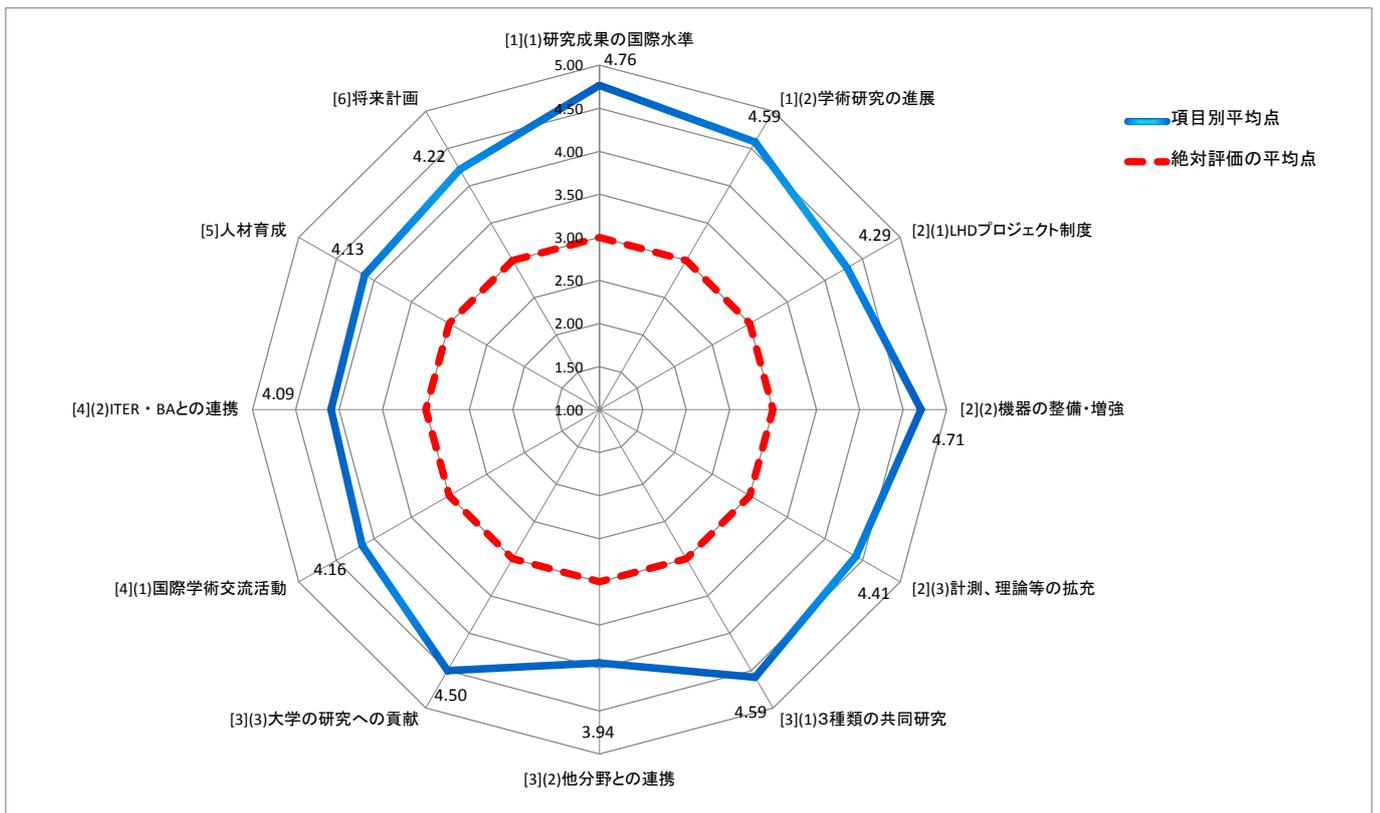
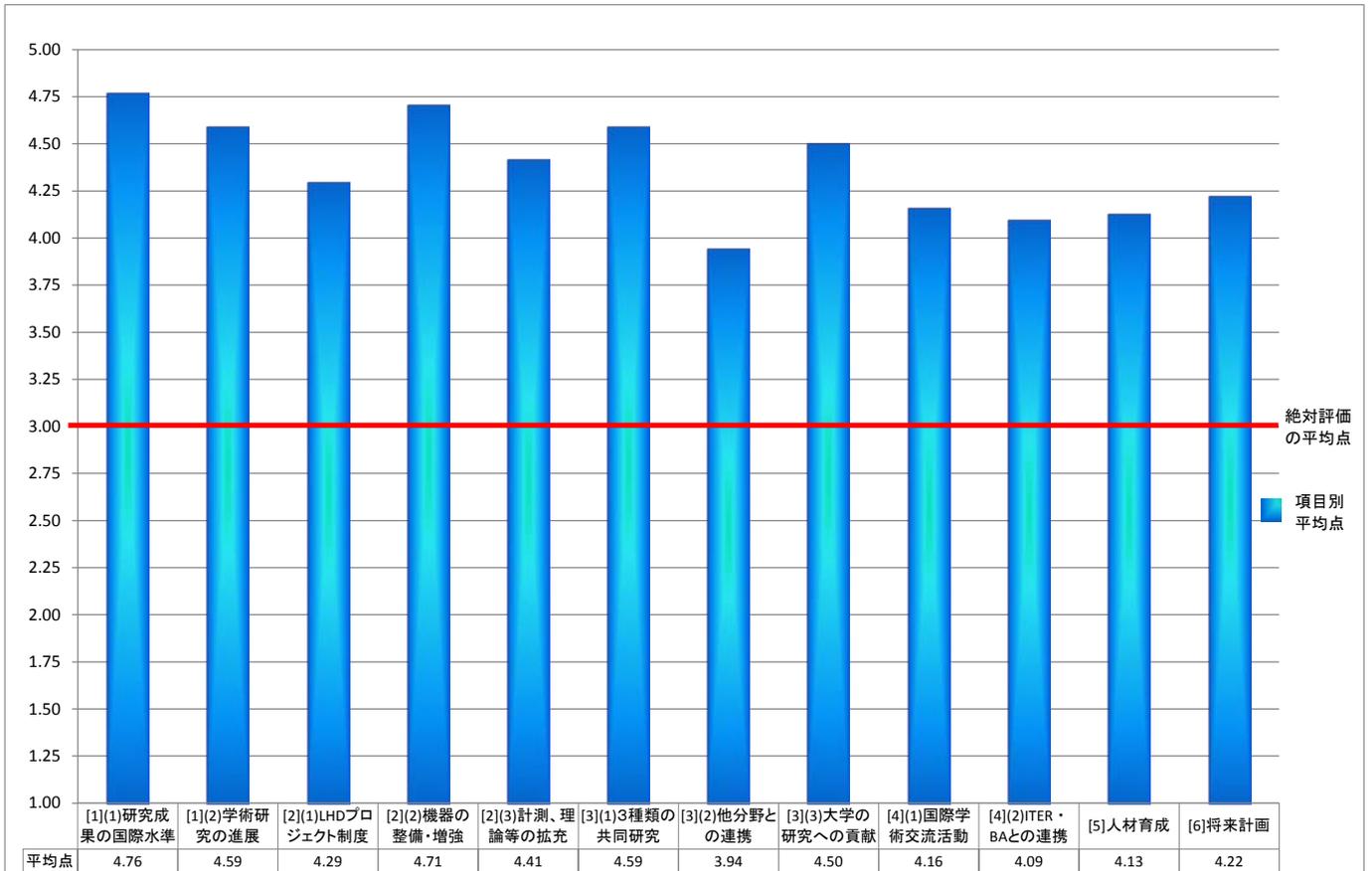
単位:人

項目	1研究成果の国際水準	[1](2)学術研究の進展	[2](1)LHDプロジェクト制度	2機器の整備・増強	[2](3)計測、理論等の拡充	[3](1)3種類の共同研究	[3](2)他分野との連携	3大学の研究への貢献	[4](1)国際学術交流活動	[4](2)ITER・BAとの連携	[5]人材育成	[6]将来計画
秀	13	9	5	12	6	10	4	8	3	2	4	5
優	4	8	11	5	11	7	7	9	13	14	10	9
良	0	0	1	0	0	0	6	0	1	1	3	3
平均点	4.76	4.59	4.29	4.71	4.41	4.59	3.94	4.50	4.16	4.09	4.13	4.22

評価の対応表		
秀	極めて高く評価する	5
優	高く評価する	4
良	評価する	3
可	妥当(適切)である	2
不可	妥当(適切)でない	1

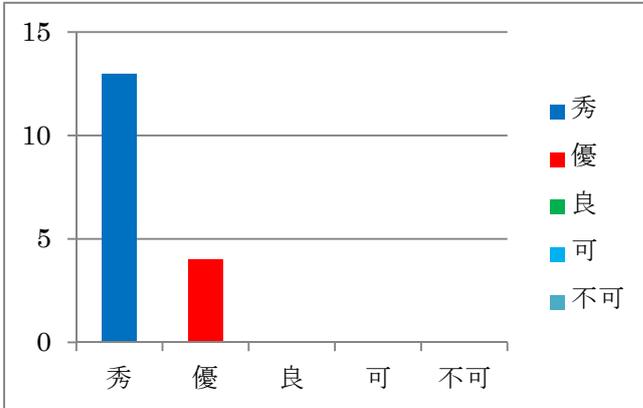
項目	評価の観点
[1]	(研究成果) 制御核融合の実現に向け、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解について、国際的に高い水準の研究成果をあげているか
1	ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか(上記の留意点1. 参照)
[1](2)	環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか
[2]	(研究体制・環境の整備) 上記[1]を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができているか
[2](1)	平成22年度から導入されたLHDプロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか
2	LHDの性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか(上記の留意点1. 参照)
[2](3)	環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか
[3]	(共同利用・共同研究の推進) 核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHDは共同研究を推進しているか
[3](1)	一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか
[3](2)	核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか
3	大学の研究発展に寄与しているか
[4]	(国際連携・共同研究の推進) 核融合科学研究の国際的COEとしての役割を果たす上で、LHDは十分な貢献をしているか
[4](1)	国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHDは成果をあげているか
[4](2)	ITER・BA計画との連携、貢献を図っているか
[5]	(人材育成) 長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成にLHDは貢献できているか
[6]	(将来計画) 今後の10年間程度を見越したLHD計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

評価項目別の平均点数

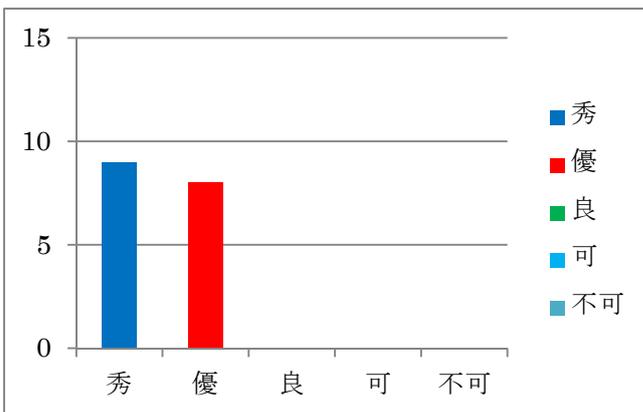


[1] 研究成果

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか

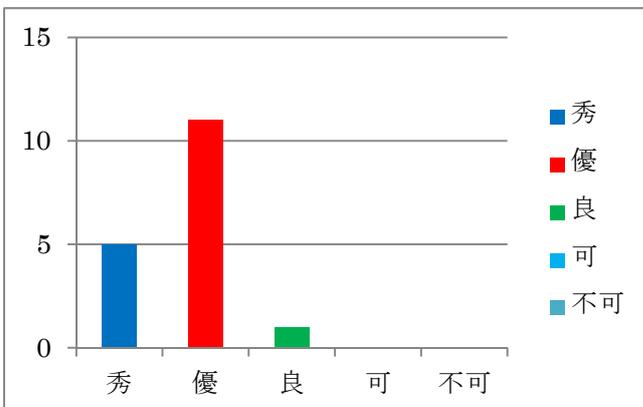


- (2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

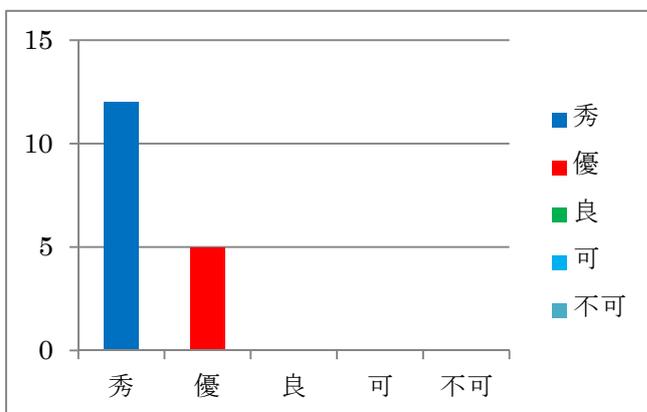


[2] 研究体制・環境の整備

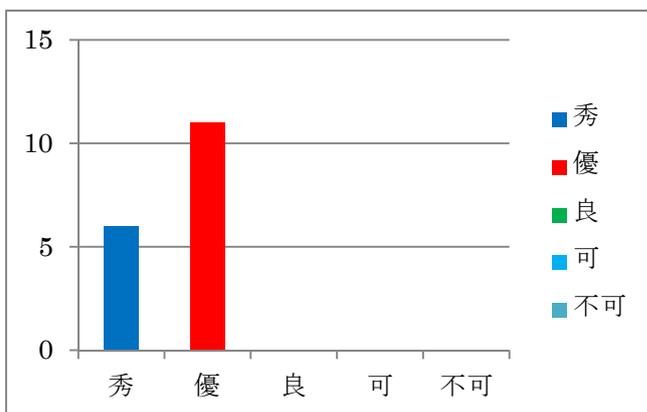
- (1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか



(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか

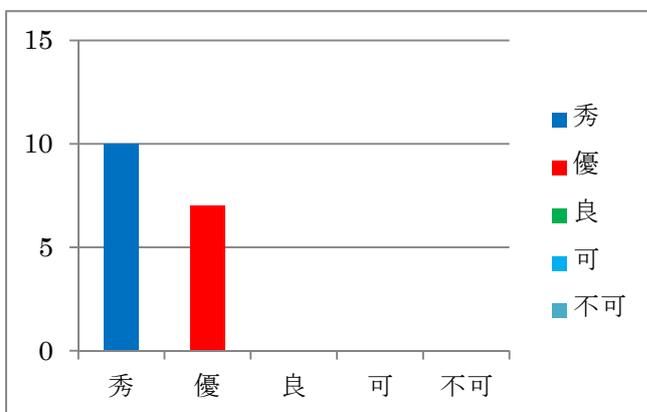


(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

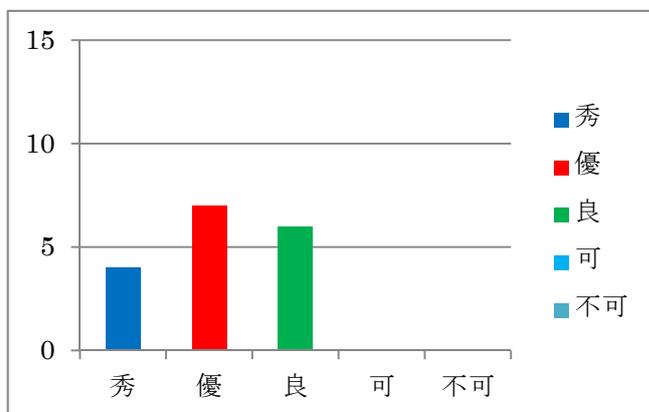


[3] 共同研究・共同利用の推進

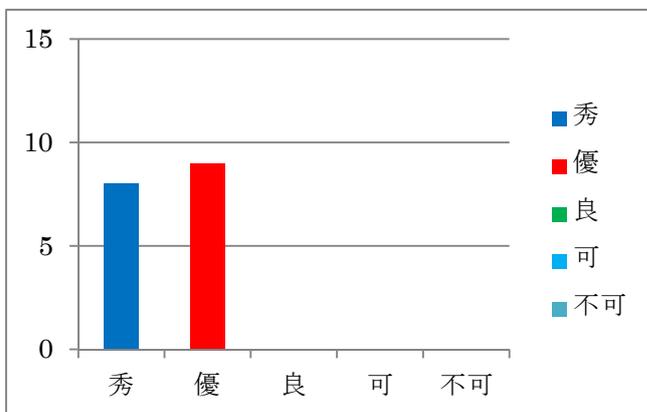
(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか



(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

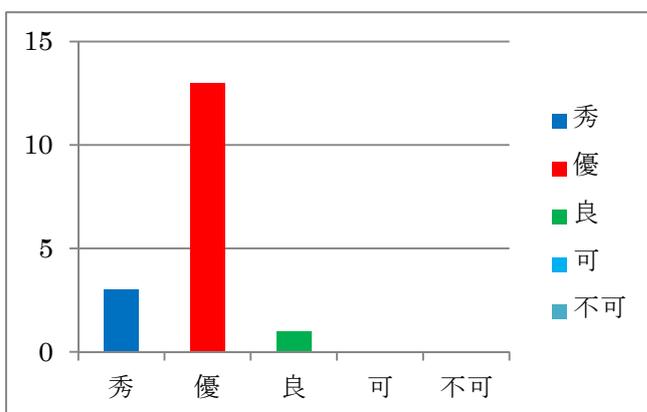


(3) 大学の研究発展に寄与しているか

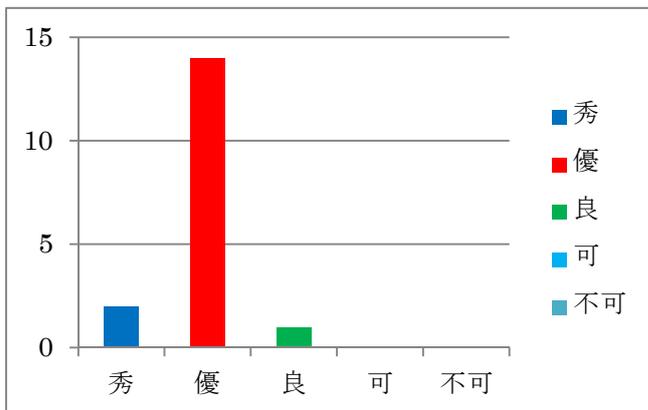


[4] 国際連携・共同研究の推進

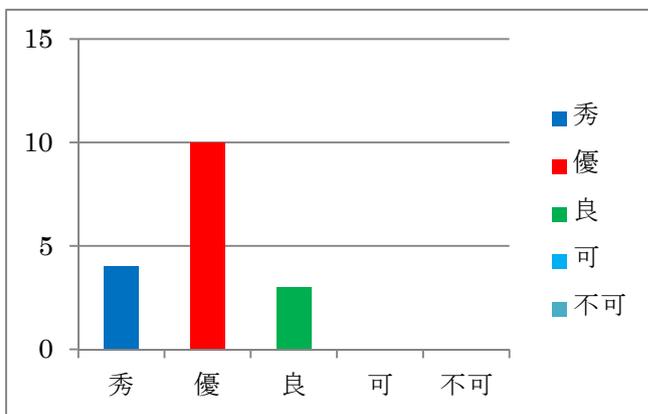
(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか)



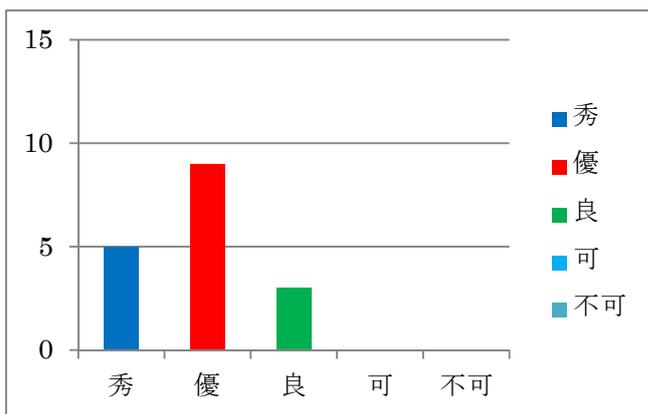
(2) ITER・BA計画との連携、貢献を図っているか



[4]人材育成



[5]将来計画



添付資料

添付資料 1	平成 2 3 年度 外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿	1
添付資料 2	核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則	2
添付資料 3	平成 2 3 年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程	3
添付資料 4	外国人委員評価書	4

平成23年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会委員及び専門部会構成名簿

【大型ヘリカル装置（LHD）計画 専門部会】

[外部評価委員会 委員]

- | | | |
|----|-------|-----------------------------------|
| | 疇地 宏 | 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長 |
| | 安藤 晃 | 東北大学大学院工学研究科教授 |
| | 今井 剛 | 筑波大学プラズマ研究センター長 |
| ○ | 大澤 幸治 | 名古屋大学大学院理学研究科教授 |
| △ | 小川 雄一 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 |
| △ | 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 |
| | 函子 秀樹 | 九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター長 |
| ◎□ | 日野 友明 | 北海道大学大学院工学研究科教授 |
| | 御手洗 修 | 東海大学熊本教養教育センター教授 |

[外部評価委員会 外国人委員]

- | | | |
|--|--------------------|--|
| | Gyung-Su Lee | Research Fellow, National Fusion Research Institute, Republic of Korea |
| | Michael Tendler | Professor, Alfvén Laboratory, Royal Institute of Technology, Sweden |
| | Michael Zarnstorff | Deputy Director for Research, Princeton Plasma Physics Laboratory, USA |
| | Thomas Klinger | Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany |

[外部評価委員会 委員以外（専門委員）]

- | | | |
|--|-------|--------------------------|
| | 牛草 健吉 | 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門副部門長 |
| | 大野 哲靖 | 名古屋大学大学院工学研究科教授 |
| | 福山 淳 | 京都大学大学院工学研究科教授 |
| | 政宗 貞男 | 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科教授 |
| | 渡邊 鉄哉 | 自然科学研究機構国立天文台教授 |

◎委員長、○副委員長、□専門部会長、△専門部会幹事

核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則

制 定 平成16年12月28日 規則第27号
最終改正 平成22年 7月30日

(設置)

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

(組織)

第2条 委員会は、25名以内の委員をもって組織する。

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

(任期)

第3条 前条第2項の委員の任期は、2年とし、再任を妨げない。

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

(委員長)

第4条 委員会に委員長及び副委員長を置く。

2 委員長及び副委員長は、第2条第1項の委員のうちから運営会議で選出する。

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

(意見の聴取)

第5条 委員会は、必要に応じて、次に掲げるものから意見を聴くことができる。

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

(専門部会)

第6条 委員会は、必要に応じて、専門部会を置くことができる。

2 前項の専門部会には、委員以外の者を加えることができる。

(庶務)

第7条 委員会の庶務は、管理部総務企画課において処理する。

(雑則)

第8条 この規則の実施に関し必要な事項は、別に委員会が定める。

附 則

1 この規則は、平成16年12月28日から施行する。

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

附 則

1 この規則は、平成18年9月15日から施行する。

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

附 則

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

附 則

この規則は、平成22年8月1日から施行する。

平成23年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程

○ 第1回委員会及び第1回専門部会

日 時 平成23年10月28日（金）10時00分～11時55分
 場 所 核融合科学研究所管理・福利棟4階第2会議室
 出席者 日野委員長，大澤副委員長，安藤，今井，
 小川，佐野，御手洗の各委員
 牛草，政宗，渡邊の各専門委員



○ 第2回委員会及び第2回専門部会

日 時 平成23年12月10日（土）13時00分～16時40分
 場 所 名古屋ダイヤビルディング2号館4階242会議室
 出席者 日野委員長，大澤副委員長，疇地，安藤 今井，
 小川，佐野，関子，御手洗，Lee, Tandler,
 Zarnstorff, Klinger の各委員
 牛草，大野，福山，政宗，渡邊の各専門委員



○ 第3回専門部会

日 時 平成24年1月23日（月）13時40分～16時35分
 場 所 核融合科学研究所管理・福利棟4階第3会議室
 出席者 日野部会長，小川幹事，佐野幹事，安藤，今井
 の各委員
 牛草，大野，福山，政宗，渡邊の各専門委員



○ 第3回委員会

日 時 平成24年2月21日（火）13時40分～15時00分
 場 所 核融合科学研究所管理・福利棟4階第3会議室
 出席者 日野委員長，大澤副委員長，疇地，安藤，小川，
 佐野，関子，御手洗の各委員
 政宗，渡邊の各専門委員



外国人委員評価書

Review reports by foreign geer members

Review on the LHD project

Reviewer: Gyung-Su Lee

Note from the last review in 2007

1. Does the LHD project strive for improvement in plasma performance as scheduled by means of upgrade of heating capability, installation of closed divertor and deuterium experiment? Is the approach towards steady-state experiments in the regime with higher density and high temperature appropriate?
2. Does the LHD project develop collaboration activities to enrich and stimulate the research and educational activities such as human resource development in universities?
3. Does the LHD project conduct new and original research as a global COE?

[1] Research achievements

- (1) Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system, at a high level by international standards? (refer to the note from the last review)

The technological and physics achievements of the 14 years of LHD Project since its start-up in 1998, are very impressive and exceed the international standards in fusion research world-wide. Especially, in the last 4 years of operation after 2007 review, LHD has been extending its operational regimes in confinement, temperature and beta with steady-state and higher performance plasmas targeted for reactor-relevant regime.

Referring to the note from 2007 review, the heating system upgrade, especially radial-NBI systems, is performing well, the closed helical divertor installation and operation is progressing steadily, and shows very promising physics results. The planning and preparation for deuterium operation is also made good progress toward complete implementation of required systems.

(2) Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

With outstanding technological and performance achievements during last 4 years, the LHD Project also made great stride in advancing scientific research with additional width and depth of research themes to understand toroidal plasmas. Especially, the core transport study with 3D effect and fluctuation-driven physics produced very high quality results that elucidate linkage of physical mechanism to determine transport in toroidal plasmas. It is also worthwhile to note that the control of ELM in MHD area could contribute to resolve the major issue of tokamak operation using inherent 3D physics capability of LHD.

The LHD approach with 6 physics oriented theme groups is showing effectiveness of collaboration of experimentalists and theory/simulation scientific staffs to advance scientific understanding of toroidal plasmas.

[2] Development of research system and environment

Does the LHD project develop required the steps to execute the missions described in 1?

(1) Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

The newly adopted LHD project system has changed “organizational structure” from “line management” to “matrix system” in appearance. With 4 major projects including LHD Project, Numerical Simulation Research Project, Fusion Engineering Research Project, and Coordination Research Project, the Department of Helical Plasma Research is consisted of 7 Research Divisions(plus Rokkasho Research Center for BA related activities). Then, LHD Project has been organized 4 Mission Oriented Theme Groups and 6 Physics Oriented Theme Groups. This new approach has targeted for promoting flexibility by theme group system. The initial outcome of new system looks promising and judged to be effective by significant increase of experimental proposals, and stronger leadership role of TG leaders.

However, the well-known weakness of “matrix system” on engineering baseline management with limited human-resource, needs to be watched out, for technical projects.

(2) Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

High availability record (~ 99%) for the superconducting systems including SC coils, cryogenic system, and power supply, demonstrated LHD Project's capability of maintenance of main device and facility at the highest level. The newly developed and installed "closed helical divertor", "radial NBI heating system" and "HAS ICRF antenna" demonstrated upgrade capability and improvement of main system and heating systems are also in the highest level of competence.

(3) Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

Diagnostic systems of LHD are now in mature stage so that continuous upgrade of existing diagnostics improved data quality significantly. However, diagnostics development toward new concept and deuterium experiment seems to be a bit lagging due to uncertainty of target for deuterium operations. The theory support and data-analysis for LHD experiments achieved its goal in very high level as described in the previous section for LHD scientific research excellence.

[3] Promotion of Collaboration

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

(1) Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

Since last review on "Collaborative Research Activities of NIFS", LHD Project produced steady stream of excellent research output through 3 collaboration programs. Especially, LHD Project Collaboration has accommodated increased participation with very fruitful research outcome, that has been feed-back to increase participation on General Collaboration.

The Bilateral Collaboration now seems to serve a platform of sharing of expertise of participating organization to promote exchange of ideas and technology.

(2) Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

It needs to be recognized that LHD Project work hard to promote interdisciplinary research cooperation in wide range of research fields including industrial applications to astrophysical plasmas. New initiative has been launched for NAOJ for astrophysical applications.

(3) Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

As the “Inter-university” fusion research facility, LHD Project has contributed enormously by promoting participation of university researchers to LHD experiment and related R&D. Now NIFS is carrying out bidirectional researches by visits by NIFS staffs to universities to broaden collaboration with universities.

[4] Promotion of international cooperation and collaboration

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

(1) Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

NIFS has promoted strong international collaboration with many fusion research institutions world-wide. Now LHD Project has dramatic increase of “foreign researchers” participating in LHD experiment. Also, LHD has increased collaboration effort to participate in research at “foreign devices”.

(2) Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

NIFS tried hard to participate and contribute in ITPA physics activities for ITER project, and also made formal bilateral cooperation agreement with ITER organization. Also LHD staffs participate and contribute in BA on JT-60SA physics as well as engineering works. (Other BA-related works of NIFS is represented in “Rokkasho Research Center.”)

Stronger and wider participation to scientific as well as technical activities of ITER project needs to be encouraged by LHD staffs and university researchers.

[5] Human resource development

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

Steady involvement of “graduate students” in LHD project above 150 every year, seems very important contribution to cultivation of human resource in longer-term fusion research and development. Also selection of young scientists to leads LHD Theme Group would cultivate leaders for future experiment and device.

It would be important to extend activities of new and young scientists to international collaboration further so that they could become leaders of world-wide fusion research program including ITER.

[6] Future plan

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

Upgrade plan for LHD Project seems well laid out in heating systems as well as “closed helical divertor”. Preparation of deuterium experiment needs to be reviewed for practical target line.

Also approached to extend LHD performance and comprehensive physics understanding seems to be well planned utilizing previous mid-term experience and achievement.

However, the plan for participation of ITER operation and “DEMO Reactor” preparation needs to be further elaborated.

Review on the LHD project

Reviewer: Michael Tandler

Note from the last review in 2007

1. Does the LHD project strive for improvement in plasma performance as scheduled by means of upgrade of heating capability, installation of closed divertor and deuterium experiment? Is the approach towards steady-state experiments in the regime with higher density and high temperature appropriate?
2. Does the LHD project develop collaboration activities to enrich and stimulate the research and educational activities such as human resource development in universities?
3. Does the LHD project conduct new and original research as a global COE?

[1] Research achievements

- (1) Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system, at a high level by international standards? (refer to the note from the last review)

Assessing the achievements of LHD during 2011 one must bear in mind that Japan has experienced the disaster unprecedented in human history in terms of all aspects of life. Yet, NIFS remains the forefront leader of the world fusion research. Achievements are very ambitious and address an extremely broad range of issues confirming the high reputation of NIFS. They comprise the realization of a high fusion triple product, demonstration of a stable long pulse operation, achievement of very high plasma parameters values , the control of plasma-wall interactions by means of closed helical divertor with the baffle-structure and employing advanced materials for studies relevant for a fusion reactor. Indeed, the progress in 14 years of operation is impressive last year being no exception. Specifically, the super density core regime offers a path to a reactor based on the stellarator concept. Impurity hole discovery accompanied by increased poloidal rotation benefits the super density core

regime of operation in LHD. Heating capacity has been significantly enhanced providing for reactor relevant modes of operation. Machine capabilities are envisaged to reach its maximum capacity in a few years time employing an upgrade of the heating power, closed helical divertor and a long overdue deuterium running experiments.

(2) Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

Research results are at the cutting edge of the international fusion research. It is confirmed by the attainment of ion and electron temperatures relevant to a fusion reactor, the world record of steady state beta value and long pulse operation of 1 hour at almost 3 MW of auxiliary heating. The discovery of the Internal Diffusion Barrier resulting in the super dense core regime of operation opens a new route to the reactor operation of advanced stellarators complementary to scenaria to be realized on JT -60 SA and ITER.

[2] Development of research system and environment

Does the LHD project develop required the steps to execute the missions described in 1?

(1) Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

The Project system is very well defined and highly consistent with the important goal of achieving the fusion energy. It is transparent and very efficient in exercising both domestic activities and the very broad range of international interactions.

The special attention is paid to the safety and the robustness of operations following exactly the chosen timescale and the scope of highlights of the research program. Indeed, high availabilities of the superconducting system have contributed to highly efficient LHD plasma experiments. Further increase of the NBI heating power to 28 MW enabled to obtain high Ti regime (7 keV) thereby amplifying the reactor relevance of LHD results. The progress in ECRH capability holds the promise of the reactor relevant long pulse operation.

(2) Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

LHD project development is very sensitive to excellence in the maintenance, upgrade and technological improvements of the main device and heating systems. To this end, major changes of Cryogenic systems, upgrade of DC power supplies for LHD superconducting coils and motor-driven switch gears will be implemented in the near future. Closed helical divertor has been designed and tested in order to enhance the LHD performance. Improvements in fueling and heating systems are addressed in a rigorous manner. Design studies of the negative-NBI and positive Deuterium ion source are underway.

These technological developments are bound to deliver further improvements of the LHD performance.

(3) Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

Novel diagnostics such as Heavy Ion Beam Probe unique for LHD, Microwave Doppler reflectometry, H/He ratio measurement system and 2 Beam Emission spectroscopy enhance significantly the knowledge and the understanding of the LHD plasmas. Among theoretical achievements one should mention the MHD analysis of short wave ballooning modes and pellet plasmoid injection in LHD, three dimensional simulation of the collisionless driven reconnection in LHD plasmas, anomalous decay of cyclotron motion in a waveguide. Furthermore, 3 D Monte Carlo code is being developed for reentering energetic particles to be included in it. 3D MHD equilibrium reconstruction is developing in order to benchmark the HINT 2 code which played the crucial role for many years of LHD operation. . Simulation science center has also achieved good results implementing TASK3D transport code. The capability of the center is enhanced by upgrading the capacity of the new computer operating in Japan at present.

[3] Promotion of Collaboration

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

(1) Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

The most attractive feature of the collaboration system adopted in Japan is the direct access to the best hard and soft ware in the world concentrated at NIFS thereby making the cutting edge of fusion research within the reach of many Japanese universities varying in size.

General collaborations include mainly facilities available at NIFS and provide the budget for researches coming to NIFS in order to carry out experiments important for the NIFS research program. LHD project collaborations are focused on LHD experiments thereby safeguarding the excellent use of the unique facility. Bilateral collaborations complement the program by carrying out relevant for NIFS research on other large facilities located at university research centers. These collaborations are mutually enriching and provide the positive feedback between NIFS and major universities beneficial for both sides.

(2) Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

NIFS handles the collaboration system very skillfully offering the flexible scheme able to benefit and reconcile all schools of thought and research on fusion existing in Japan. LHD Project collaborations benefit the access of the community to the most modern device currently operating in Japan. Bilateral collaborations program is relatively new promoting many other research programs with a long history and focusing them on timely and topical issues. General collaborations works well for supporting various research activities. Interdisciplinary development is provided by the NINS infrastructure and can be amplified further.

(3) Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

The development of research at universities includes mainly the exploitation of LHD available at NIFS and provide the budget for researches coming to NIFS in order to carry out experiments important for the NIFS research program. Many universities are mostly instrumental in solving specific problems important for the NIFS program. The value of their contributions is born out by the fact that 5

of the theme leaders are from major Japanese universities. Indeed, Kyushu addresses the physics of the compact tokamaks , Osaka - development of the inertial fusion and the effect of magnetic shear on transport, Kyoto - optimization of magnetic configuration and time-resolved measurements of Balmer – α line, Tohoku University – electrode biasing experiments, Tokai University – close divertor studies and Tsukuba – high power gyrotron development and the study of the electric field potential in open configurations. It has to be kept in mind that the organizational tasks faced by NIFS in exercising the inter-institutional academic exchange program are very difficult due to a very complex problem of fusion research and very large number of participating in the program bodies. Yet, it appears that the problem is solved in the excellent way invoking the transparent and accountable infrastructure.

[4] Promotion of international cooperation and collaboration

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

(1) Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

Fruitful and important international activities within the framework of comprehensive agreements are carried out with USA, China, Korea and the EU (also within the framework of IEA), Russian Federation and Ukraine. All of them are focused at their specific tasks and missions emphasizing and complementing the very well defined major lines of the LHD research. NIFS also helps MPI fuer Plasmaphysik in Germany to accelerate the W 7 X program. Lively academic exchange program exists between NIFS and Australia resulting in joint publications and workshops. International Joint Research Base Network aimed at advanced characterization of turbulent regimes in experiments and simulations on fusion and space plasmas is an important part of the broader NINS activity.

(2) Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

In general, the interest of tokamak research in the 3D effects has been significantly amplified in recent years due to novel schemes of the ELM's control relying upon so called Resonant Magnetic Perturbations. Recently, NIFS has signed the technical collaboration agreement with ITER IO. Now the characterization of ICH oscillation tube for ITER is investigated by using the facility in LHD. The code developed for cryogenic system in LHD is used for the real-time simulation of the cryogenic plant process for ITER. The conceptual design of data acquisition system for ITER is supported by the fast data acquisition system developed for steady state operation of LHD. Yet, the cooperation must be further enhanced by contributing to topical for ITER physics and technology issues. These include the use of W in helical closed divertor experiments, modulation ICH experiments and intrinsic toroidal core rotation studies. LHD is particular well equipped for these purposes because of a wide range of unique diagnostics and large heating power available at LHD. Long pulses capability is another very attractive feature of LHD for ITER/BA operation in future. However, deuterium runs are long overdue and cannot be delayed any further in view of their importance for ITER/BA.

[5] Human resource development

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

The important task of training and educating of young Japanese researchers is facilitated by the broad program of courses, lectures and seminars organized by NIFS. It also provides unique possibilities to introduce young people to advanced studies and to avoid typical errors. The training and educating system offers unique opportunities for a future carrier in international fusion research. Yet, it is also important to participate in the international activities aimed at fostering the new generation of fusion researchers. This can be achieved by providing fellowships to young Japanese scientists in order to encourage them to spend part of their education program at international centers connected to NIFS via international comprehensive agreements and academic exchange agreements. This can be done at both master and doctoral level timely facilitating the international experience for a future generation of Japanese fusion researchers.

[6] Future plan

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

Major steps are envisaged upgrading the ICH and ECH heating power and enhancing the closed divertor performance by employing the baffle & Dome and Cryo-pump hardware.

Reliable extrapolation to a reactor from the present status of the research are to be pursued.

Being fully aware of political difficulties due to public relations problems the deuterium operation still appears to be a major step forward given the organization of the neutron diagnostics task force in place and the development of neutron diagnostic system in the near future.

Review on the LHD project

Reviewer: M.C. Zarnstorff

Note from the last review in 2007

1. Does the LHD project strive for improvement in plasma performance as scheduled by means of upgrade of heating capability, installation of closed divertor and deuterium experiment? Is the approach towards steady-state experiments in the regime with higher density and high temperature appropriate?
2. Does the LHD project develop collaboration activities to enrich and stimulate the research and educational activities such as human resource development in universities?
3. Does the LHD project conduct new and original research as a global COE?

[1] Research achievements

- (1) Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system, at a high level by international standards? (refer to the note from the last review)

LHD has made substantial progress since its last review and has become one of the leading fusion research facilities in the world and is establishing the basis for extrapolatable performance by helical systems. Of particular importance are the separate achievements of 5% beta and its sustainment for more than 100 energy confinement times, 1.5 atmospheres of central pressure, high central ion and electron temperatures (7 and 20 keV, respectively), and the identification of the impurity-hole expulsion. In addition to increasing the heating power, LHD has increased performance by implementing the initial modules of the closed divertor and improved the graphite wall conditioning. This indicates that further improvements are likely with installation of the rest of the divertor including cryo-pump, and use of other wall-treatment strategies. The strategy for further increasing absolute performance and $nT\text{-}\tau_E$ is reasonable, but may require.

LHD has implemented an extensive diagnostic system giving a comprehensive perspective on the plasma transport. This is validating a growing understanding of LHD plasma physics including numerical models, which will provide the physics basis for extrapolation of helical systems to the reactor scale. The initial comparisons between data and models look promising, but were not shown for all the important regimes.

Future experiments to improve the basis for extrapolation could include studies of the confinement scaling with single dimensionless parameters, such as ρ^* or S , holding the others fixed. These could clarify which transport mechanisms are most important. Very interesting experimental data of the S , ν^* , and beta variation with magnetic field was shown, which might be possible to analyze in this way. Comparisons of the profile variations in these experiments with the numerical models may also be effective.

(2) Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

LHD now has a mature and comprehensive diagnostic set that is comparable to the best tokamaks, and includes unique capabilities for a large facility, such as the HIBP and collective scattering. This is allowing LHD to do world class and leading research across the full spectrum of fusion physics topics, including core transport, MHD stability, divertor and edge transport, energetic particles, and wave interactions and heating. The group is using its wealth of diagnostic information to make detailed comparisons with numerical simulations and theoretical predictions, strongly improving the general understanding of fusion plasmas. It also is allowing detailed comparisons with similar results from tokamaks and tokamak-theories, demonstrating an understanding of the role of 3D magnetic shaping. These studies are making a strong contribution to our understanding, including

- the role of GAMs and zonal flows in 3D turbulence,
- non-local transport,
- ELM mitigation by RMP perturbations
- Energetic particle stability and coupling to GAMs
- Tungsten dust production and retention of hydrogen

Innovative new techniques have been developed, such as the use of heat pulse propagation to identify magnetic islands and stochastic regions. These are being adapted to tokamaks, showing further impact.

[2] Development of research system and environment

Does the LHD project develop required the steps to execute the missions described in 1?

(1) Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

The new LHD organization features 11 Theme Groups, focused on and responsible for either Mission-oriented or Physics-oriented topics, with rotating leadership drawn from the working researchers. This is a very good and flexible structure, ensuring that all the critical topics receive responsible attention and active engagement. The Theme leaders have authority to allocate allotted run-time to accomplish their mission and responsibilities. This provides a relatively open structure for researchers to pursue ideas and contribute to the overall LHD missions. It has resulted in a ~30% increase in the number of experimental proposals, including a doubling of the proposals submitted by collaborators. The Theme groups are co-led, with one of the leaders being from a collaborating university. This ensures good connections and openness to collaborators, and is consistent with the substantial increase in the number of LHD collaborating researchers. The rotating leadership of the Theme groups will be very beneficial in training new leaders and outstanding researchers for the future.

(2) Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

The continuous upgrading and development of the LHD auxiliary systems has been key to its achievement of high parameters and its broad range of experiments to develop understanding of helical systems. This includes the upgrading of the heating systems (NBI, ICRF, ECRH), the divertor and pumping, and the fueling systems. It is critical that this upgrading process continue, in order to maintain momentum towards higher parameters and to enable LHD to stay at the world forefront in fusion physics. The availability of new capabilities (including new diagnostics) has fueled the group's ability to make discoveries and breakthroughs in understanding.

The high availability of the superconducting coils and cryogenic systems has established an excellent benchmark for future superconducting fusion systems.

This is an important accomplishment, demonstrating that such systems can be made reliable and dependable.

The completion of the closed divertor upgrade (with pump) and the ability to operate in deuterium will be very important for the next phase of LHD. Following that, non-carbon plasma-facing components and methods to improve the magnetic field shape (reduce the effective ripple) should be considered.

(3) Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

LHD has had a long-term program of investment in its diagnostics and modeling. This has produced a comprehensive diagnostic set that is comparable to the best tokamaks, and includes unique capabilities for a large facility, such as the HIBP. The recent work on diagnostics includes upgrades to existing diagnostics, such as Thomson scattering and HIBP, and development of new diagnostics in preparation for deuterium operation. Continued diagnostic upgrades are crucial for maintaining the momentum and impact of LHD research.

This work is complemented by improvements in plasma modeling and the joint work with the NIFS Numerical Simulation Research Project. The evolution of Task3D into a useful predictive code is very impressive and initial detailed comparisons with LHD diagnostic data is very encouraging. This joint development and refinement of capability is crucial for establishing a validated model for future extrapolation. LHD and the Numerical Simulation Project should be embark on a systematic, quantitative validation of the models for confinement in 3D helical configurations, as the model and diagnostic capabilities allow.

The opportunity to test the predictions of the models for deuterium operation has been recognized. This should be systematically exploited in planning and carrying out the deuterium campaign.

[3] Promotion of Collaboration

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

(1) Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

LHD is clearly operating as a major collaboration center both for fusion and for the Japanese research system. This was evident throughout the presentations, both in terms of the researchers presenting results, but also in the leadership of the groups. In particular:

- 1/3 – 1/2 of LHD publications in leading journals have non-NIFS first authors
- One of the co-leaders for each Experiment Theme Group is a university collaborator
- There were more than 600 collaborators in 2011 through the “General Collaborations” and “LHD Project Collaborations”. This has increased ~20% since 2007. The contributions of the collaborators appear to be broadly distributed across all the research topics
- There is a strong outgoing collaboration program, with NIFS scientists participating in University research sites more than 200 man-days/year.

(2) Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

LHD results were presented on several topics which directly contribute to non-fusion fields, including:

- High-Z and rare-earth spectroscopy, checking atomic and molecular physics models. This is providing fundamental atomic physics data, important for a wide range of plasma physics applications beyond fusion, including solar and astrophysics, laboratory plasma sources, and UV light sources for lithography.
- Gyrotron development, in collaboration with Tsukuba University
- Modeling and understanding rotation in turbulent plasmas, relevant for solar and astrophysics.

(3) Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

There is clearly a very strong collaboration with University research, including opportunities for development of University staff members

- Many of the research results presented have lead-researchers from Universities

- One of the co-leaders for each Experiment Theme Group is a university collaborator
- NIFS scientists participated at University research sites more than 200 man-days/year.

[4] Promotion of international cooperation and collaboration

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

- (1) Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

LHD is well recognized as a world-center for fusion research. There has been a strong increase in the number of international researchers contributing to the LHD program to more than 70 in 2011. In addition, a number of the collaborations involve joint-experiments with international facilities, including tokamaks. This is reflection of the strong capabilities of the LHD diagnostics and the facility flexibility. Topics include

- Joint experiments with tokamaks on RMP stabilization of ELMs, role of magnetic stochasticization
- Comparisons on effect of divertor stochasticity with TEXTOR and DIII-D
- Collaborations with KSTAR on energetic ion GAMs
- Development of diagnostics and validation of numerical models developed internationally.

- (2) Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

The LHD team is making good contributions to the ITER and EU-JP BA programs. There are about 20 LHD researchers participating in the ITPA meetings. LHD is making contributions to a number of ITPA databases, to help produce a comprehensive understanding of the toroidal plasma confinement. LHD members are also contributing to the JT-60SA research plan and reviewing the program. The LHD team is also contributing to the technological developments for ITER and JT-60SA in a number of areas including cryogenics, ICRF sources, data acquisition, and superconductors.

I suggest that LHD offer the use of their superconductor testing facility to ITER. I have heard that some ITER superconductor developments are limited by the

availability to test facilities, due to the 2011 earthquake damage. If the LHD facilities were able to help, this may be an important contribution.

[5] Human resource development

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

I think LHD is doing a good job in training and developing young people. They had more than 180 graduate students involved in LHD experiments in 2011, including ~70 from collaborating institutions. They are encouraging young researchers to serve a Theme Group Leaders. By rotating the Theme Group Leaders, they encourage the development of a broad and global perspective by large number of researcher, as well as giving important leadership experience. At conferences and meetings, I see a large number of young LHD researchers, indicating their strong engagement.

[6] Future plan

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

The planned future LHD program is to continue to increase LHD plasma parameters and the detailed comprehensive understanding of plasma behavior in helical systems. This is of critical importance for the future extrapolation and utilization of helical systems, and probably for the long-term availability of fusion energy. This will require that LHD continue to have a strong upgrade program, providing new capabilities to enable a vital and effective research program. This includes

- Completion of the closed divertor, including its pump
- Heating and diagnostics upgrades and improvements
- The deuterium program
- Continued development of comprehensive numerical modeling
- Long-pulse operation at higher power

As a follow on to the planned divertor program, LHD should consider installation of non-carbon divertor and main chamber plasma facing components to prepare for future burning-plasma helical systems. This could involve either solid or liquid metal surfaces.

Review on the LHD project

Reviewer: Thomas Klinger

Note from the last review in 2007

1. Does the LHD project strive for improvement in plasma performance as scheduled by means of upgrade of heating capability, installation of closed divertor and deuterium experiment? Is the approach towards steady-state experiments in the regime with higher density and high temperature appropriate?
2. Does the LHD project develop collaboration activities to enrich and stimulate the research and educational activities such as human resource development in universities?
3. Does the LHD project conduct new and original research as a global COE?

[1] Research achievements

- (1) Are the achievements, which have been obtained by the approach to the realization of high performance plasmas extrapolatable to a fusion reactor by a helical system, at a high level by international standards? (refer to the note from the last review)

The LHD is the biggest stellarator in the world and with its superconducting coil system clearly the leading device in the field. The scientific results obtained with LHD are highly significant and internationally competitive. The research team is well trained, experienced and has access to world-class diagnostics and heating systems (currently 30MW NBI, 4MW ECR, 2MW ICH). The LHD pellet injector (fueling) system, for example, is envied by the world and has opened the gate to the very high density operation (SDC).

As already pointed out in the 2007 review of LHD, the biggest challenge is the integration of the discharge scenarios, i.e., to obtain high plasma temperature (low v^* collisionless regime) at reasonable densities (at least 10^{20}m^{-3}), high energy confinement time (a few s), and everything steady-state. This combined is all required for a fusion power reactor! In one presentation, a graph was shown with

the discharge duration vs. the fusion triple product. It shows that present days tokamaks are still way off the target for a power reactor (often noted as DEMO). Their very good plasma performance tends to deteriorate for longer discharge times (for various reasons). But stellarators have to improve very much as well, first of all in the plasma figures of merit. As a consequence, what is called in the diagram “reliable extrapolation” means work for a generation of scientists. In particular the trend indicated in the diagram must be reversed. What probably needs to be done is the following:

- Better plasma parameters: The planned upgrades for the heating systems (see below) will certainly help to obtain even higher electron/ion temperatures. It seems that relatively stable high density discharges can be established with pellet injection fuelling.
- High power long pulse operation: The planned upgrade to 4MW cw heating power is an important step in this direction (at present only 1.5MW cw). For density control of long high-power discharges, a completed and actively pumped divertor will be necessary. The design value of the cw heat load of the planned divertor will limit the cw heating power.
- Integrated discharge scenarios: A focused and dedicated program should be conducted to integrate the scenarios for reactor-relevant (H and D) plasma conditions. A first step would be a thorough analysis of the present status, e.g. a comparison of β_N -values for all discharges from LHD and the other stellarators. This would provide a scientific basis to judge if the specific magnetic field configuration of a heliotron is a limiting factor or not.

(2) Does the LHD project advance scientific research towards a comprehensive understanding of toroidal plasmas?

The scientific quality of the LHD team is excellent and one literally feels the strong efforts to understand the physics happening in the device. As usual in plasma research, however, it is often difficult to disentangle the causality of the various parameters. E.g., the IH is still lacking a convincing physics explanation, which is actually of paramount importance if one wants to extrapolate this – very much desired - discharge mode to other, more reactor relevant regimes. A crucial point is always the close and fruitful collaboration between experiment and theory. NIFS has excellent, world-wide regarded researchers in his theory department. It is difficult for me to judge how close the collaboration is on the working level, day by day. But this is a key point to achieve scientific excellence in the field of toroidal plasmas. The NIFS management should carefully monitor the situation and the project structure should foster internal collaboration as much as ever possible (cf. also question [2]).

There is, indeed, a lot of challenging physics problems courageously attacked by the LHD team: The old problem of linkage between radial electric field and transport, zonal flows and GAMs in helical systems, non-local phenomena in turbulent transport, magnetic field stochastization and much more. Here the collaboration with the Japanese universities seems to have a very positive effect.

The publication record of LHD is internationally competitive. In fact, for the scientific review committee of the Max-Planck Society, my institution has conducted a thorough publication analysis of the leading research institutes in the world. NIFS has always ranked very high by all criteria, except the number of high-impact papers. The latter can be explained by the lower number of stellarators in operation, but NIFS should nevertheless encourage the LHD researchers to publish their results in the major journals of the world.

[2] Development of research system and environment

Does the LHD project develop required the steps to execute the missions described in 1?

(1) Does the new LHD project system, which was introduced in 2010, contribute to efficient execution of research and extension of opportunities for collaboration?

First of all, the implementation of the new project system of NIFS is very much applauded. The LHD project system is very much based on a matrix organization. This has many advantages, since researchers and engineers can organize their work in an interdisciplinary way and the human resources are more efficiently used. The drawback of a matrix structure is always a lower level of responsibility, since the work priorities not strictly defined. This requires a high level of responsibility and commitment to the overall goals of the project, something that seems to be the case in the LHD team, though. Like for other large-scale fusion projects, a task force like structure was implemented. This is of utmost importance, especially to foster external collaboration. The figures for experiment proposals develop quite well (>600 collaborators, 267 experiment proposals), which confirms the approach chosen by LHD. In a task force system, the key for success are strong and competent task force leaders. In other large-scale experiments it has turned out to be most efficient to appoint task force leaders year-by-year, chosen from the group of senior scientists but eventually giving skilled younger scientists a chance. I recommend the NIFS management to pay highest attention to the topical task forces as the chief tool for steering the joint research done on LHD. Finally, The communication with the other projects (engineering, numerical simulation) seems to be well organized with a fruitful exchange of knowledge.

(2) Does the LHD project develop maintenance, upgrade and improvement of devices and facilities for the main device and heating systems appropriately? (refer to the note from the last review)

The level of engineering on LHD is clearly world-class. The availability and shot-frequency of LHD is outstanding. The foreseen upgrades of heating systems for LHD are quite impressive (about 40MW), and the device them seems to be adequately powered. There is a certain lack of cw-power (see also question [1]), but this is consistent with the present design of the divertor. I very much appreciate that the closed helical divertor is now integrated step-by-step into the machine. Until the end of 2012 it is foreseen to have 8/10 divertor modules and one cryo pump installed. The missing elements are planned to follow 2013/2014. This upgrade is of utmost importance and should be aggressively pursued. A powerful tool for density control is the versatile fuelling system, and the

improved pellet injector turns out to be indispensable for LHD operation.

(3) Does the LHD project develop diagnostics and theoretical/analytic models with high accuracy for comprehensive understanding of toroidal plasmas?

The diagnostic equipment of LHD is ranking world class and provides excellent information on the key plasma quantities. As usual, the continuous development and improvement of diagnostic instruments is mandatory for the success and is well implemented on LHD.

The strong theory and simulation research division contribute efficiently to the understanding of physics issues. This review does not include the evaluation of the theory and simulation activities; a thorough revision of the available codes and concepts is therefore postponed to one of the next reviews.

[3] Promotion of Collaboration

Does the LHD project promote collaboration as the major facility of the inter-university research institute to guide fusion science?

(1) Does the LHD project produce excellent research achievements by making use of the advantages of General Collaborations, LHD Project Collaborations and Bilateral Collaborations?

With the growing number of collaborators within Japan, LHD is serving as the key experimental device for high temperature plasma physics in Japan and Asia. The number of participants in general collaboration and project collaboration has significantly increased from 2007 to 2011. (It would be nice to know the associated FTE figures.) The bilateral collaboration is still working as a strategic link to strong university activities, both in plasma science and technology.

(2) Does the LHD project contribute to interdisciplinary development in cooperation with researchers from a wide range of fields as well as fusion science?

There are strong efforts of the LHD team to foster interdisciplinary research. Examples are plasma-astrophysics and spectroscopy, laser plasma physics, and image processing. Attractive opportunities should be taken, but I think that LHD is already doing a very good job.

(3) Does the LHD project contribute to the development of research in universities?

From the European perspective, LHD is a paramount example for networking with a strong university system. There is a large number of joint projects with universities, both in science and technology/engineering. An impressive number of graduate students are participating in the LHD program. In this way, LHD is serving extremely well its role as an inter-university research facility.

[4] Promotion of international cooperation and collaboration

Does the LHD project make a sufficient contribution to the international community in the role of a global COE in fusion science?

(1) Does the LHD project produce achievements as the center of activities of international comprehensive agreements and academic exchange agreements between institutes?

LHD has more recently made a bold move to extend the collaboration with the US in the field of experimental physics. As a consequence the number of collaborators from abroad has made a jump. This is very much appreciated and should be further extended, if possible. Also the collaboration with European research institutes has been extended. There are now clear responsibilities and a defined procedure how to submit experiment proposals. LHD is on a very good way towards internationalization, a path that should be further followed in the future. The LHD team should also consider appointing researchers from abroad as theme group leaders. (This requires of course a longer stay at NIFS.)

(2) Does the LHD project promote cooperation with and contribution to ITER/BA?

The LHD team is doing his best to support ITER and the BA. It should be kept in mind, that running a machine and conducting a comprehensive experimental program binds most of the resources, such that contributions requiring a lot of man power and other resources cannot be made.

[5] Human resource development

Does the LHD project contribute to human resource development of researchers with a global vision required for long-term fusion research?

The number of graduate students involved in the LHD program is quite high. From the provided information, however, it is not clear to me to what percentage

the graduate students actually work on site, investigate dedicated LHD problems or do other (surely meaningful) plasma physics. It is appreciated that relatively young scientists serve as theme group (resp. task force) leaders. It is not so evident for me to what extent NIFS is promoting a dedicated postdoc-program, if possible including longer research stays abroad. This is, in my opinion, an extremely important instrument to develop the global network in fusion sciences. One possibility is an (internal) award for the most skilled graduate students that includes a fellowship for research stays abroad. In any case, a dedicated program for promotion and internationalization of young scientists would be extremely useful.

[6] Future plan

Is the plan of the LHD project looking forward to the next decade appropriate in terms of the second mid-term plan, etc?

The LHD plan for the period -2014 is ambitious and meaningful. The planned hardware upgrades are very well justified and should be realized. In this way LHD can maintain its role as the leading stellarator device in the world for the next years. As mentioned in the answer to questions [1], the main challenge will be the complete integration of operation scenarios, including the closed helical divertor, under (if possible high-power) steady state conditions.

As for reactor studies, I recommend to participate strongly in the international study groups and to contribute with concepts, operation experience and performance data from LHD. In any case, the stellarator/heliotron option should be kept even for the first demonstration reactor (DEMO), depending on a thorough comparison of advantages and disadvantages of the two major MCF concepts.

「大型ヘリカル装置 (LHD) 計画」に関する評価

評価者 : Gyung-Su Lee

平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の 3 点を、今回の評価において留意するものとする。

1. 加熱装置を強化し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか
3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

[1] (研究成果)

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか (上記の留意点 1. 参照)

1998 年の開始以降、14 年間にわたる LHD 計画で得られた技術的・物理的な成果は大変素晴らしく、世界の核融合研究の国際的な水準を上回っている。特に、2007 年の外部評価後の 4 年間では、LHD は、核融合炉領域を目標にした定常高性能プラズマを用いて、密度、温度およびベータ値におけるその操作領域を拡大してきた。当時の外部評価からの提言を受け、加熱システムの強化、とりわけ NBI 径システムの強化は順調に進められ、閉ヘリカルダイバータの設置および運転についても確実に前進している。また、前途有益な物理学上の成果も現れている。重水素実験への計画および準備も順調で、必要なシステムの本格的な実行に向けて、着実に進められている。

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

ここ4年間の優れた技術的向上および実験成果で、LHD計画は一段と研究を前進させ、トロイダルプラズマを理解するため研究テーマの幅を一層広げ、また一層深く掘り下げてくれた。特に、3D効果およびゆらぎ駆動物理を用いた、中心部の輸送研究は、非常に質の高い成果をもたらし、トロイダルプラズマ輸送を決定づけるような、物理メカニズムのつながりを描き出した。また、MHD領域のELM制御については、トカマクの主要課題の解決の糸口となるため、LHDの3D特性を活かした形でトカマクに貢献できるという意味で、興味深い成果である。

6つの物理テーマグループによるLHD計画の取組みにより、実験スタッフと理論/シミュレーションスタッフとの連携が効果的に行われていることが示され、トロイダルプラズマへの物理解明を前進させている。

[2] (研究体制・環境の整備)

上記[1]を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができるか

(1) 平成22年度から導入されたLHDプロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

新しく導入されたLHD計画の研究体制により、その「組織構造」は「ライン管理」型から「マトリックス」型へと姿を変えた。大型ヘリカル装置計画研究、数値実験研究、核融合工学研究および連携研究の4つのプロジェクト体制とともに、ヘリカル研究部は7つの研究系（およびBA活動のための施設である六ヶ所研究センター）に分かれている。一方、大型ヘリカル装置計画研究プロジェクトは、4つの課題グループと6つの物理研究グループから成る。研究テーマ別に分け、柔軟性を高めることを目的としたこの新方式は、初期の成果を見る限り今後も十分成果が期待され、また、実験プロポーザルの増加やTGリーダーの優れたリーダーシップなどからも、効果的な方法であると判断してもよさそうである。

「マトリックス」型によく知られた弱点としては、限られた人数で工学的な基盤管理を行わなくてはならないという点であるが、これについては、技術的な計画を進める上で注意して見守っていく必要がある。

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか(上記の留意点1. 参照)

SC コイルや冷却システム、電力供給など、超伝導システムが高い供給率(最大99%)で稼働していることから、LHD 計画のメンテナンス能力のレベルの高さを示している。新しく導入される「閉ヘリカルダイバータ」「径 NBI 加熱システム」「HAS ICRF アンテナ」など、性能強化の実力があることも実証され、主要システムおよび冷却システムの改善能力も高いレベルにある。

(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

LHD の計測システムは成熟期にあり、現存の装置の性能を継続的に改善させることで、データの質を高めてきた。しかし、新たなコンセプトや重水素実験に向けた計測技術の開発は、重水素運転のターゲットが不確定なためやや遅れ気味なように思われる。LHD 実験の理論サポートやデータ分析については、先の項でも述べた通り、この目標を高いレベルで達成できている。

[3] (共同利用・共同研究の推進)

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

NIFS 共同研究についての前回の外部評価以来、3つの共同研究を通じて、LHD 計画は絶えず優れた研究成果を生み出している。特に、LHD 計画は有意義な研究成果を挙げるとともに、参加者を増やすことに成功している。そしてそれが一般共同研究への参加者の増加へのフィードバックとなっている。

双方向型共同研究もまた、参加機関の専門知識を共有するプラットフォームとしての機能を果たし、アイデアやテクノロジーのやりとりがより活発に行われるようになってきているように思われる。

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

LHD 計画が、研究協力を学際的に、天体物理学プラズマへの産業的応用など広い分野にわたって、研究協力を学際的に進めようとしていることは、認められなくてはならない。天体物理への応用を目指した、国立天文台との新しい取組みも始められている。

(3) 大学の研究発展に寄与しているか

核融合研究の大学共同利用機関として、LHD 実験および LHD 関連の開発研究への参加を、大学の研究者たちに呼びかけてきたことで、LHD 計画の貢献度は非常に高い。また、NIFS は現在、自分の職員を他の大学へ派遣し大学との共同研究の拡大に努め、双方向性の研究活動を行っている。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

NIFS はこれまでに、世界の数多くの核融合研究機関と共同研究を強力に推進してきた。LHD 計画は、LHD 実験へ参加する外国人研究者の数を大幅に増やした。また、「海外の装置」での研究へ参加するべく、工夫もしている。

(2) ITER・BA 計画との連携、貢献を図っているか

NIFSはITERプロジェクトに向けたITPA活動への参加および貢献に努める一方、またITER機構とは双方向で協力しあうための、正式な契約を結んだ。また、LHD研究者も、JT-60SA の物理および工学に関するBA活動に参加し、貢献している。(NIFSによるこの他のBA関連活動については、六ヶ所研究センターが行っている。)

ITERプロジェクトの科学的小および技術的な取組みに対しては、LHD研究者や各大学の研究者たちが、さらに積極的に、さらに幅広く参加していく必要がある。

[5] (人材育成)

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成にLHD は貢献できているか

毎年 150 を上回る、「学生」の LHD 計画への安定した参加人数は、長い目で見ると、核融合の研究発展における人材育成という点で、非常に重要な貢献を果たすように思われる。また、LHD テーマグループのリーダーに若手研究者を登用しているが、これも、将来の実験や装置を扱うリーダーの育成になると思われる。

若手の活動の場を国際協力にまで広げ、彼らがいずれ、ITER など世界規模での核融合研究のリーダーとなれるよう、環境を整えることが大切になってくるだろう。

[6] (将来計画)

今後の10年間程度を見越した LHD 計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

(和訳)

LHD 計画の強化計画については、加熱システムおよび「閉ヘリカルダイバータ」に、非常に明確なプランが立てられているように思われる。重水素実験の準備については、具体的なターゲットラインを立てるため、再度見直しが必要である。

また、LHD の性能の拡張や、物理の総合的な理解に向けた取組みについても、前回の中間計画での経験や結果を活かし、良く計画されているように思う。

一方、ITER 運転や「DEMO 炉」への準備計画は、もう少し詳細を詰める必要がある。

「大型ヘリカル装置 (LHD) 計画」に関する評価

評価者: Michael Tendler

平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の 3 点を、今回の評価において留意するものとする。

1. 加熱装置を強化し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか
3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

[1] (研究成果)

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか (上記の留意点 1. 参照)

2011 年度の LHD の成果を評価するにあたって忘れてはならないことは、この年日本は、人類史上あらゆる面において前例のない程の災害に見舞われたという点である。それにも関わらず、NIFS は世界の核融合研究の先頭を走り続けている。挙げた成果を見ると、非常に意欲的に、極めて広い分野の課題に取り組んだことが分かり、NIFS への高い評価を一層揺るぎないものとしている。核融合の三重積を高いレベルで実現させ、安定した長パルス運転を実証し、高度なプラズマパラメータ値を達成、また、バッフル構造を持つ閉ヘリカルダイバータを用いてプラズマと壁の相互作用をコントロールし、また炉関連研究へ先進の材料を採用した。去年はもちろんのこと、この 14 年間での進展は実に目を見張るものがある。特に、中心部の超高密度領域の存在は、ステラレータコンセプトの核融合炉へと道を開いた。ポロイダル回転の増加に伴って発見された不純物ホール存在は、LHD の超高密度領域に有利に働く。加熱能力は十分に強化され、炉関連運転モードを生み出した。マシン能力は、加熱装置や閉ヘリカルダイバータの強化、延び延びになっていた重水素実験の実施など、装置の実力をここ数年のうちに最大限に高める見通しとなっている。

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

研究結果は、世界の核融合研究の先端をいく。核融合炉に関連したイオン温度や電子温度の成果について、世界記録の定常のベータ値および、3 MW の補助加熱で1時間におよぶ長パルス運転を実現していることから、それが確認できる。中心部に超高密度領域をもたらす内部拡散障壁の発見は、JT-60SA や ITER でのシナリオ作りの相補的なサポートが期待される、先進ステラレータ炉に向けて、新たな道が開かれたといえる。

[2] (研究体制・環境の整備)

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができるか

(1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

制度は明確に規定され、核融合エネルギーという重要なゴールとの整合性も高い。透明性も高く、国内での活動のみならず広い分野での国際交流を行う上でも非常に効率の良いものとなっている。

運転についての安全性や、プログラムで決められたタイムスケールおよび研究ハイライトスコープを絶対的に尊重するよう、特に注意が払われている。超伝導システムの高い供給率のおかげで、LHD プラズマ実験は非常に効率的に進められている。NBI 加熱パワーをさらに強化して 28MW まで上げたことにより高 Ti 領域 (7keV) を得ることができ、LHD はさらに核融合炉に近づいたことになる。ECRH 性能の進歩により、核融合炉を見通した長パルス運転も可能になりそうである。

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか (上記の留意点 1. 参照)

LHD 計画の発展は、本体関連の各種機器及び加熱機器の整備、増強および改良の出来に大きく左右される。このため近い将来、冷却システム、LHD 超伝導コイル用 DC パワーサプライの増強およびモーター駆動のギアなどに大幅な改造が行われる。LHD の性能を強化するため、閉ヘリカルダイバータの設計およびテストが進められ、燃料補給および加熱システムの改良についても、厳格に取り組まれている。負 NBI および陽性重水素イオン源の設計研究も現在行われている。

これら技術的な開発はすべて、LHD の性能をさらに向上させるために行われている。

(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

LHD 専用の重イオンビームプローブやマイクロ波ドップラー反射率測定、H/He 比率測定システムおよび2ビーム分光装置などの新しいタイプの計測機器のおかげで、LHD プラズマについての知識および理解が劇的に深まった。理論研究の成果としては、短波バルーニングモードや LHD へのペレットパラモイドの注入の MHD 分析、LHD プラズマの無衝突型駆動リコネクションや導波管内のサイクロトロン運動の異常減速の3D シミュレーションなどが挙げられる。さらに、エネルギー粒子を再注入するために現在開発中の3D モンテカルロコードも忘れてはならない。また、LHD に長年にわたって欠かせない存在であった HINT2 コードを評価するため、MHD 平衡の3D 再構築が開発されている。TASK3D 輸送コードを実行し、シミュレーション科学センターは素晴らしい成果を残した。現在国内で稼働中の新型コンピュータの性能を強化することで、センターの能力も引き上げられた。

[3] (共同利用・共同研究の推進)

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

共同研究の最も魅力的な点は、世界最高のハードウェアやソフトウェアへ直接アクセス出来るという点である。これらは NIFS に集約されており、結果、大勢の大学研究者にとって、大学の規模に関わらず自分の手の届くところで、最先端の核融合研究が行われていることになる。

一般共同研究では、主に NIFS の装置設備が用いられ、また本事業にとって重要な実験を行うために NIFS に訪れる外部の研究者に対し、予算が用意されている。LHD 計画共同研究は LHD を用いた実験に焦点をあてており、このユニークな装置を素晴らしい形で活用している。双方向型共同研究では、他の大学のセンターにある大型装置を用いて、NIFS に関連した研究を行うことにより、相補完的に事業を進めている。これらの共同研究は相互に強化し合い、また、NIFS と大学間で良い意味でのフィードバックをもたらし、双方に有益なものとなっている。

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

核融合に関する研究や考え方の異なる、国内のあらゆる教育機関が恩恵を受けられるよう、また上手く調和するよう、柔軟な対応でもって、共同研究を非常に巧みに運営している。LHD 計画では、コミュニティに対し国内の最先進の装置へのアクセスを可能にした。双方向型は比較的新しい取り組みでありながら、歴史ある研究プログラムを数多く推進し、時代に則したトピカルな問題に焦点を当て取り組んでいる。一般共同研究は、様々な研究活動をサポートしている。機構の基盤で学際的な発展がもたらされ、さらなる展開が期待される。

(3) 大学の研究発展に寄与しているか

大学の研究発展には、LHD の利用および、LHD 実験のために NIFS を訪れる研究者たちへの予算配分が含まれる。大学の多くが、NIFS 事業にとって重要な問題を解決するのに、大いに役立っている。テーマリーダーのうち5人が主要大学の研究者であるという事実が、貢献度の高さを表している。大学別では、九州大学がコンパクトトカマクの物理学に、大阪大学は慣性核融合の発展および磁気シアの輸送への影響に、また京都大学は磁気配位の最適化や Balmer- α ラインの時間分解測定に、東北大学は電極バイアス実験に、東海大学は閉ダイバータ研究に、そして筑波大学は高出力のジャイロトロン開発および開いた配位での電場電位の研究に取り組んでいる。忘れてはならないのは、組織間交流を伴う事業の運営者である NIFS に与えられた使命は、核融合という非常に複雑な研究対象や参加者の数の多さから、決して易しいものではないということである。それにも関わらず、本事業では、透明性の高い信頼に足るインフラを作り出すような素晴らしい方法で、その課題をクリアしている。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

包括的協定の枠組みのもと、アメリカ合衆国や中国、韓国、EU (IEA 協定も含む)、ロシアそしてウクライナとの間で、有意義な国際的活動が行われている。明確に定義された LHD 研究の主要な課題を重視し、またそれを相補完的に支える形で、それぞれが自分たちの専門分野での課題や使命に取りくんでいる。また、ドイツのマックスプランク・プラズマ研究所に対しても、W7X プログラムが加速するよう支援している。NIFS とオーストラリアの間では、活発な学術交流事業が行われ、

共同出版およびワークショップ開催などに結びついている。核融合および宇宙プラズマについて、実験およびシミュレーション上で乱流領域の解明を進めるために設置された国際共同研究ネットワーク活動は、機構による、広範囲での活動の一部を担うものとして重要である。

(2) ITER・BA 計画との連携、貢献を図っているか

一般に、トカマク研究の3D効果への関心はここ数年で非常に高まっている。これは、いわゆる「共鳴磁場摂動」を用いた革新的なELMコントロールの登場による。先日、NIFSはITER機構と技術的な協力のための協定を取り交わした。そして現在、LHDの装置を用いてITER用のICH振動特性の研究が進められている。LHD冷却システム用に開発されたコードが、ITERのプラント冷却プロセスのリアルタイムシミュレーションを行うために用いられている。ITERのデータ収集システムのコンセプト設計については、LHDの定常運転用に開発された高速データ収集システムがそれをサポートしている。しかし、ITER物理および技術的課題に対しトピカルな貢献など、さらなる協力が求められる。例えば、閉ヘリカルダイバータへのWの使用や、ICH実験モジュレーション、固有トロイダル回転研究などがそうである。またLHDは、独自の計測機器を様々に備えており、また高出力も可能なことから、特にこうした貢献に向いている。将来のITER/BA運転に視野に入れると、LHDの特長である長パルス能力もまた、非常に魅力的である。一方、重水素実験はすでに大幅に遅れており、ITER/BAへの影響の大きさを考えると、これ以上先延ばしにすることは出来ない。

[5] (人材育成)

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成にLHDは貢献できているか

NIFSが運営するLHD計画の様々なコース、レクチャーおよびセミナーなど、若手研究者の人材育成という重要な使命への取組みが強化されている。またLHD計画は、若い人材に先進の研究を紹介し、またよく起こる失敗を防ぐという意味で、ユニークな可能性も持っている。用意された人材育成システムは、将来の国際的な研究キャリアへとつながる、独自の機会を与えている。しかし、新しい世代の人材養成そのものを本題とした、国際的活動に参加することも重要である。例えば、フェロシップを用意し、包括的な協定のもと、日本人若手研究者たちに、NIFSと関連のある国外のセンターで学生期間の一部を過ごすことを奨励するなどすれば、それが可能になる。こうした試みをマスターおよびドクターレベルで適宜行うことは可能だし、それが国際的な経験を積ませていくことになる。

[6] (将来計画)

今後の10年間程度を見越したLHD計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

(和訳)

ICH および ECH 加熱パワーの強化、またバッフルドームおよびクライオポンプを採用した閉ダイバータ性能の向上など、主要な段取りが明記されている。現状から、信頼できる外挿法を探求していく必要がある。対外的問題で政治的な壁があるのは承知しているが、それでも重水素実験はやはり、すでに動いている中性子診断タスクフォースチームや近い将来の中性子診断システムの開発のことを考えると、前に進むべき主要なステップであるように思われる。

「大型ヘリカル装置 (LHD) 計画」に関する評価

評価者：M. C. Zarnstorff

平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の 3 点を、今回の評価において留意するものとする。

1. 加熱装置を強化し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか
3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

[1] (研究成果)

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか (上記の留意点 1. 参照)

前回の外部評価から LHD は相当の進化を遂げ、世界で最新の核融合装置のひとつとなった。またヘリカル方式より推定可能な成果をそこから期待できるようになった。中でもとりわけ重要なのは、5%のベータ値の達成とそれを 100 回以上のエネルギー閉じ込めで持続できたこと、中心部の圧力 1.5 気圧、中心部のイオン温度および電子温度 (それぞれ、7keV と 20keV)、不純物ホール排出の発見などである。加熱パワーの増加に加え、閉ダイバータの初期モジュールの実行およびグラフィット壁のコンディション改良など、LHD はパフォーマンスを向上させた。このことは、クライオポンプや残りの閉ダイバータ強化を進め、壁関連について新たな戦略を採用するなど、さらなる向上を見込むことができる。nT-tauE およびさらなる性能向上を目指した戦略は妥当だが、それが示されていなかった。

LHD は大規模な計測システムを持っているため、プラズマ輸送を包括的に捉えることができる。これにより、数値モデルなど LHD プラズマ物理について検証が進み、さらには、ヘリカルモデルから実際の炉への推定研究を行う基盤が出来てくる。データとモデルとの比較研究については、その初期成果の見通しは良さそうであるが、重要な領域についての結果はまだ示されなかった。

推定研究への基盤作りに向けて行う新たな実験としては、他の条件を固定して得られる ρ_0 や S など、単一無次元パラメータで閉じ込めについてのスケールリング実

験も一案だろう。これにより、どの輸送メカニズムが重要なのかが見えてくる。磁場を伴う S 、 ν^* およびベータ変数など非常に興味深いデータが示されたが、これらのデータを先に述べたように分析することは可能だろうと思われる。これら実験プロフィールのデータを数値モデルと比較することも効果的であろう。

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

現在 LHD には、成熟した包括的な計測機器が備え付けられている。これは最良のトカマクに匹敵し、また、HIBP や集合的散乱など大型装置に対応したものである。だからこそ LHD は、中心輸送から、MHD 安定、ダイバータおよび周辺輸送、エネルギー粒子、そして波動相互作用および加熱に及ぶ核融合物理課題全般を網羅でき、且つ世界レベルの先端研究を行うことができる。担当グループは、豊富に生み出されるデータの恩恵を受け、計測結果について数値シミュレーションや理論上の予測との比較を詳細に行い、核融合プラズマの理解を大きく深めた。また、トカマクでの同類の結果やトカマク理論との詳細な比較も行われ、3D 磁場成形の役割についても理解が進んだ。これらの研究成果は、以下の様な点で大いに役立っている。

- 3D 乱流における GAM s およびゾーナルフローの役割
- 非局所的輸送
- RMP 摂動による ELM 低減
- エネルギー粒子の安定および GAM s とのカップリング
- タングステンにおけるダスト生成および水素の保有力

磁気島やストカスティック領域を認識するためパルス伝播を用いるなど、革新的で新しい方法が開発された。これらはトカマクにも採用され、より一層の影響力を示した。

(1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

今回導入された LHD 新体制で、着目すべきは 11 に分れたテーマグループである。このテーマグループはそれぞれ、課題型もしくは物理型トピックを担当し、所属する研究者から持ち回りでリーダーシップをとる。これは、非常に優れた、柔軟性に富んだ体制で、重要なトピックのすべてが責任を持って対処され、また積極的に取り組まれる。テーマリーダーには、割り当てられたランタイムを振り分ける権限を与えられているため、研究者たちがアイデアを追求し、LHD 計画全体としての課題に貢献する上で、比較的オープンな構造となっている。結果、実験プロポーザルの数が、共同研究者からの数の倍増も含め、最大 30% の増加につながった。テーマグループは複数のリーダーによって共同でまとめられる。片方のリーダーを他の大学の人材が務めることにより、共同研究者との結びつきが上手く保たれ、また彼らに対して開かれたものとなる。そして、LHD 計画への共同研究者参加数が増加したのも、このリーダー体制と決して無関係ではない。また、持ち回りで責任者を担当するというやり方は、新たなリーダーや将来の優れた研究者の教育という意味でも、非常に有意義なものとなるだろう。

[2] (研究体制・環境の整備)

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができているか

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか (上記の留意点 1. 参照)

LHD 補助機器の継続的な増強および改良は、ヘリカルへのより深い理解を目指して行われる高いレベルのパラメータ達成や多岐にわたる実験にとって、ポイントとなってきた。増強されてきたのは、加熱システム (NBI、ICRF、ECRH)、ダイバータおよびパンピング、そして燃料システムなどである。さらなるパラメータへ向けてこの勢いを維持し、LHD を核融合物理研究での世界のトップランナーとさせ続けるために、この取組みを継続していくことが不可欠である。機器が新たな性能 (計測技術を含む) を持つことで、グループのメンバーが新たな発見をし、理解への突破口をつかむ大きな手助けとなってきた。

超伝導コイルや冷却システムの供給率の高さは、将来の超伝導システムにとって素晴らしいベンチマークを作り上げた。これは重要な成果である。これによりこれらのシステムの信頼性および実用性が確かめられたためである。

LHD が次の段階に進むためには、(ポンプ付) 閉ダイバータを改良し、重水素実験の準備を整えることが非常に重要になってくるだろう。その後で、対向プラズマ非炭素コンポーネントや、磁場成形改善の方法 (有効リップルの減少) について、

考えていかななくてはならない。

(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

LHD 用の計測器およびモデリング開発への長期的なプログラムのおかげで、トカマクの最も優れたものに匹敵する包括的な計測セットを作り出し、また HIBP など、大型装置用として特殊な機能も備えたものが出来上がった。近年の計測機器の動きとしては、トムソン散乱や HIBP など現存の機器の性能が增強され、重水素実験用の新しい機器が開発された。LHD 研究の勢いや影響力を維持するためには、継続した性能向上への取組みが不可欠である。

こうした取組みには、プラズマモデリング機能の改良や、数値実験研究プロジェクトとの共同作業などにも支えられている。TASK3D の予測コードへの進化は大変素晴らしい成果であり、LHD の計測データとの詳細な比較も行われ、初期段階ではあるが、今後への励みになる取組みである。こうした共同での開発は、確かな推定を行う信頼性の高いモデルを構築するためには欠かすことができない。LHD 計画と数値実験研究プロジェクトは互いに協力し、3D ヘリカル配位での閉じ込めモデルを、体系的にかつ数値的にその信頼性を高めるよう、努めていかななくてはならない。現在のモデルおよび計測機器の性能で、十分それが可能である。

このモデル予測を重水素実験に試してみてもよいだろう。キャンペーンを計画し、実行するにあたり、この予測機能を巧みに活用するべきだろう。

[3] (共同利用・共同研究の推進)

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

核融合研究という意味でも、共同研究体制という意味でも、LHD は主要な共同活動センターとして機能している。このことは数々の報告にも現れていて、成果発表する研究者だけでなく、グループのリーダーシップを見てもそれが確認できる。例を以下に示す。

- 主要なジャーナルで公表される LHD 関連の論文の 1/3 から 1/2 が、所外の研究者を第一著者としてものであること。
- 各実験テーマグループリーダーの一人が大学研究者であること。
- 一般共同研究や LHD 計画を通じ、共同研究者の数が 2011 年には 600 名を超えた。2007 年からは、約 20%の増加である。共同研究者による貢献は、あらゆる研究トピックスを網羅し広い範囲で行われているように思われる。

- NIFS の研究者が大学に出向いて大学の研究に参加するという、所外へと向かう共同研究のプログラムも精力的に行われている。年間 200 人日以上に及ぶ。

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

LHD の成果は様々なトピックスに渡り、核融合以外の分野にも直接貢献している。例を以下に示す

- High-Z や希土類について、原子や分子の物理モデルを確認する分光法。原子物理について基礎的なデータを得ることができ、プラズマ物理の応用を核融合の枠を超えた広い範囲で行うことができる。例えば太陽や天体物理学、研究室用プラズマ源およびリソグラフィ用 UV 光線源などに役立つ。
- 筑波大学との共同研究で進められている、ジャイロトロン開発。
- 太陽および天体物理学に関連の深い、乱流プラズマの回転についてのモデリングとその理解

(3) 大学の研究発展に寄与しているか

大学の人材育成の機会提供を含め、大学の研究とは非常に強い協力関係が見られる。例を以下に示す。

- 発表された成果の多くは、大学の研究者がリードして進めたものである。
- 各実験テーマグループリーダーの一人を、大学の研究者が務めている。
- 大学で行われる研究に、年間 200 人/日 NIFS の研究者が参加している。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

LHD が核融合研究のワールドセンターであることは周知の事実である。LHD 計画に参加する外国人研究者の数は増加し、2011 年には 70 名を超えた。さらにトカマク装置も含めた、海外の装置を使用した共同実験も多く行われている。これは、LHD の計測機器の優れた性能や施設としての柔軟性を反映した結果である。トピックスとしては、以下のとおりである。

- ELMs の RMP 安定や磁場確率の役割についての、トカマクを用いた共同実験
- ダイバータの偶然性の効果について、TEXTOR や DIII-D との比較
- エネルギーイオン GAMs についての KSTAR との共同研究
- 計測技術の開発および国際協力で開発された数値モデルの検証

(2) ITER・BA 計画との連携、貢献を図っているか

LHD研究チームは、ITERおよび日欧のBA活動に大いに貢献している。20名のLHD研究者がITPA会議に参加し、トロイダルプラズマの閉じ込めについての包括的な理解を促進するため、ITPAデータベースの充実化に貢献している。LHDスタッフはまた、JT-60SA事業の計画立案および見直しにも貢献しており、またITERおよびJT-60SAにおける技術開発、例えば冷却、ICRF源、データ取得、超伝導などの多数の技術開発にも協力している。

提案としては、LHDからITERに対し、超伝導用テスト装置を貸し出してはいかがかと思う。東日本大震災の影響で装置が手に入りにくくなったため、ITERの超伝導開発のいくつかの部門が、限られた範囲でしか進められないということを目にした。もしLHDからそういった支援ができれば、大きな貢献になるだろうと思う。

[5] (人材育成)

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成にLHDは貢献できているか

若手研究者の人材育成という点において、LHDは成果を出していると思う。2011年にLHD実験に参加した学生は、共同研究機関から参加した70名の学生を加え、180名を超えた。また、若手にテーマグループリーダーのポジションを推奨している。リーダーを持ち回りにすることで、多くの研究者が世界的な開かれた視点を得ることができ、また重要なリーダーシップ経験を積むことができる。会議や学会などでも、多くの若いLHD研究者に出会ったが、このことは若手研究者がいかに深く参加できているかを示している。

[6] (将来計画)

今後の10年間程度を見越したLHD計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

計画によれば、LHD計画共同研究は今度もプラズマパラメータを向上させ、またヘリカルシステムでのプラズマ挙動の総合的な理解を深める取組みを継続するということである。将来の推定研究およびヘリカルシステムの採用に、そして、おそらく核融合エネルギーの長期供給にとって、これは極めて重要な取組みである。このためには、LHDは確実な性能強化プログラムを実施し続け、欠かすことのできない事業を効果的に行えるよう、さらなる実力を兼ね備えていくことが必要となってくるだろう。例を以下に示す。

- パンプを含め、閉ダイバータの完成
- 加熱および計測技術の増強および改良
- 重水素実験

- 包括的数値モデリング技術の継続的な開発
- 高出力での長パルス運転

ダイバータ計画に加え、LHD が考慮すべきなのは、将来のヘリカル燃焼プラズマに向けた、ダイバータおよびメインチャンバーの対向プラズマ用非炭素材料の採用である。ここには、固体もしくは液体金属表面なども含まれる。

「大型ヘリカル装置 (LHD) 計画」に関する評価

評価者：Thomas Klinger

平成 19 年度に実施された、LHD 計画に関する外部評価による「提言」に示された以下の 3 点を、今回の評価において留意するものとする。

1. 加熱装置を強化し、閉ダイバータを実装して重水素実験計画を予定通り推進し、プラズマ性能のさらなる向上を実現するよう努めているか また、より高密度・高温条件下での定常実験に向けた取り組みは適切か
2. 人材育成など全国の大学の研究教育活動の充実・活性化のために共同研究活動を展開しているか
3. 世界の COE として、LHD において独自で新しい研究を進めているか

[1] (研究成果)

- (1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果は、国際的に高い水準となっているか (上記の留意点 1. 参照)

LHD は世界最大のステラレータで、かつその分野では最新の超伝導コイルシステムを備えている。LHD で得られる実験結果は重要が高く、国際競争力もある。実験チームは皆よく教育され、経験も豊富で、世界レベルの計測機器や加熱装置 (現在でいうと 30MW NBI や 4MW ECR、2MW ICH など) にも通じている。例えば LHD のペレット注入装置は世界もうらやむ装置であり、超高密度運転への道が開けたのもこの装置のおかげである。

2007 年の外部評価で指摘されたとおり、LHD の最大の課題は放電シナリオの統合である。シナリオとは、妥当な密度レベル (10^{20}m^{-3} 以上) での高温度達成 (低 v^* 無衝突領域)、エネルギー閉じ込め時間 (数秒)、そして定常運転などである。これらすべての組み合わせこそが、核融合エネルギー炉実現のための絶対条件である！外部評価会議では、放電時間 vs 核融合三重積についてのグラフが示されたが、これを見ると現在のトカマクは、動力炉 (DEMO ともいう) に向けた課題達成までにはまだ遠いことが分かる。トカマクは、放電時間が長くなるとプラズマ性能が落ちる傾向がある (様々な理由による)。とはいえ、ステラレータにもその強みであるプラズマ性能にさえ、改善すべき点はある。結果として、ダイアグラムで示された「信頼性の高い推定」とは、(それが出来る) 研究者を生み出すということである。特に、ダイアグラムに示された傾向は、順序が逆である。考えられる今後の課題を以

下にあげる。

- プラズマパラメータの向上。予定されている加熱装置（下記参照）の増強は、さらに高温の電子／イオン温度の達成に役立つ。ペレット注入で、比較的安定した、高密度での放電も可能だろうと思われる。
- 高出力長パルス運転。4 MW cw への加熱パワーの強化は、そのための重要なステップである（現在 1.5MWcw）。高出力の長時間運転で密度をコントロールするためには、積極的に排気できる、完全形のダイバータが必要になってくるだろう。計画中のダイバータの cw 熱負荷の設計値では、加熱パワーを制限してしまうだろう。
- 放電シナリオの統合。炉関連（H および D）プラズマ条件へのシナリオ統合に向け、集中的なプログラムを実施する必要がある。まずは現在の条件（LHD と他のステラレータから得られる β_N -値の比較など）を徹底的に分析することである。これによりヘリオトロンという磁場配位が限定要素であるかどうか、それを判断する科学的な土台を作ることができる。

(2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展させることができているか

LHD チームは科学的に優秀で、LHD で見られる物理現象を理解するため相当の努力を費やしていることが感じられる。しかしながら、プラズマ研究では当たり前のこととはいえ、様々なパラメータの因果関係については、解きほぐすことは往々にして難しい。例えば、IH などは未だ科学的な根拠に基づいた説明が得られていない。しかし、他の条件、すなわち炉関連領域への推定を行う（そしてこの推定が非常に求められている）際には、これが最も重要となる。このことは、実験家と理論家がいかに密接に協力し合い、成果を出せるかにかかっている。NIFS の理論研究部門には、世界的に評価の高い、優秀な人材が何人もいる。日常の、現場レベルでの協力がどの程度密接に行われているのかについては、私には判断しかねるものの、トロイダルプラズマで科学的偉業を達成しようとするれば、このことは重要なポイントである。NIFS の管理者は状況を注意深く観察する必要がある。またプロジェクト体制は可能な限り、所内の協力関係を強化していくものでなくてはならない（評価の観点[2]参照）。

事実、物理上の難解な課題は山積みで、LHD 研究チームたちがそれらに果敢に取り組んでいる。径方向電場と輸送の関係、ヘリカルにおけるゾーナルフローと GAMs の関係、乱流輸送での非局所化減少、磁場の確率化などがそれであるし、それ以外にも多くある。国内の大学との共同研究もまた、非常に効果的に機能しているように思われる。

LHD から公表される成果も、国際競争力が高い。我々マックスプランクソサエティの科学成果評価会議では、世界中の先進的な研究所から出される公表成果について徹底した分析が行われているが、あらゆる評価基準において NIFS はいつも上位

にあがる。ただし、インパクトの高い論文の数、という項目は別である。このことは稼働中のステラレータ装置の数が少ないことが原因だろうと思われる。にもかかわらず、NIFS は LHD 研究者に対し、研究成果を世界の主要なジャーナルへ公表するよう、積極的に奨めている。

[2] (研究体制・環境の整備)

上記 [1] を遂行するために必要な措置として、以下を実施することができるか

(1) 平成 22 年度から導入された LHD プロジェクト制度は、研究の効率的な遂行と共同研究の機会拡充に貢献しているか

まず、プロジェクト新体制を投入した点は大いに評価できる。これはマトリックス型構造をベースにした体制で、多くの利点を持つ。例えば、研究者や技術者が分野にとらわれることなく自分の仕事を進めることができるし、人材をより効率的に活用できる。一方、欠点としては、仕事の優先度が明確に定義されないため、責任の度合いが低くなってしまうことである。したがって、プロジェクト全体のゴールに対し、強い意志、強い責任感を持つことが必要になってくる。そしてそれは、すでに NIFS チームには自明のこととなっているように思われる。今回、他の大型プロジェクトのように、体制としてタスクフォースが実行された。これは極めて重要で、とりわけ外部との共同研究を強化するのに意味を持つ。実験提案の数は順調に伸び（共同研究者 600 名以上、267 実験プロポーザル）、これにより LHD が取った方法が正しいことが確認された。タスクフォース体制が上手く機能するためには、有能で強力なリーダーを持つことが重要である。他の大型装置研究では、タスクフォースのリーダーを 1 年ごとに指名して、先輩研究員から選んだり、時には実力のある若手研究者にそのチャンスを与えたりすることが、最も効率的であることがわかってきた。私からの提言としては、NIFS の管理者にはトピカルベースで動くタスクチームを、LHD 共同研究を前進させる最重要の部隊として一番大切に見守って行っていただきたいと思う。最後に、この制度は、工学および数値シミュレーションなど他のプロジェクトとのコミュニケーションが取りやすい体制になっていて、成果ある情報交換ができていているように思われる。

(2) LHD の性能を最大限に発揮させるために、加熱及び本体関連機器の整備・増強、装置の改良を適切に進めてきているか（上記の留意点 1. 参照）

LHD へ施される技術レベルは世界レベルである。LHD の稼働率およびショット頻度には目を見張るものがある。予定されている加熱機器の改良についても素晴らしく（約 40MW）、装置も然るべきパワー供給を受けているように思われる。cw パワーにやや足りないところがあるものの（評価観点[1]参照）、現在のダイバータの設計上、やむを得ないところである。特に評価したいのは、閉ヘリカルダイバータが

LHD 装置への配置に向け、一步ずつ完成へと向かっている点である。2012 年末までにモジュールの 8 割と冷却ポンプが取り付けられると予測されている。残りの部分については 2013/2014 へと引き継がれていくことになっている。これは極めて重要な取組みで、強力に推進されなければならない。密度制御の強力なツールは、多機能な燃料システムであり、改良されたペレット注入機器は、LHD 運転には欠かせないものとなった。

(3) 環状プラズマの総合的理解のために、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充をしてきているか

LHD の計測機器は世界レベルであり、主要なプラズマ分析への貴重な情報を提供している。これまで通り、計測機器の継続的な開発および改良を進めることは不可欠だが、LHD については上手く対応できている。

NIFS の優秀な、理論シミュレーション研究系も、物理的解明に効果的に貢献している。今回の評価項目には理論シミュレーション研究は含まれないので、現在有用なコードやコンセプトについての言及は、今後の評価に預けておく。

[3] (共同利用・共同研究の推進)

核融合科学研究を先導する大学共同利用機関の主装置として、LHD は共同研究を推進しているか

(1) 一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の特長を活かし、優れた研究成果をあげているか

国内の共同研究者の増加に伴い、LHD は、日本及びアジア諸国において、高温プラズマ物理研究用の重要な実験装置として機能している。一般的な共同研究やプロジェクト型共同研究への参加者数は、2007 年から 2011 年にかけて大幅に伸びた(関連の FTE についての数字も分かると尚良い)。双方向型共同研究については、プラズマサイエンスおよびテクノロジー分野において、それらを得意とする大学の研究活動を戦略的に結びつける、リンクとしての機能を果たしている。

(2) 核融合分野のみならず、広い分野からの研究者との連携により、幅広い学際的展開に寄与しているか

LHD チームによる学際的な研究への精力的な取組みは複数見られる。例えば、プラズマ天体物理学や分光法、レーザープラズマ物理学やイメージプロセッシングなどがそれである。魅力的な機会があれば活用すべきだと思うが、LHD はすでにかなり貢献していると思う。

(3) 大学の研究発展に寄与しているか

ヨーロッパ的視点からすれば、LHD は、優れた大学制度とのネットワーク化という意味で最も優れた例である。大学とは、科学分野であれ、技術／工学分野であれ、多数の共同プロジェクトを実施しているし、驚くほどの数の学生が LHD 計画に参加している。このように、大学共同利用機関として、LHD はその役割を極めてよく果たしている。

[4] (国際連携・共同研究の推進)

核融合科学研究の国際的 COE としての役割を果たす上で、LHD は十分な貢献をしているか

(1) 国際的な包括協定や機関間の学術交流協定などによる活動の中心として、LHD は成果をあげているか

NIFS は最近、実験分野における米国との協力関係をさらに継続することとした。結果、海外から来る共同研究者の数が大幅に増加した。これは、非常に評価されるべき取組みであり、可能ならもっと進められるべきである。ヨーロッパの研究機関との共同研究についても、延長されることとなった。責任分担が明らかになり、実験プロポーザルの提出手続方法が明確になった。LHD は、国際化に向け順調に進んでおり、これからもその道を歩んでいくべきである。LHD 計画は、外国からの研究者にテーマグループのリーダーを任せるということも、考慮するとよいだろう（もちろん NIFS への長期滞在が必要となるが）。

(2) ITER・BA 計画との連携、貢献を図っているか

ITERやBAへの支援では、LHDチームは最善を尽くしている。留意すべきは、装置を稼働させ、包括的な実験事業を実施するという事は、資源のほとんどを費やしてしまうため、多数の人員や資源を要するような貢献は、実質不可能であるということである。

[5] (人材育成)

長期にわたる核融合研究遂行のために必要となる、国際的視野を持つ人材育成に LHD は貢献できているか

LHD 計画に参加した学生の数はかなり多い。しかし頂いた情報では、実際に現場で研究した学生の割合、或いは LHD 特有の研究をした学生の割合、またはその他（有意義な）プラズマ物理の研究を行った学生の割合については、明確には分からなかった。比較的年の若い学生にも、テーマグループ（タスクフォース）のリーダーを務めさせる点は評価できる。NIFS がどの程度ポスドク専用プログラム（海外への長期滞在を含めた）を推進しているのかは、確信が持てなかった。私の意見だ

が、これは核融合サイエンスでのグローバルネットワークを発展させるために、こうした類の取組みは非常に重要な方法だと思う。ひとつの案として、もっとも有能な学生にフェロシップなど（所内での）賞を与え、海外への長期滞在が出来るようにする方法がある。どちらにしても、若手研究者の昇格および国際化に特化したプログラムは、極めて有用な取組みになると思われる。

[6] (将来計画)

今後の10年間程度を見越した LHD 計画は、第2期中期目標などを踏まえて、適切なものとなっているか

LHD の 2014 年度計画は志の高い、有意義なものである。計画にあるハードウェアの改良はもっともな取組みで、是非とも実行されなければならない。このようにして、LHD は今後も世界をリードするステラレータ装置として、その役目を果たしていくことができる。観点[1]でも述べた通り、主要となる課題は、定常（できれば高出力も）条件のもと、閉ヘリカルダイバータを含めた、オペレーションシナリオの統合を完成させることである。

炉の研究については、国際研究グループに積極的に参加し、LHD から得られたコンセプトや運転経験および実験データを用いて、そこに貢献していくとよいと思う。いずれにしても、ステラレータ／ヘリオトロンという存在は重要で、実証炉（DEMO）のためにも維持していかなくてはならない。2大 MCF での長短を徹底比較することができるためである。

資 料 編

平成23年度
大型ヘリカル装置（LHD）計画
報告書

平成24年2月

自然科学研究機構 核融合科学研究所

目 次

1. はじめに	1
1. 1 大型ヘリカル装置計画をとりまく核融合研究の環境の変化	2
1. 2 自然科学研究機構の中期目標・計画から	4
1. 3 大型ヘリカル装置計画における重点課題と計画概要	4
1. 4 前回の外部評価での提言への対応について	7
2. 大型ヘリカル装置計画研究実施体制	10
2. 1 ヘリカル研究部とプロジェクト体制について	10
2. 2 大型ヘリカル装置実験実施体制について	11
2. 2. 1 全体構成	11
2. 2. 2 実験研究体制	12
2. 2. 3 実験計画実施の流れ	14
2. 3 共同研究について	19
3. 大型ヘリカル装置計画の研究成果	24
3. 1 概要	24
3. 2 ミッションテーマ実験	29
3. 2. 1 高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善	29
3. 2. 2 高ベータ領域の拡大	35
3. 2. 3 高温定常プラズマ保持	41
3. 2. 4 高温領域の拡大	48
3. 3 物理テーマ実験	58
3. 3. 1 コアプラズマの熱・粒子輸送	58
3. 3. 2 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用	69
3. 3. 3 MHD 平衡と安定性	84
3. 3. 4 高エネルギー粒子の物理	93
3. 3. 5 波動加熱物理	103
3. 3. 6 LHD を用いた原子・分子過程研究	115
3. 4 装置工学実験	127
4. 実験環境の整備と拡充	134
4. 1 本体・加熱機器の整備・増強	135
4. 1. 1 本体関連機器	135
4. 1. 1. 1 超伝導コイルシステム	136
4. 1. 1. 2 閉構造ダイバータ	142

4. 1. 1. 3	燃料供給装置	148
4. 1. 2	加熱機器	154
4. 1. 2. 1	中性粒子ビーム入射加熱装置	154
4. 1. 2. 2	電子サイクロトロン共鳴加熱	164
4. 1. 2. 3	イオンサイクロトロン周波数帯加熱	171
4. 2	計測機器および理論・解析モデルの拡充	177
4. 2. 1	計測機器	177
4. 2. 1. 1	既設計測機器の高度化	177
4. 2. 1. 2	重水素実験に向けた計測機器の検討	182
4. 2. 2	理論・解析モデルの拡充	188
4. 2. 2. 1	MHD 平衡・安定性・非線形解析	188
4. 2. 2. 2	高エネルギー粒子解析	189
4. 2. 2. 3	運動論的輸送解析	191
4. 2. 2. 4	流体乱流輸送解析	193
4. 2. 2. 5	周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用の研究	194
4. 2. 2. 6	統合輸送解析コードの開発と LHD 実験への適用	195
4. 2. 2. 7	プラズマシミュレータ中間レベルアップ	197
5.	共同利用・共同研究の推進	198
5. 1	一般共同研究・LHD 計画共同研究・双方向型共同研究	198
5. 2	広い分野との連携による学際的展開	200
6.	国際的 COE としての国際連携・共同研究の推進	203
6. 1	国際共同研究	203
6. 2	ITER/BA 計画への連携及び貢献	205
7.	人材育成	209
8.	将来計画	211
9.	まとめ	213

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: 以下、LHD と呼ぶ) 計画は、核融合研究コミュニティの議論に基づき、昭和 61 年の学術審議会特定研究領域推進分科会核融合部会における報告により、大学における次期大型装置として指定され、その推進母体となる大学共同利用機関である核融合科学研究所の設立と合わせて始められた。そこでは、我が国独自のアイデアであるヘリオトロン型磁場を用いた世界最大の超伝導ヘリカル装置を建設し、世界に先駆けてヘリカル方式の炉心プラズマのために重要な物理的、工学的研究課題を解明することが目的とされた。

LHD は 8 年の建設期を予定通りに完遂し、平成 10 年より運転を開始した。以来 14 年間にわたって順調に稼働し、大学共同利用機関の共同利用装置として核融合研究および関連研究分野の研究者コミュニティの共同研究に供されている。LHD は世界有数の大型核融合装置であるが、その発想、建設から現在の実験に至るまで、共同利用・共同研究がその遂行基盤となってきた。そこでは、ボトムアップによる研究の積み上げが計画を推進させてきた。平成 16 年度の法人化により、核融合科学研究所は大学共同利用機関法人・自然科学研究機構の一員として共同利用・共同研究の推進に一層の努力を払うことが求められることとなった。法人は 1 期 6 年の中期目標に向かい、定めた中期計画に沿って活動を行う。この中で、LHD は中核装置として位置づけられている。このような背景の中、法人化後 3 年目の平成 19 年度に第 1 期の中期計画における LHD の進捗を評価いただいた。この評価の提言を活かし、LHD 計画を進めてきており、中期計画は平成 22 年度より、第 2 期に入った。

核融合科学研究所では、核融合原型炉に向けた学理の体系化を加速するために、平成 22 年度より、組織体制にプロジェクト制を導入した。すなわち、大型ヘリカル装置計画、数値実験研究、核融合工学研究と連携研究である。研究者のライン組織は単一のヘリカル研究部に一本化され、責任体制を明確にするとともに、プロジェクトでは研究者の自発的参加と適材適所、臨機応変な研究グループ体制を横断的に構成することが容易となった。この新しい体制によって、研究活動をより活性化させつつあると考えられる。今回、前回の評価より 4 年という一定の期間が過ぎ、その評価が活かされ、また新しいプロジェクト体制が有効に機能しているかを、評価をいただくことによって、LHD 計画の方向性を確認するものである。

本報告書は、前回評価をいただいた平成 19 年度から現在までの研究成果および研究環境整備を中心にまとめたものである。特に、この 2 年程度の進捗と状況を重点的に述べるとともに、第 2 期の中期計画にも謳われている「LHD の性能を最大限に発揮させる」ための取り組みについても述べる。国内共同利用・共同研究、国際共同研究、連携研究については LHD 計画を評価する上で、極めて重要であるが、これらの項目は核融合科学研究所の活動として昨年度に評価をいただいたことから、今回は LHD 計画に特化して顕著なもの、及びこの 1 年の進展についてを、取り上げることとさせていただく。

ITERの稼働に向けて参加極による大きな努力が払われると同時に、原型炉（DEMO）に向けた戦略が世界的に議論されるようになりつつある。そこでは、定常性がこれまで以上に鍵となってきている。我が国においては、JT-60SAの稼働開始までの数年間はLHDが唯一の大型実験装置である。このため、このような時代の中、LHD計画が果たす役割と、可能性に対する期待は大きいものと考えられる。

1. 1 大型ヘリカル装置計画をとりまく核融合研究の環境の変化

平成19年度以来、核融合研究を含む大型科学研究が、国等において広く審議されるようになってきている。これにより、大型ヘリカル装置計画をとりまく核融合研究の環境も変化をし、またこれから変化を求められるものと考えられる。ここでは、評価に当たっての時代背景として、要点を述べる。

1) 総合科学技術会議における科学技術基本計画

科学技術基本計画は5年毎に見直され、平成23年度より第4期の計画が開始されたところである。この第4期科学技術基本計画は平成22年末までに策定されたところであったが、3月11日の東日本大震災及び福島第一原発事故を受けて見直しがなされた。核融合研究については、III. 我が国が直面する重要課題への対応 2. 重要課題のための施策の推進 (4) 国家存立の基盤の保持 i) 国家安全保障・基幹技術の強化 の中に以下のように記載されている。

「核融合の研究開発については、エネルギー政策や原子力政策と整合性を図りつつ、同時に、その技術の特性、研究開発の段階、国際約束等を踏まえ、これを推進する。」

2) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 核融合研究作業部会

平成19-20年度の第4期科学技術・学術審議会のもとでは、核融合研究の推進に必要な人材の育成・確保について議論が重ねられ、平成20年7月にこれに関する報告書が出された。ここではLHD計画に関する特記はない。その後、平成21-22年度の第5期では原型炉に向けた取り組みの在り方が議論され、平成23年1月に平成23-24年度の第6期への申し送りとなる審議メモがまとめられた。ここでは、「LHD計画（ヘリカル方式）による核融合研究の現状と課題」として以下の記載がなされている。

「ヘリカル方式は本質的に定常運転に優れた概念である。超伝導コイルを有した大型ヘリカル装置（LHD）という実験設備と、実施主体である核融合科学研究所の大学共同利用機関としての共同利用・共同研究という手法の特徴を活かして、特に、プラズマの定常性に関わる学理の構築を図っている。JT-60SAの稼働までは、国内唯一の大型実験装置であり、我が国の磁場閉じ込め物理研究における国際的リーダーシップと人材育成を確保するために果たす役割は極めて大きいものがある。LHDを用いた研究によって原型炉開発の可能性を追求するためには、より核融合条件に近い高性能の

定常プラズマを実現することが必要であり、今後、ダイバータ改造による熱粒子制御の向上や重水素の使用のための実験設備の拡充と定常及び安定性に関する学術的に重要な課題の解明に一層の努力を払う研究展開が必要である。また、ヘリカル方式のみならずトカマク方式をも包含する環状プラズマの総合的理解を深め、炉型式によらない学術体系としての知的ベースをITERやJT-60SAの事前検討から第四段階へ進む判断のために提供することが求められる。」

第6期では第5期に引き続き、主に、原型炉概念の構築と設計作業を今後どのように行っていくことが望ましいのか、について総合的に審議していくこととなっている。

3) 文部科学省 科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

学術研究の大型プロジェクトを実行施策とするための筋道を、透明性を持って示すために、この作業部会が平成21年度に設けられた。ここでは、後述する日本学術会議がコミュニティからの提案を純粹に科学的見地から評価し、提示した「マスタープラン」43計画を、日本学術会議の評価に加えて、緊急性、戦略性、社会や国民の理解の観点からも再評価し、その優先度を議論した。LHD計画については、日本学術会議の提言にある「大学共同利用機関等を中心とする「ボトムアップ型大型計画」と、独立行政法人研究開発機関などを中心とする国策的な「トップダウン型大型計画」のバランスの良い資源投資と総合的推進による我が国の学術の強化をはかる」からの要請により、JT-60SA計画と合同した「高性能核融合プラズマの定常実証研究」の提案とし、マスタープラン43計画に選ばれている。当作業部会の審議の結果は報告書「学術研究の大型プロジェクトの推進について（審議のまとめ）」－学術の研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想「ロードマップ」の策定－（平成22年10月27日）にまとめられている。この報告にあるとおり、「高性能核融合プラズマの定常実証研究」計画は基本的な要件が満たされており、一定の優先度が認められる計画（18計画）の一つに選ばれた。ここでの主な課題・留意点等として以下があげられている。

- ・核融合科学研究所と日本原子力研究開発機構との協力体制を強化するとともに、ITERも含めた長期的な見通しと総合的な戦略を明確にする必要がある。

- ・巨費を投じてきた成果がいつ確実に出るのか疑問が残る。

- ・さらなる基礎的研究の重要性について社会や国民の理解を得る工夫が必要である。

当作業部会では、すでにロードマップに上げられた計画については、再評価はしないが、フォローアップのための進捗状況の確認をする予定である。

4) 日本学術会議

学術の大型計画の継続的推進が緊急の課題であることを捉え、学術の大型計画のマスタープラン策定と科学的評価に基づく推進策の構築等を提言として、「学術の大型施設計画・大規模研究計画－企画・推進策の在り方とマスタープラン策定について－（平成22年3月17日）がまとめられた。マスタープランのリストアップの基準は

①定義、②予算、③科学的目標、④国際的水準・国際連携、⑤研究者コミュニティの合意、⑥計画の実施主体、⑦共同利用体制、⑧計画の妥当性・透明性、である。

審議の結果、43 計画がリストアップされた。上述されたように、LHD 計画と JT-60SA 計画からなる「高性能核融合プラズマの定常実証研究」はこの中に入っている。

日本学術会議では平成 23 年度にこのマスタープランの小改訂（マスタープラン 2011 平成 23 年 9 月 28 日）を行ったが、当該計画については、変更はなかった。平成 24 年度に大改訂が行われる予定である。

1. 2 自然科学研究機構の中期目標・中期計画から

平成 22 年度から 27 年度の第 2 期中期計画期間において、自然科学研究機構の中期目標では、LHD 計画固有の記載はないが、核融合科学研究所が担う「核融合科学分野では、我が国における核融合科学の中核機関として、大学や研究機関と共に核融合科学及び関連理工学の学術的体系化と発展を図る。環境安全性に優れた制御熱核融合の実現に向けて、大型の実験装置や計算機を用いた共同研究から、国際協力による核融合燃焼実験への支援までを含む日本全体の当該研究を推進する。」を達成するための中核となることは自明である。

また、この目標を達成するための中期計画にあっては、「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」として、以下を掲げている。

「大型ヘリカル実験装置（LHD）の性能を最大限に発揮させ、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解に向け共同研究を活用し、学術研究を行う。このため、プラズマ制御、加熱及び計測機器の整備を進め、核融合炉を見通すことができる高性能プラズマを実現する。」

さらに、「共同利用・共同研究の内容・水準に関する目標を達成するための措置」として、以下を掲げている。

「LHD による高性能プラズマ実験、大型計算機システムによる大規模シミュレーション及び炉工学研究の高度な共同利用・共同研究を推進する。双方向型共同研究を、東北大学や富山大学の参画を得て拡充し、推進する。」

1. 3 大型ヘリカル装置計画における重点課題と計画概要

LHD 計画は平成 10 年の実験開始以来、14 年間順調に稼働し、この間 11 万回を超えるプラズマ放電を実施し、これを共同研究に供してきた。大型核融合実験装置では例のない、極めて高い頻度および稼働率の実績を示しており、これは超伝導システムをはじめとした高度な信頼性を有する装置工学および、閉じ込めに正味プラズマ電流を必要としないヘリカル方式が本来持つ物理特性によるものである。この特長は多くの研究機会を計画通りに共同研究者に提供することにつながっている。

LHD 計画はヘリカル方式の炉心プラズマのために重要な物理的、工学的研究課題を

解明することを目的とし、この解明を通じた学術研究の体系化により、トカマク方式をも包含したトロイダルプラズマの総合的理解を目指している。LHD 計画発足時に設定された重点研究課題は、今も成果を評価するに当たって基本とすべきものと考えられる。

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

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

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

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

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

これらの重点課題に取り組むため、装置に求める主たるパラメータの目標は表 1.3-1 に示されるように設定された。計画発足時所期目標と、前回平成 19 年度の評価時のパラメータおよび現在の達成されているパラメータとを合わせて示す。

表 1.3-1 装置パラメータ

装置		所期目標	平成 19 年度	現在
超伝導コイル		3.0T (R=3.9m)	2.9 T (R=3.6m)	2.96 T (R=3.6m)
加熱装置	中性粒子加熱装置	15MW	接線入射(180keV) 3基 14 MW 垂直入射(40keV) 1基 7 MW	接線入射(180keV) 3基 16 MW 垂直入射 (40-50keV) 2基 13 MW
	電子サイクロトロン共鳴加熱	3MW	9系統 2.1 MW 周波数 77,82.7,84,168GHZ	9系統 3.7 MW 周波数 77,82.7, 84 GHz
	イオンサイクロトロン共鳴加熱	10MW	6系統 2.7MW 周波数 25-100MHz	4系統 2 MW 周波数 25-100MHz

また、重点課題に対応するために求められるプラズマ性能についても同様に目標が設定された。これらについて、計画発足時の所期目標と、前回平成 19 年度の評価時のパラメータおよび現在の達成されているパラメータとを合わせて表 1.3-2 に示す。

表 1.3-2 プラズマパラメータ

	所期目標	平成 19 年度 (第 11 サイクル)	平成 23 年度 (第 15 サイクル)
核融合三重積(keV $10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}$) (中心イオン温度(keV) (中心密度(10^{19}m^{-3}) (エネルギー閉じ込め時間(s)))	5-20	4.4 (0.85) (46) (0.11)	5.2 (0.55) (40) (0.23)
中心イオン温度(keV) (密度(10^{19}m^{-3}))	10 (2)	5.2 (1.8)	7 (1.5)
中心電子温度 (密度(10^{19}m^{-3}))	10 (2)	10 (0.5)	20 (0.2)
β 値 (%) (磁場(T))	5 (1-2)	5.0(0.425)	5.1 (0.425) 4.1 (0.75) 3.4 (1)
放電保持時間(s) (加熱パワー(kW))	3,600 (3000)	3,900 (110) 3,268 (500) 1,905 (680) 800 (1,000)	←

これらの高性能プラズマを対象として、目的を達成するための研究を進めるために、プラズマ性能を拡大することを主眼としたミッションテーマ、得られたデータを基に物理の体系的理解を進めるための物理テーマ、そして大型超伝導装置を用いた工学テーマからなるテーマグループ体制を採用している。これらのテーマは一般共同研究公募のカテゴリーと1対1に対応させており、実験の進展やコミュニティからの期待を合わせて、2年毎に見直しを行っている。平成19年度と現在のテーマグループのカテゴリーを表1.3-3に示す。

実験テーマグループは一般共同研究の申請カテゴリーと一致させており、この公募による共同研究申請と所内からの実験提案書による申請の内容と、実行可能性を考慮して、採択されたものが各実験テーマグループに割り当てられる。実験テーマ数は平成19年度に220件であったものが、平成23年度は267件まで増加している。

表 1-3.3 実験テーマグループ

年度 (サイクル)	平成 19 年度 (第 11 サイクル)	平成 23 年度 (第 15 サイクル)
ミッション テーマ	高蓄積エネルギー、高密度、ローカル アライントダイバータを用いた閉じ込め 改善	高密度プラズマとダイバータによる 閉じ込め改善
	高ベータ領域の拡大	高ベータ領域の拡大
	定常プラズマ保持と高性能化	高温定常プラズマ保持
	高イオン温度領域の拡大	高温領域の拡大
物理テーマ	コアプラズマの熱・粒子輸送	コアプラズマの熱・粒子輸送
	周辺プラズマの物理とプラズマ・ 壁相互作用	周辺プラズマの物理とプラズマ・ 壁相互作用
	MHD 平衡と安定性	MHD 平衡と安定性
	高エネルギー粒子の物理	高エネルギー粒子の物理
	波動物理	波動物理
		LHD を用いた原子・分子過程実験
工学テーマ	装置工学実験	装置工学実験

1. 4 前回の外部評価での提言への対応について

平成 19 年度の評価においてなされた提言は、その後の LHD 計画において留意し、対応をはかっている。個別事項の詳細は後述の研究成果および実験環境の整備・拡充の項で述べるが、ここで、概要と方向性を示しておく。

提言（1）今回の LHD 研究の評価において、現在の LHD のプラズマパラメータは大型トカマク装置と比較・対照できるレベルに到達し、その研究成果には、当初の期待に沿うもの、もしくは期待以上のものがあると評価された。この評価を踏まえ、第 2 期中期計画においては、加熱装置を増強し、閉ダイバータを実装して重水素計画を予定どおり推進し、プラズマ性能のさらなる向上を目指して欲しい。また、より高密度・高温条件下での定常実験を期待する。

対応：平成 19 年度以降、垂直 NBI 1 基を整備し、平成 21 年度より稼働を始めた。現在、ヘリカル系プラズマの点火を確信させるに足る高いイオン温度のプラズマの研究に最優先事項として取り組んでおり、イオンの加熱に有利な比較的加速エネルギーの低い垂直 NBI を整備したものである。これにより、NBI の総加熱パワーは 29MW ととな

り、平成 23 年度には 7 keV を越えるイオン温度を達成することができた。ECH も 77GHz の新規ジャイロトロンへの移行を筑波大学と協力して進めており、電力、パルス幅とも進展を図ることができている。ICH については、定常運転時の健全性を高めるために、アンテナを主としたシステムを改造することとし、平成 20 年度と 21 年度はその設計および R&D と製作に専念した。平成 21 年度から改良された波数制御可能なアンテナの運転を開始し、高密度での良好な加熱などが確認されてきている。ダイバータについては、閉構造ダイバータへの移行を段階的に進めている。ローカルアイランドダイバータによる知見を活かし、3次元数値計算を駆使して、閉構造ダイバータの構造を設計し、平成 22 年度の実験において、トロイダル周期全 10 セクション中の 2 セクションのトーラス内側にプロトタイプとしてのバッフル構造を設ける改造の効果の検証を行った。設計通りの中性ガスの圧縮が得られた。これにより、平成 24 年度の実験では閉構造ダイバータを 8 セクションに設け、内蔵クライオポンプによる排気についても試験的な運用を開始する予定である。定常実験については、平成 19 年度からここでの主力加熱装置である ICH の改良に入ったことから、新しい記録の更新はないが、改良 ICH アンテナシステムの性能が確認され、その拡充を進めていること、ECH についても 77GHz ジャイロトロン及び、熱粒子制御のための閉構造ダイバータが整備されつつあることから、1 MW を越える定常実験に本格的に取り組める環境が整ってきていると言える。

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

対応：昨年度の共同研究を対象とした評価において、「共同研究の枠組みは、若手研究者が取り組む課題を提供し、年間数百件の学位論文に寄与する等若手人材育成に大きく貢献している。これらの点において、極めて高く評価できる。」とされている。平成 23 年度に LHD 計画に一般共同研究および LHD 計画共同研究などによって参画している学生は正味 183 名となっており、さらに世界最先端の研究環境を教育に広く利用するための取組を進めている。

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

対応：核融合科学研究所では LHD 計画に数値実験研究と核融合炉工学研究のプロジェクトを組み合わせることによって、2020 年代の初頭に核融合原型炉建設の判断に足る

科学的知見と基盤をもたらすことを目指している。この中で、LHD は中核となるプラットフォームである。平成 19 年度以降、設備を整備し、プラズマ性能の向上を図るとともに、様々なプラズマ物理を中心とした研究を推進している。例えば、ヘリカル系に固有と考えられていた磁場の 3 次元性は今や、トカマクにおいても必要不可欠な条件となりつつあり、多様かつ精度に優れたツールやモデルの研究開発を進めてきた LHD 計画はこの 3 次元プラズマ物理に決定的な貢献ができるし、しなければならないと考えている。また、非常に堅牢な超高温プラズマが定常に用意されることから、これを光源として用いる学際的な研究も展開を見せつつある。

2. 大型ヘリカル装置計画研究実施体制

2. 1 ヘリカル研究部とプロジェクト体制について

核融合科学研究所における研究者の組織は従来、複数の研究部、センターに分かれており、専門的な研究を推進するには適した研究体制と言えたが、個々の成果を互いに協力して体系化を図るためには必ずしも適していなかった。今後の LHD 計画の飛躍的な展開、さらには原型炉建設に向けた工学分野における学術研究の総合的推進等に対応するため、平成 22 年度より、図 2.1-1 に示すように研究部、センターを一つの研究部に統合し、機動的に動くことができる研究体制とした。研究部は、専門が近い研究者からなる七つの研究系と六ヶ所研究センターで構成し、LHD 実験、数値炉に向けた研究、工学研究及び連携研究は、プロジェクトとして、各系から研究者が参加することにより推進するものとなっている。研究系を縦系に例えると、プロジェクトが横系となり、ハードウェアやソフトウェアの開発とその保守、そして安全についての確固とした責任体制と流動する研究に対応する柔軟性を両立できる。この体制により、新規のプロジェクトを立ち上げることも容易となり、機動的に研究所の研究を発展させていくことができると考えられる。

大型ヘリカル装置(LHD)計画にあっては、研究総主幹が研究を総括し、実験統括主幹がハードウェアの整備・運転を統括することによって、プロジェクトの円滑な遂行を図ることとしている。

研究所の新しいプロジェクト体制によって LHD 計画にあっては、これまで取ってきたテーマグループ体制をさらに機動的かつ柔軟に活用できるようになったと考えられる。実験提案数は平成 19 年度の 220 件から平成 23 年度には 267 件に増えたことは、このテーマグループ体制がより有効に働いたことが一因と考えられる。一方、限られたマシンタイムの中で効率よく実験を遂行し、成果を上げるためにはテーマグループリーダーのより強いリーダーシップが求められる。新しいプロジェクト体制は研究系の枠を越えて構成されることから、実験提案調整での競争的な考えを持ち込むことがより容易になり、テーマグループリーダーのリーダーシップの強化につながっていると考えられる。また、研究系を越えた新しいテーマの創出も促進され、平成 22 年度から新たに LHD プラズマを光源として用いた原子分子過程テーマを発足させることができ、幅広い共同研究が促進されている。また、プロジェクト体制によって、他の数値実験プロジェクト及び炉工学プロジェクトとの間において、研究のシーズとニーズの定義を明らかにすることができるようになってきている。これにより、問題解決に向けて、効率よく研究体制を運営し、研究を遂行できるようになりつつある。

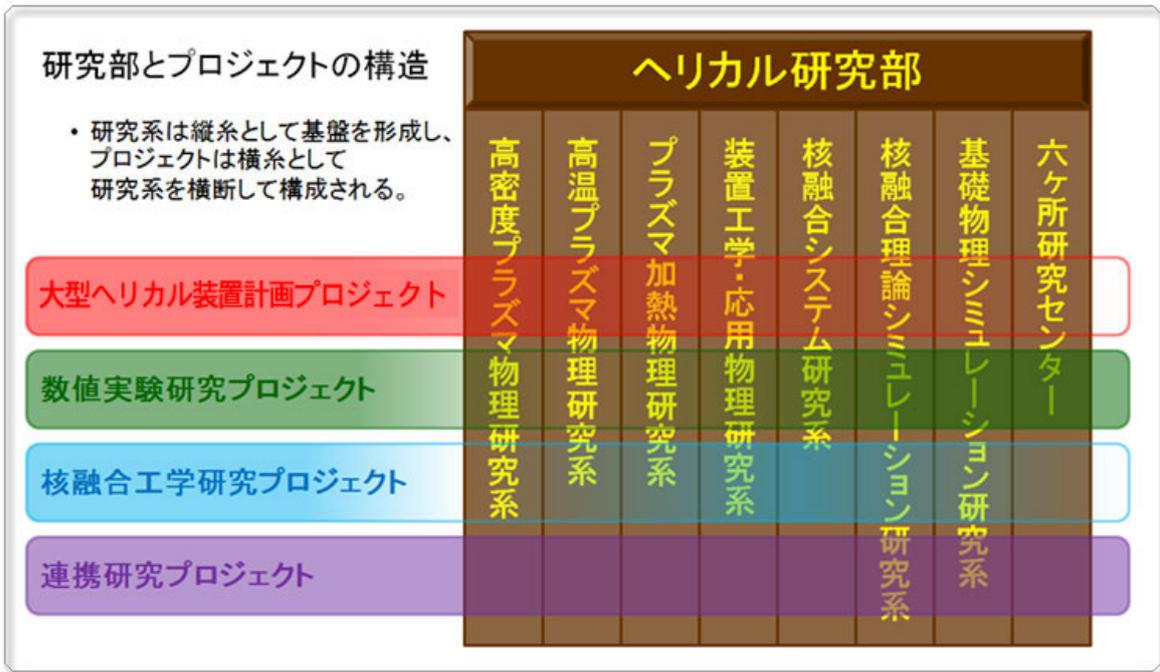


図 2.1-1 平成 22 年度からの核融合科学研究所の研究体制

2. 2 大型ヘリカル装置実験実施体制について

2. 2. 1 全体構成

LHD 計画では、LHD 実験会議がその運営責任を担っている。図 2.2.1-1 に LHD 実験の体制を示す。LHD 実験会議は LHD 実験計画研究総主幹が議長を務め、メンバーは 10 名程度の実験責任者 [LHD の実験を担当する研究総主幹、実験統括主幹、研究主幹および実験遂行を主導する職務上の代理 (以下、主幹代理)]、技術部長と 5 課長、核融合理論シミュレーション研究系研究主幹、安全衛生推進部長、そして所外の共同研究者と核融合研究コミュニティを代表する 8 名の所外の研究者からなっている。また、共同研究委員会をはじめとした所内の各種委員会と連携し、所の方針や規定に則って運営を行っている。運転期間中は週 1 回、保守期間中は隔週の開催を原則としている。

LHD の実験研究は LHD 実験グループが進めるが、そのマシンタイムを要求し、実験データにアクセスを許されるメンバーについては、公募による一般共同研究の大型ヘリカル装置(LHD)計画プロジェクトにある(1)大型ヘリカル装置(LHD)実験共同研究のカテゴリーへの申請、および毎実験サイクル前に行われる実験テーマ提案書の提出により、LHD 実験会議がその認定を行っている。平成 23 年度で言えば 436 名 (うち所外 330 名) である。

LHD の運転は研究所の担当機器を持つ研究教育職員、技術部職員、運転員からなる LHD 運転グループによって行われる。このグループはハードウェアの整備、建設にも

責任を持ち、実験統括主幹と技術部長がリーダーを務める。ハードウェアの整備に関わる調整のため、実験統括主幹が議長を務める LHD 装置技術連絡会議が基本的に毎週 1 回開催される。



図 2. 2. 1-1 LHD 実験実施体制

また、今後の中長期の高性能化のため機器整備の計画を進めるために、LHD 高性能化機器設計グループが運転グループと実験グループにまたがって構成されている。実験研究に関わる情報交換のため、毎週 1 回 LHD 実験グループ全体会議を開催している。

2. 2. 2 実験研究体制

LHD 実験会議では長期的なビジョンのもとに、中期計画に照らして、年度単位での目標と方向性を定め、これによりその年度の実験サイクルにおける実験課題の優先度を明確にし、実験グループメンバーに周知する。平成 23 年度は以下の通りである。

- バッフル構造ダイバータ特性の分析と評価（デタッチメントへの移行、長時間特性、ガス種の依存性について）
- 磁場強度 1 T においてベータ 4% の達成を目指す
- $n\tau T = 5 \times 10^{18} \text{ keV s m}^{-3}$ を 300 秒保持
- イオン温度 8,000 万度の達成

- 高イオン温度放電の劣化機構の解明
- イオン系輸送の非拡散特性に関する研究の高度化
- ダイバータ熱負荷軽減とデタッチメント遷移モデルの高度化
- 定常プラズマにおける熱・粒子バランス特性の分析と評価
- プラズマ対向材の損耗、堆積、水素蓄積及び輸送と磁場環境との関係性の同定
- プラズマ圧力や流れがもたらす磁場構造の変化の推定法の確立とその変化の閉じ込めとの関係性の同定
- 高速イオン閉じ込めに対するベータとMHD不安定性の影響同定と乱流の関与の探求
- ICH 励起波数制御による高ベータプラズマの電子加熱
- ECH 高調波加熱と EBW 加熱の最適化に向けた波動伝播・モード変換機構の分析と評価
- 高 Z 元素に関する原子物理学理論の検証と分光モデルの精度向上
- 超伝導システムの特理解とさらなる信頼性向上
- ◎ 上記の要素の相乗および統合によって成果を拡大し、研究を加速する。

これと同時に、研究課題を評価する際のイニシアチブとして(1)プラズマ性能の拡大、(2)新たな発見(発見は計画できないが、論理的に緻密な計画となっていること)、(3)現象の法則化(相関関係から因果関係への同定へ)、これらを支える(4)計測および理論モデルの精度の向上、を掲げている。

これらの前提に立ち、LHD 実験会議が共同研究あるいは実験テーマ提案として出された各研究課題を共通するテーマで分類し、そのテーマグループにマシンタイムを配分する。現場での実験研究の遂行はテーマグループが主導して行う。平成 22 年度からは、より効率的な実行を促すため、テーマ枠の中でも実験運転条件などについて親和性・相乗性が高いものを組み合わせ、実際の実験遂行時に 8 つのテーマ実施グループとして当たるよう構成した。研究面では 11 のテーマ枠が各々の目的・目標、戦略を持って進める。このテーマグループ体制は、多様な提案に対して、合理的に実験を推進するためのものである。同時に、所外の共同研究者にも研究課題をより明確に把握していただき、実験への参加がより円滑に行われることを念頭に置いている。テーマリーダーには、所外と所内の 2 人の方に共同リーダーとして当たっていただいている。所内・所外の共同研究者を問わず、全てのテーマ枠への参加の垣根はなく、研究者の発想に基づいて組織横断的に参加できるようになっている。研究課題の申請総数は、平成 23 年度は、267 件で、そのうち所外からの申請は 86 件であった。所内研究者の多くは複数の研究課題を申請しているため、実験参加者に占める実効的な所外からの寄与は 3/4 を越えている。表 2.2.2-1 に平成 23 年度のテーマグループ体制を示す。

表 2.2.2-1 平成 23 年度第 15 サイクル テーマグループ体制

	テーマG	実施G略称	共同リーダー		サブリーダー	担当実験責任者	
			所内リーダー	所外リーダー		正	副
1	高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善	高密度改善	森崎友宏	-	増崎貴	山田弘司	長山好夫 渡邊清政
2	高ベータ領域の拡大／MHD平衡と安定性	高ベータ	鈴木康浩	長崎百伸(京大)	榊原悟	川端一男	渡邊清政 田中謙治
3	高温定常プラズマ保持／波動加熱物理	定常・波動	熊沢隆平	出射浩(九大)	伊神弘恵	武藤敬 竹入康彦	下妻隆
4	高温度領域の拡大	高温	長壁正樹	村上定義(京大)	高橋裕己 山田一博	竹入康彦 川端一男	居田克巳 下妻隆
5	コアプラズマの熱・粒子輸送／LHDを用いた原子・分子過程研究	コア・原子分子	田村直樹	稲垣滋(九大)	村上泉 清水昭博	川端一男	居田克巳 田中謙治
6	周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用	周辺PWI	秋山毅	大野哲靖(名大)	芦川直子	山田弘司 竹入康彦	長山好夫
7	高エネルギー粒子の物理／波動加熱物理	高エネ・波動	磯部光孝	山本聡(京大) 出射浩(九大)	斎藤健二 西浦正樹	武藤敬	下妻隆 長壁正樹
8	装置工学実験	装置	カ石浩孝	-	濱口真司	今川信作	三戸利行

2. 2. 3 実験計画実施の流れ

実験期間は1年に1回であり、平成23年度は平成23年7月28日から同10月20日まで、正味51日の実験日であった。実験設備整備との関係で、実験期間は前後するが、全体としての実験計画実施の流れは、図2.2.3-1に示すとおりである。

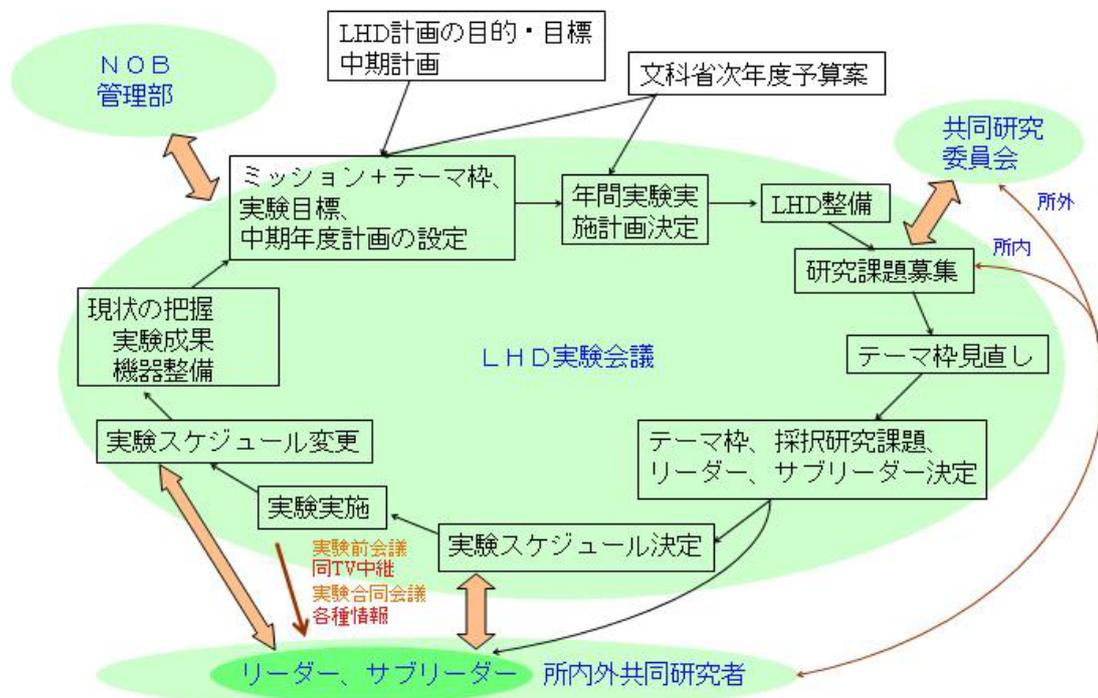


図 2.2.3-1 実験計画実施の流れ

LHD 実験会議において、実験研究計画と設備の保守・整備・運転計画の整合性を整え、年間の運転計画を立案する。図 2.2.3-2 に平成 23 年度の運転計画を示す。

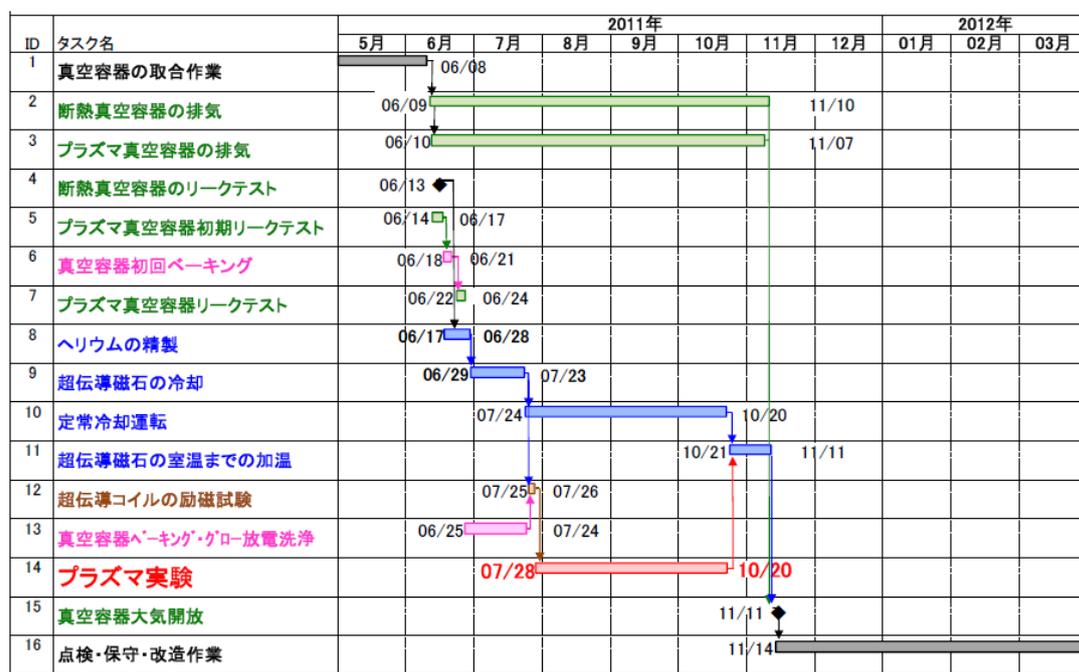


図 2.2.3-2 平成 23 年度第 15 サイクル実験運転計画

年度初めに、共同研究公募に加えて、研究所の研究者から、その年度の研究課題を募集し、応募のあった研究課題を LHD 実験会議が審議し、実施すべき研究課題を採択する。この採択された研究課題と、共同研究として所外から応募し、採択されたものをテーマグループへ割り振るとともに、テーマリーダー、サブリーダーの決定を行う。この際、人材育成として若手の登用や理論との交流促進に配慮している。このテーマグループとリーダーについては、研究の進展とコミュニティからの要請をもとにして、2年毎に見直しを行っている。テーマリーダーは、サブリーダーと協力して、担当しているテーマグループとしての年間実験計画を立て、LHD 実験会議にマシンタイムを要求する。LHD 実験会議は、最初に述べた優先度とイニシアチブに沿って全体的な整合性と合理性等に配慮して調整作業を行い、年間実験スケジュールを決定する。図 2.2.3-3 に平成 23 年度第 15 サイクル実験の実験計画を示す。

月	実験週	実験日	日程 種性	日	曜日	実験責任者	週間 リポート	加熱調整 (~12:15)	安定NBI (前半12:15-15:15、後半15:45-18:45)			実験条件	1. 実験 種性	2. 高磁 場	3. 高電 流	4. 高電 圧	5. コア・ 電子分子	6. 高電 圧	7. 高電 圧	8. 高電 圧		
									1. 高電 圧	2. 高電 圧	3. 高電 圧											
7月	第1週	1	高磁	7月21日	水	本倉		1. 高電圧調整	ボロナイゼーション													
		2	高電	7月22日	木	今村	三戸															
		3	高電	7月23日	金	今村	三戸															
		4	高電	7月24日	土	今村	三戸															
		5	高電	7月25日	日	今村	三戸															
		6	高電	7月26日	月	今村	三戸															
		7	高電	7月27日	火	今村	三戸															
		8	高電	7月28日	水	今村	三戸															
		9	高電	7月29日	木	今村	三戸															
		10	高電	7月30日	金	今村	三戸															
8月	第2週	1	高電	8月1日	土	今村	三戸															
		2	高電	8月2日	日	今村	三戸															
		3	高電	8月3日	月	今村	三戸															
		4	高電	8月4日	火	今村	三戸															
		5	高電	8月5日	水	今村	三戸															
		6	高電	8月6日	木	今村	三戸															
		7	高電	8月7日	金	今村	三戸															
		8	高電	8月8日	土	今村	三戸															
		9	高電	8月9日	日	今村	三戸															
		10	高電	8月10日	月	今村	三戸															
9月	第3週	1	高電	8月11日	火	今村	三戸															
		2	高電	8月12日	水	今村	三戸															
		3	高電	8月13日	木	今村	三戸															
		4	高電	8月14日	金	今村	三戸															
		5	高電	8月15日	土	今村	三戸															
		6	高電	8月16日	日	今村	三戸															
		7	高電	8月17日	月	今村	三戸															
		8	高電	8月18日	火	今村	三戸															
		9	高電	8月19日	水	今村	三戸															
		10	高電	8月20日	木	今村	三戸															
10月	第4週	1	高電	8月21日	金	今村	三戸															
		2	高電	8月22日	土	今村	三戸															
		3	高電	8月23日	日	今村	三戸															
		4	高電	8月24日	月	今村	三戸															
		5	高電	8月25日	火	今村	三戸															
		6	高電	8月26日	水	今村	三戸															
		7	高電	8月27日	木	今村	三戸															
		8	高電	8月28日	金	今村	三戸															
		9	高電	8月29日	土	今村	三戸															
		10	高電	8月30日	日	今村	三戸															

図 2. 2. 3-3 平成 23 年度第 15 サイクル実験計画

実験は、LHD 実験会議のメンバーである実験責任者が実験当日の安全や緊急対応に責任を持ち、テーマ枠のリーダーとサブリーダーがプラズマ放電条件の決定等に裁量と責任を持つことによって実施される。装置や実験条件の状況によって、前もって決められた年間スケジュール通りに実験を進められない場合には、LHD 実験会議において、所期の目標に照らし最も成果が上げられるように変更調整を行う。実験を行う前週の金曜 15 時までには、実験内容および磁場配位や必要な加熱等の機器、壁コンディショニングの条件などの詳細をテーマリーダーの責任のもとに Web を介して登録を行う。研究総主幹あるいは実験統括主幹がこの週間予定の内容を確認する。承認された週間予定表は前週の金曜の 16 時を目途に実験グループメンバーにメール等によって周知される。週間予定表の例を図 2. 2. 3-4 に示す。ここでは、あらかじめ通常範囲と定められた条件を越える特殊な実験条件（ヘリカルコイル電流が 11kA を越える高磁場や特殊な磁場配位、特殊な不純物の導入など）が必要な場合は、特殊実験申請を実施予定日の前々週までの LHD 実験会議に行い、そこで承認を受けている必要がある。

日	日	時刻	1日のスケジュール		実験 種別 (種別)	実験運行上の要求事項	担当者	特記事項
			ECH, NBI 調整 (~12:15)	安定NBI (12:15~18:45)				
10月17日	月	正午	Ti ターゲット	定常・波動 (11:00 ~ 18:45) ECH, NBI 高密度プラズマの長時間維持 磁場配位: (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.65m, +2.7123T, 1.2538, 100.0%) S (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, +2.736T, 1.2538, 100.0%)	He glow	定常・波動 13.0T での操作は ±0.01m の 精度で調整可能な 3分周期・24分周期 13.0T での調整可能な 3分周期・24分周期 13.0T での調整可能な 3分周期・24分周期 13.0T での調整可能な 3分周期・24分周期	【実験責任者】 武藤敬 / 下波隆 【NBI】 久保伸 【ガス・真空・低温】 B / C 【電子光学】 大塚 / 小嶋 【中性粒子】 大塚 / 小嶋 【検出器】 横田 / 小川 田中博 井上・中村 / 加藤 藤・森田 出射帯 【レーザーリーダー】 松尾隆平 伊藤弘孝	#4-148: プローブ挿入 #4-152: 材料移動実験 #4-153: プローブ挿入 #4-154: 共振器調整 #4-155: その他 #4-156: 材料移動実験 #4-157: 材料移動実験 #4-207: プローブ挿入 #4-209: 材料移動実験 #4-210: その他
10月18日	火	夜	なし	[両辺PW] (09:45 ~ 15:30) ECH, NBI 共振器調整を用いたデタッチメント実験 磁場配位: (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.8m, -2.6T, 1.2538, 100.0%) (1) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, -2.64T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, -2.64T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.85m, -2.57T, 1.2538, 100.0%)	He glow	[改善] (15:30 ~ 18:45) ECH, NBI バッフル構造ダイバータの特性 磁場配位: (1) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, -2.64T, 1.2538, 100.0%) (2) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, -2.75T, 1.2538, 100.0%) * R (1) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.7m, -2.67568T, 1.254, 57.0%)	【実験責任者】 山形浩一 / 藤山好夫 吉野 孝夫 中野 大 人谷 洋 大塚 / 小嶋 【電子光学】 大塚 / 小嶋 【中性粒子】 大塚 / 小嶋 【検出器】 横田 / 小川 田中博 井上・中村 / 加藤 藤・森田 出射帯 【レーザーリーダー】 松尾隆平 伊藤弘孝	#4-148: プローブ挿入 #4-152: 材料移動実験 #4-153: プローブ挿入 #4-154: 共振器調整 #4-155: その他 #4-156: 材料移動実験 #4-157: 材料移動実験 #4-207: プローブ挿入 #4-209: 材料移動実験 #4-210: その他
10月19日	水	正午	Ti ターゲット	[定常・波動] (09:30 ~ 15:15) ECH, NBI 高密度プラズマの長時間維持 磁場配位: (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.65m, +2.7123T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, +2.75T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, +1.375T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, +1.375T, 1.2538, 100.0%)	He glow	[コア・原子分子] (15:45 ~ 18:45) ECH, NBI ヘリウムと水素プラズマの輸送の違いに関する研究。ヘリウムプラズマにおける GAM spectroscopy、多粒子種混合プラズマにおける不純物挙動 磁場配位: (1) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, +2.75T, 1.2538, 100.0%) R (1) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, +1.375T, 1.2538, 100.0%)	【実験責任者】 田中 浩 【NBI】 久保伸 【ガス・真空・低温】 大塚 / 小嶋 【電子光学】 大塚 / 小嶋 【中性粒子】 大塚 / 小嶋 【検出器】 横田 / 小川 田中博 井上・中村 / 加藤 藤・森田 出射帯 【レーザーリーダー】 松尾隆平 伊藤弘孝	#4-148: プローブ挿入 #4-152: 材料移動実験 #4-153: プローブ挿入 #4-154: 共振器調整 #4-155: その他 #4-156: 材料移動実験 #4-157: 材料移動実験 #4-207: プローブ挿入 #4-209: 材料移動実験 #4-210: その他
10月20日	木	正午	Ti ターゲット	定常・波動 (09:30 ~ 18:45) ECH, NBI 高密度プラズマの長時間維持 磁場配位: (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.65m, +2.7123T, 1.2538, 100.0%) R S (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, +2.75T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, +2.736T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.75m, +1.375T, 1.2538, 100.0%) R (0) (Rax, Bt, γ, Bq) = (3.6m, +1.375T, 1.2538, 100.0%)	なし	【実験責任者】 武藤敬 / 下波隆 伊藤弘孝 田中博 B / C 大塚 / 小嶋 大塚 / 小嶋 横田 / 小川 田中博 井上・中村 / 加藤 藤・森田 出射帯 【レーザーリーダー】 松尾隆平 伊藤弘孝	#4-148: プローブ挿入 #4-152: 材料移動実験 #4-153: プローブ挿入 #4-154: 共振器調整 #4-155: その他 #4-156: 材料移動実験 #4-157: 材料移動実験 #4-207: プローブ挿入 #4-209: 材料移動実験 #4-210: その他	

B:真空 (林/土伏/小嶋) 低磁 (大場) C:真空 (鈴木/村濑) 低磁 (慶元)

図 2. 2. 3-4 週間予定表例

さらに、実験実施の前日 15 時までには実験条件およびその日の予定の詳細に加えて、当日の担当体制、安全体制を明らかにした実験予定表をレーザーリーダーの責任のもとに Web を介して登録を行う。当日の担当実験責任者がこの実験予定表の内容を確認する。承認されたものは前日の 16 時を目途に実験グループメンバーにメール等によって周知される。実験予定表の例を図 2. 2. 3-5 に示す。実験当日朝の実験前打ち合わせにおいて、この実験予定表に基づいて実施の確認を行う。

実験実施後は、原則的に翌日朝の実験前打ち合わせにおいて実験日誌により実施内容を紹介します。実験日誌はその報告日の 16 時を目途に、実験グループメンバーにメール等によって周知される。また、LHD 実験会議では実験日誌による報告に基づき、週間レポートを文書のみで一般の方も対象とした概要版と図も入れて研究者向けとした詳細版をとりまとめ、Web で遅滞なく公開するとともに、概要版は関係者および希望者にメールによって配信されている。

これら、実験予定の登録、閲覧については Web を用いてオンラインで操作ができる環境が整えられている。

プラズマ実験予定表

作成者
秋山毅志 田村直樹 秋山毅志 秋山毅志

実験日	本日の実験テーマ																								
2011年 10月18日(火)	高密度プラズマの長時間維持 ヘリウムと水素プラズマの輸送の違いに関する研究、多粒子種混合プラズマにおける不純物挙動 SDCプラズマの長時間維持 共鳴擾動磁場を用いたデタッチメント実験																								
実験番号	担当実験研究グループ					担当実験テーマリーダー					担当実験テーマリーダー														
794	高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善/周辺プラズマ物理とプラズマ・壁相互作用					[2194, 2337, 2146, 2189]					[2197, 2262, 2454, 2168, 2258]														
実験スケジュール	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22										
実験体制	(実験担当責任者) 山田弘司/長山好夫 [2200, 2153] (実験テーマ担当者) 記録確認																								
斜字は緊急時の役割 情報は2445へ																									
<table border="1"> <tr> <td>井上・中村/加藤・森 [2094/2312] 実験LAN</td> <td>横田/小川 [2095/2099] 中央制御</td> <td>吉村 泰夫 [2204] (ECH) 制御室連絡員A 外部との連絡</td> <td>中野 治久 [2209] (NBI) 制御室連絡員B 現場との連絡</td> <td>A/B [2200/2153] (ガス/ハフ・真空・低温) 電源系統把握</td> <td>大砂/小嶋 [2303/2481] (ターゲット処理) (放電洗浄) 現場責任者/本体運転員責任者(竹村) [2448] 現場連絡員/本体運転員</td> </tr> </table>																				井上・中村/加藤・森 [2094/2312] 実験LAN	横田/小川 [2095/2099] 中央制御	吉村 泰夫 [2204] (ECH) 制御室連絡員A 外部との連絡	中野 治久 [2209] (NBI) 制御室連絡員B 現場との連絡	A/B [2200/2153] (ガス/ハフ・真空・低温) 電源系統把握	大砂/小嶋 [2303/2481] (ターゲット処理) (放電洗浄) 現場責任者/本体運転員責任者(竹村) [2448] 現場連絡員/本体運転員
井上・中村/加藤・森 [2094/2312] 実験LAN	横田/小川 [2095/2099] 中央制御	吉村 泰夫 [2204] (ECH) 制御室連絡員A 外部との連絡	中野 治久 [2209] (NBI) 制御室連絡員B 現場との連絡	A/B [2200/2153] (ガス/ハフ・真空・低温) 電源系統把握	大砂/小嶋 [2303/2481] (ターゲット処理) (放電洗浄) 現場責任者/本体運転員責任者(竹村) [2448] 現場連絡員/本体運転員																				
実験手順の概要	<p>○実験内容、条件</p> <p>[高密度プラズマ保持/波動加熱物理](09:45 ~ 12:45) ECH, NBI 高密度プラズマをPICH-2MW, PECH-0.3MWの加熱入力で長時間維持(Heプラズマ) ne-1x1019m⁻³のプラズマを PECH-0.3MWの加熱入力で1分以上維持(Hプラズマ)、 NBIのサイクリック試運転 磁場配位: 1. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.65m, -2.7123T, 1.2538, 100.0%) R 2. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.6m, -1.375T, 1.2538, 100.0%)</p> <p>[コアプラズマの熱・粒子輸送](12:45 ~ 14:45) ECH, NBI 【ヘリウムと水素プラズマの輸送の違いに関する研究】 磁場配位: 1、ガス: He、要パイプガンベレット</p> <p>【多粒子種混合プラズマにおける不純物挙動】 磁場配位: 1、ガス: H, He、要TESPEL(T), AXUVD(3.5U, 40, 80), PHA, SOXMO5 磁場配位: 1. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.6m, -2.75T, 1.2538, 100.0%)</p> <p>[高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善](14:45 ~ 16:45) (1) 追加ベレットによるSDCプラズマの長時間維持 (2) 長時間放電中のダイバータ特性 (不純物挙動も含む) 磁場配位: 1. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.6m, -2.75T, 1.2538, 100.0%) 2. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.75m, -2.64T, 1.2538, 100.0%)</p> <p>[周辺プラズマ物理とプラズマ・壁相互作用](16:45 ~ 18:45) ECH, NBI 共鳴擾動磁場を用いたデタッチメント生成 磁場配位: 1. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.75m, -2.64T, 1.2538, 100.0%) 2. (Rax, Bt, y, Bq) = (3.8m, -2.6T, 1.2538, 100.0%)</p>															放射線担当 三宅 [2479]									
															実験開始条件										
															○励磁減磁 入室禁止 08:45 立上げ 09:00 立下げ 18:45										
															実験磁場										
															反転										
															コンディショニング										
															○前夜GD なし ○実験開始前 Ti ゲッター なし ○実験中 Ti ゲッター なし ○実験終了後GD なし ○ベーキング なし										
規制事項	<p>(1) 磁性体の持ち込み規制 (持ち込み書類による確認) (2) 夜間作業は原則22時まで 自記に作業名、氏名、入退室時刻記載</p>					<p>【特殊実験あり】 id-148 (小川 大) : プロープ挿入 id-152 (時谷 政行) : 試料駆動装置使用 id-153 (永岡 賢一) : プロープ挿入 id-164 (宮澤 順一) : 未登録の特殊磁場配位 id-165 (吉村 泰夫) : その他 id-196 (時谷 政行) : 試料駆動装置使用 id-197 (時谷 政行) : 試料駆動装置使用 id-207 (増崎 真) : プロープ挿入 id-208 (増崎 真) : 試料駆動装置使用 id-209 (増崎 真) : 試料駆動装置使用 id-210 (伊神 弘史) : その他、サブグループが必要</p>					<p>【注意】実験終了後、21:00以降は0.01mrad線量レベルあり 0.5mrad/分(21:00~21:30)の放射線量 0.5mrad/分(21:30~22:00)の放射線量(ガスが対じ切り)、水素SDC、水素ベレット 磁場配位中にコンタクシ3000時刻変更 ECH& NBI加熱 3分間隔 -592秒増減 -9922秒増減 3.0MWプラズマ コア・加熱炉内圧 1、炉内加熱時: 1.5MPa(20h, 100h, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100) 0.5h 411 MPa, 10h, 300 MPa, 30h 50 MPa プラズマ加熱時: 炉内加熱時炉内圧は、必ず加熱ター マ制御時に確認下さい。 炉内ヘリウムガス、高圧ポート漏れ、LE磁場 (<300A)、注液制御台、No.17, No.1 No.18, No.19, No.20, No.21, No.22, No.23, No.24, No.25, No.26, No.27, No.28, No.29, No.30 No.31, No.32, No.33, No.34, No.35, No.36, No.37, No.38, No.39, No.40, No.41, No.42, No.43, No.44, No.45, No.46, No.47, No.48, No.49, No.50, No.51, No.52, No.53, No.54, No.55, No.56, No.57, No.58, No.59, No.60, No.61, No.62, No.63, No.64, No.65, No.66, No.67, No.68, No.69, No.70, No.71, No.72, No.73, No.74, No.75, No.76, No.77, No.78, No.79, No.80, No.81, No.82, No.83, No.84, No.85, No.86, No.87, No.88, No.89, No.90, No.91, No.92, No.93, No.94, No.95, No.96, No.97, No.98, No.99, No.100, No.101, No.102, No.103, No.104, No.105, No.106, No.107, No.108, No.109, No.110, No.111, No.112, No.113, No.114, No.115, No.116, No.117, No.118, No.119, No.120, No.121, No.122, No.123, No.124, No.125, No.126, No.127, No.128, No.129, No.130, No.131, No.132, No.133, No.134, No.135, No.136, No.137, No.138, No.139, No.140, No.141, No.142, No.143, No.144, No.145, No.146, No.147, No.148, No.149, No.150, No.151, No.152, No.153, No.154, No.155, No.156, No.157, No.158, No.159, No.160, No.161, No.162, No.163, No.164, No.165, No.166, No.167, No.168, No.169, No.170, No.171, No.172, No.173, No.174, No.175, No.176, No.177, No.178, No.179, No.180, No.181, No.182, No.183, No.184, No.185, No.186, No.187, No.188, No.189, No.190, No.191, No.192, No.193, No.194, No.195, No.196, No.197, No.198, No.199, No.200, No.201, No.202, No.203, No.204, No.205, No.206, No.207, No.208, No.209, No.210, No.211, No.212, No.213, No.214, No.215, No.216, No.217, No.218, No.219, No.220, No.221, No.222, No.223, No.224, No.225, No.226, No.227, No.228, No.229, No.230, No.231, No.232, No.233, No.234, No.235, No.236, No.237, No.238, No.239, No.240, No.241, No.242, No.243, No.244, No.245, No.246, No.247, No.248, No.249, No.250, No.251, No.252, No.253, No.254, No.255, No.256, No.257, No.258, No.259, No.260, No.261, No.262, No.263, No.264, No.265, No.266, No.267, No.268, No.269, No.270, No.271, No.272, No.273, No.274, No.275, No.276, No.277, No.278, No.279, No.280, No.281, No.282, No.283, No.284, No.285, No.286, No.287, No.288, No.289, No.290, No.291, No.292, No.293, No.294, No.295, No.296, No.297, No.298, No.299, No.300, No.301, No.302, No.303, No.304, No.305, No.306, No.307, No.308, No.309, No.310, No.311, No.312, No.313, No.314, No.315, No.316, No.317, No.318, No.319, No.320, No.321, No.322, No.323, No.324, No.325, No.326, No.327, No.328, No.329, No.330, No.331, No.332, No.333, No.334, No.335, No.336, No.337, No.338, No.339, No.340, No.341, No.342, No.343, No.344, No.345, No.346, No.347, No.348, No.349, No.350, No.351, No.352, No.353, No.354, No.355, No.356, No.357, No.358, No.359, No.360, No.361, No.362, No.363, No.364, No.365, No.366, No.367, No.368, No.369, No.370, No.371, No.372, No.373, No.374, No.375, No.376, No.377, No.378, No.379, No.380, No.381, No.382, No.383, No.384, No.385, No.386, No.387, No.388, No.389, No.390, No.391, No.392, No.393, No.394, No.395, No.396, No.397, No.398, No.399, No.400, No.401, No.402, No.403, No.404, No.405, No.406, No.407, No.408, No.409, No.410, No.411, No.412, No.413, No.414, No.415, No.416, No.417, No.418, No.419, No.420, No.421, No.422, No.423, No.424, No.425, No.426, No.427, No.428, No.429, No.430, No.431, No.432, No.433, No.434, No.435, No.436, No.437, No.438, No.439, No.440, No.441, No.442, No.443, No.444, No.445, No.446, No.447, No.448, No.449, No.450, No.451, No.452, No.453, No.454, No.455, No.456, No.457, No.458, No.459, No.460, No.461, No.462, No.463, No.464, No.465, No.466, No.467, No.468, No.469, No.470, No.471, No.472, No.473, No.474, No.475, No.476, No.477, No.478, No.479, No.480, No.481, No.482, No.483, No.484, No.485, No.486, No.487, No.488, No.489, No.490, No.491, No.492, No.493, No.494, No.495, No.496, No.497, No.498, No.499, No.500, No.501, No.502, No.503, No.504, No.505, No.506, No.507, No.508, No.509, No.510, No.511, No.512, No.513, No.514, No.515, No.516, No.517, No.518, No.519, No.520, No.521, No.522, No.523, No.524, No.525, No.526, No.527, No.528, No.529, No.530, No.531, No.532, No.533, No.534, No.535, No.536, No.537, No.538, No.539, No.540, No.541, No.542, No.543, No.544, No.545, No.546, No.547, No.548, No.549, No.550, No.551, No.552, No.553, No.554, No.555, No.556, No.557, No.558, No.559, No.560, No.561, No.562, No.563, No.564, No.565, No.566, No.567, No.568, No.569, No.570, No.571, No.572, No.573, No.574, No.575, No.576, No.577, No.578, No.579, No.580, No.581, No.582, No.583, No.584, No.585, No.586, No.587, No.588, No.589, No.590, No.591, No.592, No.593, No.594, No.595, No.596, No.597, No.598, No.599, No.600, No.601, No.602, No.603, No.604, No.605, No.606, No.607, No.608, No.609, No.610, No.611, No.612, No.613, No.614, No.615, No.616, No.617, No.618, No.619, No.620, No.621, No.622, No.623, No.624, No.625, No.626, No.627, No.628, No.629, No.630, No.631, No.632, No.633, No.634, No.635, No.636, No.637, No.638, No.639, No.640, No.641, No.642, No.643, No.644, No.645, No.646, No.647, No.648, No.649, No.650, No.651, No.652, No.653, No.654, No.655, No.656, No.657, No.658, No.659, No.660, No.661, No.662, No.663, No.664, No.665, No.666, No.667, No.668, No.669, No.670, No.671, No.672, No.673, No.674, No.675, No.676, No.677, No.678, No.679, No.680, No.681, No.682, No.683, No.684, No.685, No.686, No.687, No.688, No.689, No.690, No.691, No.692, No.693, No.694, No.695, No.696, No.697, No.698, No.699, No.700, No.701, No.702, No.703, No.704, No.705, No.706, No.707, No.708, No.709, No.710, No.711, No.712, No.713, No.714, No.715, No.716, No.717, No.718, No.719, No.720, No.721, No.722, No.723, No.724, No.725, No.726, No.727, No.728, No.729, No.730, No.731, No.732, No.733, No.734, No.735, No.736, No.737, No.738, No.739, No.740, No.741, No.742, No.743, No.744, No.745, No.746, No.747, No.748, No.749, No.750, No.751, No.752, No.753, No.754, No.755, No.756, No.757, No.758, No.759, No.760, No.761, No.762, No.763, No.764, No.765, No.766, No.767, No.768, No.769, No.770, No.771, No.772, No.773, No.774, No.775, No.776, No.777, No.778, No.779, No.780, No.781, No.782, No.783, No.784, No.785, No.786, No.787, No.788, No.789, No.790, No.791, No.792, No.793, No.794, No.795, No.796, No.797, No.798, No.799, No.800, No.801, No.802, No.803, No.804, No.805, No.806, No.807, No.808, No.809, No.810, No.811, No.812, No.813, No.814, No.815, No.816, No.817, No.818, No.819, No.820, No.821, No.822, No.823, No.824, No.825, No.826, No.827, No.828, No.829, No.830, No.831, No.832, No.833, No.834, No.835, No.836, No.837, No.838, No.839, No.840, No.841, No.842, No.843, No.844, No.845, No.846, No.847, No.848, No.849, No.850, No.851, No.852, No.853, No.854, No.855, No.856, No.857, No.858, No.859, No.860, No.861, No.862, No.863, No.864, No.865, No.866, No.867, No.868, No.869, No.870, No.871, No.872, No.873, No.874, No.875, No.876, No.877, No.878, No.879, No.880, No.881, No.882, No.883, No.884, No.885, No.886, No.887, No.888, No.889, No.890, No.891, No.892, No.893, No.894, No.895, No.896, No.897, No.898, No.899, No.900, No.901, No.902, No.903, No.904, No.905, No.906, No.907, No.908, No.909, No.910, No.911, No.912, No.913, No.914, No.915, No.916, No.917, No.918, No.919, No.920, No.921, No.922, No.923, No.924, No.925, No.926, No.927, No.928, No.929, No.930, No.931, No.932, No.933, No.934, No.935, No.936, No.937, No.938, No.939, No.940, No.941, No.942, No.943, No.944, No.945, No.946, No.947, No.948, No.949, No.950, No.951, No.952, No.953, No.954, No.955, No.956, No.957, No.958, No.959, No.960, No.961, No.962, No.963, No.964, No.965, No.966, No.967, No.968, No.969, No.970, No.971, No.972, No.973, No.974, No.975, No.976, No.977, No.978, No.979, No.980, No.981, No.982, No.983, No.984, No.985, No.986, No.987, No.988, No.989, No.990, No.991, No.992, No.993, No.994, No.995, No.996, No.997, No.998, No.999, No.1000</p>														

図 2.2.3-5 実験予定表例

2. 3 共同研究について

計測機器、マシンタイム、実験条件等によっては、提案された研究課題が実行できない場合もある。実験環境の理解をいただくために「大型ヘリカル装置実験資料集」が

http://www.lhd.nifs.ac.jp/lhd/databook_2009/LHD_technical_guide2009/

から閲覧及びダウンロードができるようにしている。この資料集は平成 23 年度末に 2 年半ぶりの改訂をする予定である。

また、所外研究者が新規に申請される場合、応募前に所内世話人と十分相談できる体制を整えている。また、LHD 実験の実施に責任を持つ「LHD 実験会議」では、共同研究委員会での採択の参考となるように、申請書を事前に検討し、実験可能であるか否か等のコメントを追記するようにしている。

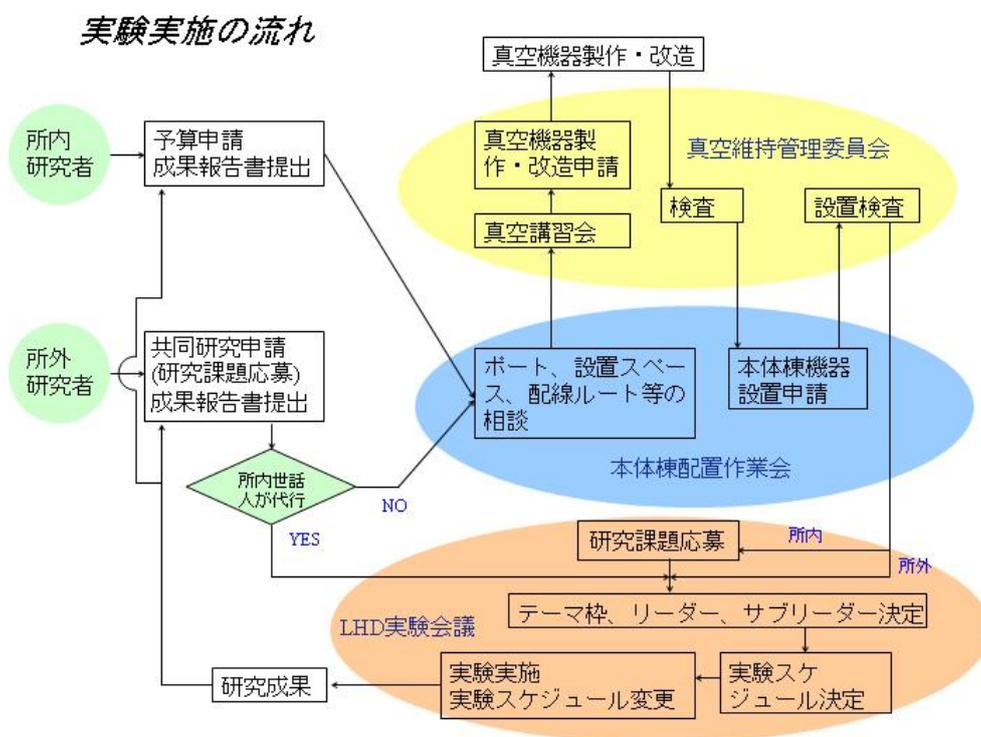


図 2.3-1 実験機器取り付け手順

ハードウェアの設置を伴う共同研究の準備に当たっては、所内所外、国内国外の研究者を問わず、同一の規定が設けられている。特に真空に関わる計測機器等の取り付けを希望する場合には、必要な確認と許可を得る必要がある。些細なミス一つでも、LHD が長時間止まる可能性があるため、ポートの使用、機器の設置スペース、真空機器の設計・製作・検査、機器設置などについては、必要とするかなり前から、所内世話人に相談するとともに、技術部と技術的な打合せをするように求めている。これらの手順を図 2.3-1 に示す。また、種々の手続きは Web を介して行えるよう整備されて

いる。これらの手続きは通常、所外の共同研究者に代わって所内世話人が共同研究の一環として責任を持って代行している。

LHDでは、遠隔地からの実験参加を可能とする手立ても講じている。SNETを用いて、データへのアクセス環境がLHDの制御室と同等な拠点が、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、筑波大学等に設けられている。また、双方向の環境を整備するため、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等にも利用している。制御室の音声と画像や実験放電条件・実験条件記録等の情報はインターネットを介しても配信しており、SNET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等を行っている。データへのアクセスもトークンとVPNを利用して、ユーザ登録者にはセキュリティを確保しつつ、所内と同じ環境となるように配慮している。また、共同研究成果についての論文等への研究発表は、事前登録、LHD合同会合等での事前発表、LHD実験会議における投稿承認を経ることを義務付けており、一連の手続きが容易かつ迅速となるようWebによる仕組みが整備されている。

さらに海外からの共同研究への参画については、従来随時の対応をしていたが、平成23年度から、通常共同研究の申請にあたり研究課題代表者に海外機関の研究者もなれるようになった。また、随時の対応について、その手続きと実験グループメンバーに求めるデータ利用についての留意点を明らかにするために、英文でまとめたものを用意している。特に海外との間では誤解を生じないように、留意点は覚書としている。この場合の手続きの流れを図2.3-2に、また、覚書を次頁に添付する。

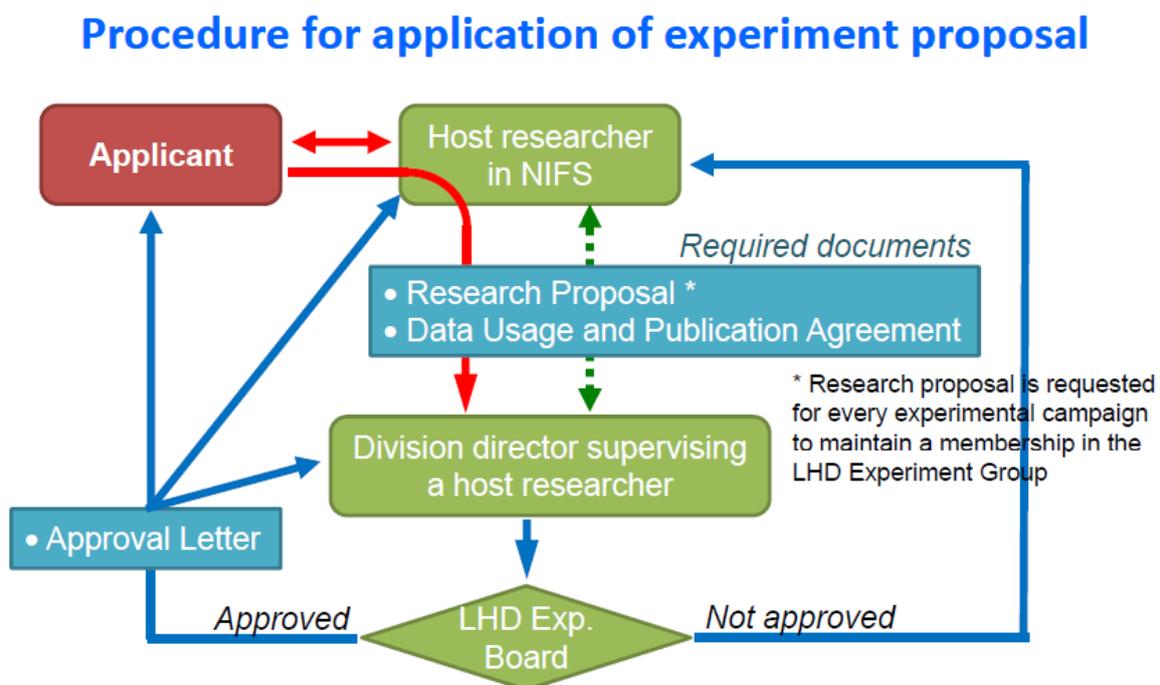


図 2.3-2 海外からの実験提案の取り扱いの流れ

LHD Data Usage and Publication Agreement

9th Nov., 2011

LHD Experiment Board

The undersigned member of the LHD experiment group agrees to adhere to the following guidelines for LHD data usage and results publication.

1) LHD experiment group

LHD Research is carried out by a domestic/international multi-institutional collaborative Research Scientist. In order to be recognized as a member of the LHD experiment group, an individual must be a member of an officially approved collaboration (NIFS Bi-Directional Research Collaboration or NIFS Research Collaboration), or must have submitted an LHD experiment proposal every experimental campaign through a host researcher in NIFS to the LHD Experiment Board and had approval by the board.

2) Data access

All members of the LHD experiment group are offered full access to LHD data as they are collected and analyzed. Each member of LHD experiment group must ensure that the data are used properly, interpreted correctly, and that appropriate credit is given for the provided measurements, systems operations, and analyses. It is prohibited to transmit any unpublished LHD data to a non-member of the LHD experiment group.

3) Data validation

The author should check the validation of the data available to the LHD experiment group by contacting the scientists in charge of the diagnostic, analysis, modeling through the host researcher before making a presentation and/or writing a paper.

4) Author list

It is expected that the physicist responsible for the first results from his/her efforts will produce the initial paper on these results as a first author. "Efforts" include diagnostic measurements, subsystems, experiments, analysis, etc. In general, authorship is:

- a) First author – person who leads the planning and execution of research, and either makes the presentation at a conference or writes the paper.
- b) Co-authors – persons who have actively contributed to the work through experiment, analysis, writing, host researcher in case the first author is a collaborator.
- c) LHD experiment group – group of people who have supported to the LHD experiment. The “LHD experiment group” should be included in the author list when the topics of the paper or presentation are related to the major topics of the LHD experiment.

5) Publication process

- a) The first author shall circulate the paper to coauthors for review and approval.
- b) The first author shall post the material on the NAIS (Web based NIFS Article Information Server) for group-wide comments to the first author and make a presentation to the LHD experiment group (see section 6)).
- c) The LHD Experiment Board shall review and approve the content and authorship of papers and presentations utilizing LHD data before external use.
- d) Disputes about the paper or the presentation that are not resolved among the authors or the Research Team members shall be brought promptly to the attention of the LHD Experiment Board for resolution.

6) Presentation

Presentations and accompanying papers at conferences and workshops of LHD physics results should be coordinated by the LHD Experiment Board. All presentations will require a rehearsal at the LHD experiment group meeting or a dry run at an appropriate time. This rehearsal or dry run should be given by the first author. In exception, if it is impossible for the first author to make the presentation, the presentation by one of the co-authors will be acceptable.

7) Acknowledgement

Acknowledgment of NIFS staff or NIFS collaboration supporting the work is required for papers. The NIFS budget supporting this work should be noted in the acknowledgement.

+ Example :

When the “LHD experiment group” is included in the author list

The authors would like to thank the technical staff of LHD for their support of this work. This work is partly supported by a Grant-in-aid for Scientific Research (xxxxxxx,xxxxxxx) of MEXT Japan and by the National Institute for Fusion Science grant administrative budgets (NIFSxxxxxx, NIFSxxxxxx).

When the “LHD experiment group” is not included in the author list

The authors would like to thank the LHD experiment group and the technical staff of LHD for their support of this work. This work is partly supported by a Grant-in-aid for Scientific Research (xxxxxxx,xxxxxxx) of MEXT Japan and by the National Institute for Fusion Science grant administrative budgets (NIFSxxxxxx, NIFSxxxxxx).

Host researcher _____

Name _____ Email _____

Signature _____ Date _____

Institution _____

3. 大型ヘリカル装置計画の研究成果

3. 1 概要

前回評価いただいた平成 19 年度の第 11 サイクル実験以降も、LHD は毎年度 1 サイクルの実験キャンペーンを遂行し、平成 23 年度の第 15 サイクル実験を 10 月 20 日に終えたところである。1 サイクル期間の間に 7 千回程度のプラズマ放電を行い、実験データベースの拡充と新しい試みを進めてきた。

図 3. 1-1 に主たる装置性能のパラメータである磁場と加熱パワーと、主たるプラズマ性能を示すパラメータの実験開始以来の発展を示す。平成 19 年度の評価時に比較して、性能が向上していることが認められる。ハードウェアの整備による装置性能の向上がプラズマ性能を向上させ、そこでの新しい研究展開がハードウェアの整備を動機づけてきた。この相乗的効果により、プラズマ性能の進展がもたらされたと言える。特に、プラズマ性能にあっては、飛躍的な向上が時々見られる。これは閉じ込め改善モードに代表される新しい運転領域が切り拓かれたことによる。この新しい領域の発見は物理研究のハイライトとなるが、計画されるものでは必ずしもない。ハードウェアの着実な整備を伴う計画的な実験研究が、この発見を促したと言える。

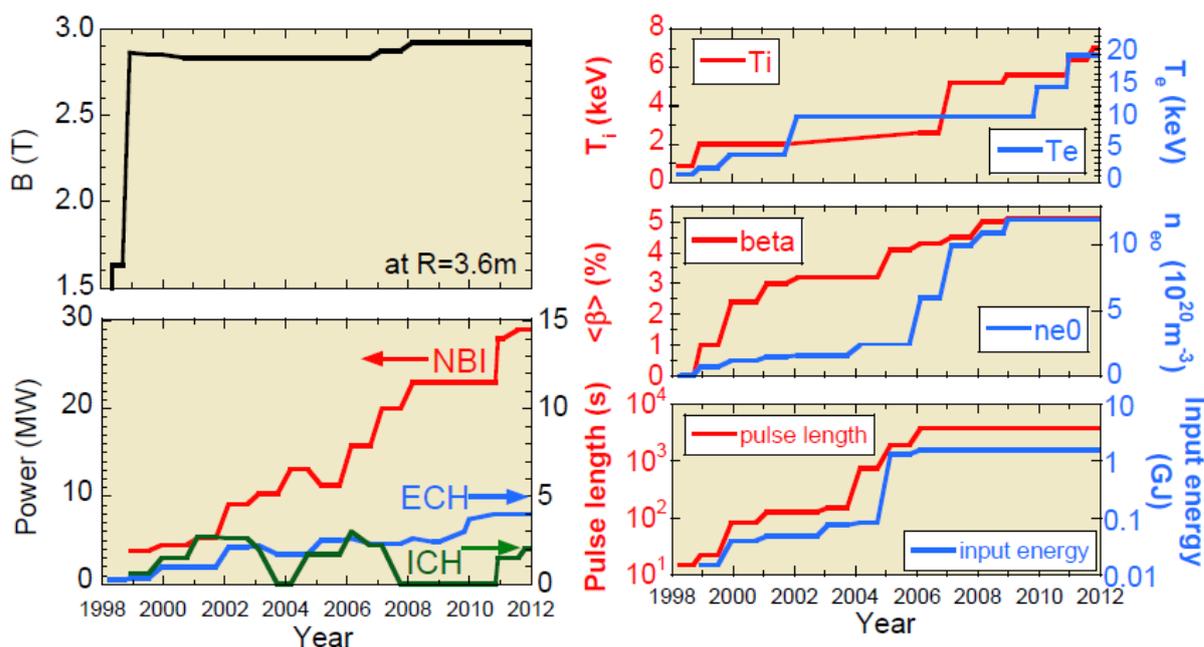


図 3. 1-1 左：磁場および加熱パワーの発展。右：プラズマ性能の発展

(上：イオン温度と電子温度、中： β 値と中心密度、下：長時間放電パルス幅と入力エネルギー)

近年はヘリカル系プラズマの核燃焼を展望するための高いイオン温度の実現を最優先事項として実験を進めている。このため、近年、イオンの加熱に有利な比較的低

い加速エネルギーを持った垂直入射 NBI の整備を進めてきた。この結果、第 15 サイクル実験では、7 keV を越えるイオン温度を実現した。目標は 10keV であるので、さらなる進展を必要とするが、このイオン温度の向上に伴って、イオン熱輸送の改善、不純物がコアから自動的に排出される不純物ホールや自発回転の発見がなされた。これは、プラズマ性能の向上と新しい物理の発見の相乗効果の端的な例である。このような新しい発見を体系化し、法則として理解し、次の研究段階への基盤とつなげていくことが LHD 実験のイニシアチブである。

これまで得られたプラズマ性能の向上は、有望なものと言える。代表例として図 3. 1-2 にプラズマ圧力の指標である β 値を、図 3. 1-3 に達成密度を示す。 β 値は核融合炉に求められる 5% を越え、しかもこの高 β 状態をエネルギー閉じ込め時間の 100 倍以上となる長時間にわたって保持することに成功した。トカマクでは短時間では 10% を越える β 値も達成しているが、その定常保持には課題が残っている。一方、LHD では、このような高性能プラズマであっても定常に運転することが原理的にできることを示している。図 3. 1-3 では実験で得られた密度をグリーンワールド密度と比較した。LHD の場合にはプラズマ電流がないので、最外殻磁気面での回転変換をもとに等価的なプラズマ電流を求め、グリーンワールド密度を評価している。トカマクの密度限界を遥かに越える密度を、ディスラプションを起こすことなく達成できている。端的に言うと $1.2 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ を比較的低い 2.5T という磁場強度で実現した。これは内部輸送障壁を伴う超高密度コア運転の確立によるものである。

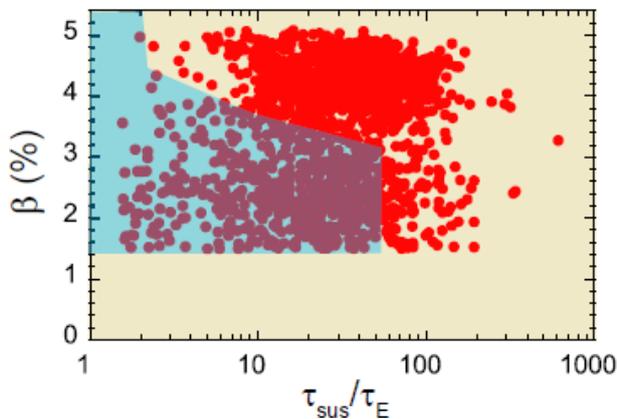


図 3. 1-2 β 値とその保持時間
(エネルギー閉じ込め時間で規格化) 赤は LHD、青いハッチはトカマクの達成領域

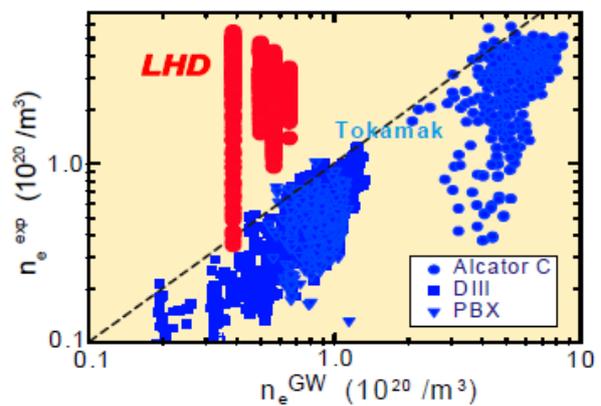


図 3. 1-3 実験で得られた密度とグリーンワールド密度との比較。

LHD で得られたデータベースをもとに、核融合炉条件に外挿できるようにするためには、プラズマ性能の向上とともに、予測能力に優れた物理モデルを構築、確立していかねばならない。そこでは、ヘリカル系固有の問題をトカマクをも含めたトロイダ

ルプラズマの総合的理解に包括して解決していくことが必要である。

例えば、図 3. 1-4 にプラズマ中の輸送に関わる物理機構の関連をダイアグラムとして示した。密度や温度の勾配によって新古典輸送や乱流が発生し、これによる輸送が決まることによって、プラズマの分布という構造が決定される。古典的にはこれらは図の左上にある拡散的描像によってモデル化される。輸送には乱流と新古典が考えられるが、これらは一般的に両極性拡散となるので、電場を発生させない。ところが、軸対称性の破れたヘリカル系では、新古典拡散は非両極性拡散となるため、これと整合する径方向電場が生まれる。ここで、新古典輸送が乱流輸送と比較して小さい場合であっても、径電場の発生を通じて、新古典輸送が極めて大きな役割を果たす場合があることに注意しなければならない。ダイアグラムで赤く示した部分がこのヘリカル系（あるいは3次元系）の特徴である。径電場は流れの減衰に影響を与え、帯状流を変え、結果として乱流が調整される。このような体系のモデル化と実験での検証を精密なレベルと進めていくことが必要である。

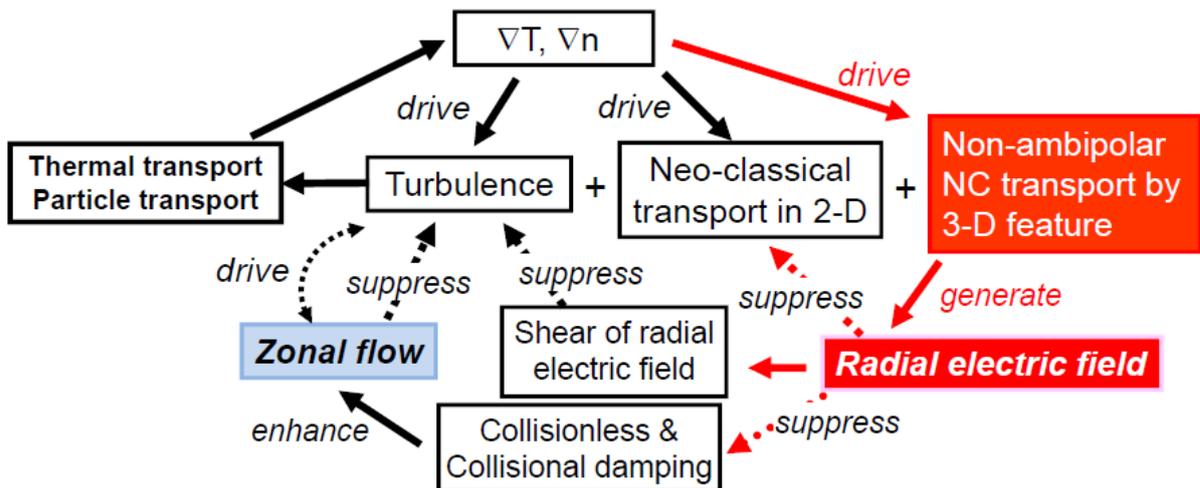


図 3. 1-4 輸送に関わる物理機構の関係図

さらに、近年では、磁場の3次元性がヘリカル系に固有のものではもはやないという認識が広がっている。端的には、ITERにおけるELM緩和のために磁場摂動を加える実験が多くのトカマク実験で試行されていることから明らかである。図 3. 1-5 は3次元効果の課題を整理したものである。磁場の3次元性は粘性と磁場の幾何形状に影響を与える。粘性は輸送を、磁場形状はMHD平衡・安定性に大きく関わるが、この二つは自己無撞着に決定されるものである。さて、粘性は平均流と帯状流を調整させ、その結果として新古典輸送や乱流輸送が、場合によっては、大きく変化する。3次元の磁場形状は磁気島とストキャスティック磁場に顕著に現れる。これらはMHD不安定性のロッキングやELM制御に大きく関わっている。

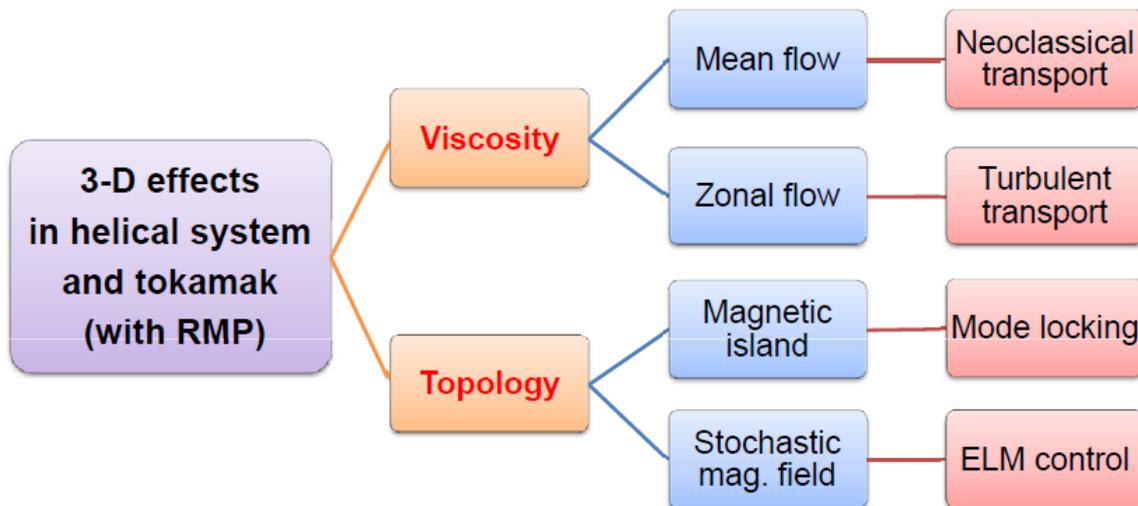


図 3.1-5 3次元磁場がもたらす物理

ここでは、プラズマ性能の向上と物理の体系的理解に向けたハイライトを述べたが、核融合エネルギーの早期実現に向けた問題解決へ向けた取り組みに合わせて、核融合の分野に留まらない学際的展開も学術研究のダイナミズムであることを申し添える。

主だった研究成果を以下にまとめる。

1) ヘリカル方式による、「核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現に向けた取り組み」において得られた成果として、

○ LHD 実験は (1) ダイバータによる閉じ込め改善、特に高密度運転の最適化、(2) 高温、特にイオンの高温化、(3) 高ベータ、特にさらに高い磁場での高ベータ化、(4) 定常運転、特に高密度化、の方向を強調した運転領域の拡大を図ってきた。

○ 閉構造ダイバータの基本となる中性ガス圧縮の性能が確認された。超高密度コア運転を 6 秒間維持した。

○ イオン温度は 7 keV を達成し、関連して不純物ホールや自発回転などの重要な物理機構が同定された。電子温度は 20keV を越えた。

○ 5%程度の高ベータ状態をエネルギー閉じ込め時間の 100 倍以上にわたり維持した。高磁場化では 0.75T で 4.1%、1 T で 3.4%を達成した。

○ 新しい波数制御 ICH アンテナは定常での高密度高性能プラズマ維持に期待を持たせる実績を示した。

また、

2) 環状プラズマの総合的理解に関する学術研究を進展への貢献に関わる成果として、

○ LHD 実験は以下の物理志向テーマによって環状プラズマの物理を深く、広く探究した。すなわち (1) コアプラズマ中の輸送、(2) 周辺プラズマとプラズマ壁相互

作用、(3) 電磁流体力学 (MHD)、(4) 高エネルギー粒子、(5) 波動物理、(6) そして、(7) 原子分子過程、である。

○ 3次元の物理が輸送と MHD の研究で強調された。共鳴磁場摂動による ELM 緩和、プラズマによる磁場のストキャスティック化、平均流および帯状流の調整などが端的な例としてあげられる。

○ いわゆる三つの「非」、すなわち、非線形、非対角項、非局所に注目した輸送研究が進展した。自発回転、不純物ホール、温度揺動の爆発的伝播などがあげられる。

○ 共鳴磁場摂動や不純物ガス入射による非接触ダイバータの制御が実証され、3次元モデリングによって説明がなされた。タングステンおよび水素吸着に関する研究がプラズマ壁相互作用において進展した。

○ 高速粒子駆動の GAM が同定された。

○ 電子バーンシュタイン波による高密度プラズマの加熱が確認された。

○ 原子分子過程の研究がプラズマ分光、原子物理、天体物理学の分野における共同研究を促進した。

これらの内容について、3. 2章ではミッションテーマ実験、3. 3章では物理テーマ実験、3. 4章では装置工学実験における研究成果の詳細を述べる。

3. 2 ミッションテーマ実験

3. 2. 1 高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善

将来の燃焼炉において、核融合反応は燃料となるイオン密度の2乗に比例することが知られている。従って核融合研究におけるプラズマの密度は常に、より高い値を目指してきた。LHD に代表されるヘリカル装置では、閉じ込め磁場の形成にプラズマ電流を必要としないことから本質的な密度限界は存在せず、実質的にはプラズマへの加熱入力と主にプラズマ周辺部からの放射出力のバランスで密度限界が決定されることが経験的に知られている。ヘリカル系のスケーリング則 (ISS04) によると、主プラズマの閉じ込め時間は、密度の上昇とともに緩やかに増加することからも、高速イオンの速い減衰からも、高密度放電の達成が切望されている。一方で高密度放電は、リサイクリングの増大による周辺密度の上昇と周辺温度の低下を招き、良好な周辺輸送障壁の形成を阻害することが懸念されている。また、コア部における負電場の形成による不純物の蓄積という観点からも、高密度プラズマの達成にはダイバータによる周辺制御が不可欠である。

LHD では、平成 19 年度まで行われたローカルアイランドダイバータ (LID) による閉構造ダイバータ実験の成功を受けて、排気装置を備えたバッフル構造ヘリカルダイバータの開発・設計を平成 20 年度より開始した。同ダイバータは LID 同様、閉構造を有することで効果的な粒子排気を目指しているが、ダイバータレッグとターゲット板 (炭素タイル) の接触面積を LID と比べて極めて大きくとることができるために、熱負荷に対する耐性が大きいことが特長である。これによって、LID では不可能であった、高パワー放電、長時間放電の実験が可能となる。

これまでの実験結果の詳細な見直しと数値シミュレーションによる物理設計を経て、平成 22 年 8 月までに 10 セクション中の 2 セクションが完成した (詳細は「4. 1. 1. 2 閉構造ダイバータ」を参照)。その後、同年 10 月より開始された第 14 サイクル実験および平成 23 年度の第 15 サイクル実験に供された。図 3. 2. 1-1 にバッフル構造ダイバータの概念図 (垂直断面図) と、LHD に設置した写真を示す。バッフ

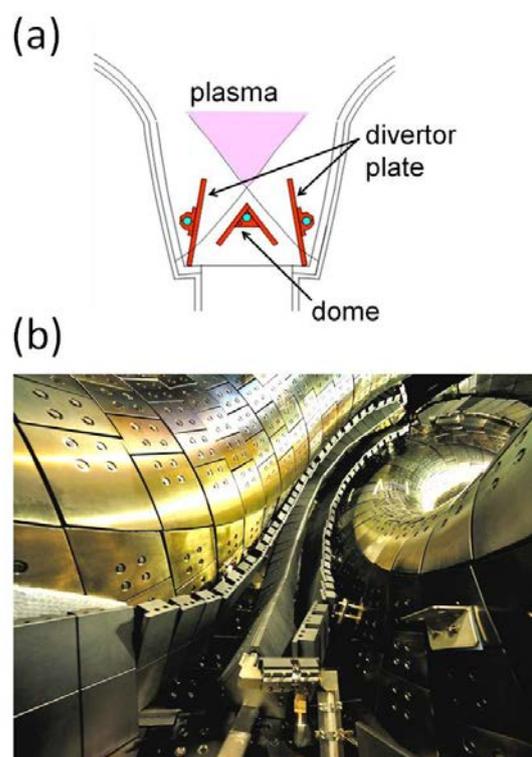


図 3. 2. 1-1 (a) バッフル構造ダイバータの概念図と (b) 真空容器に設置された様子。

ル構造ダイバータはターゲット板とドームで構成されており、それらがバッフルの役割を担い、粒子を閉構造内に集積する。将来、ドーム内部にクライオポンプを設置し、積極的な粒子排気を行う予定であるが現時点では未設置である。これまでの実験で、予期せぬ位置へのプラズマの接触や局所的な温度の上昇等は観測されておらず、基本設計の妥当性は確認されている。

バッフル構造ダイバータの性能は、将来ポンプが設置された際の排気速度を左右する。その性能は、中性粒子圧縮率で評価することができる。このため将来ポンプを配置するドーム内のスペースに、放電中でも動作可能な高速イオンゲージを設置し、放電中の中性粒子圧力を計測した。バッフルの施工率が20%である点を利用して、バッフル未設置部にも高速イオンゲージを配置し両者の比較を行った。図3.2.1-2に実験結果を示す。放電開始とともにダイバータ部の中性粒子圧力は上昇を始めるが、バッフル構造部では開構造部の10倍以上の圧力が観測されることが分かる。このような中性粒子の圧縮効果は、ダイバータ部のリサイクリング特性に大きな影響を与える。図3.2.1-3は、高密度放電時のダイバータ粒子束を、ターゲット板内に埋め込んだ静電プローブによって計測した結果である。密度の上昇に伴ってダイバータ粒子束は開部、バッフル構造部ともに増加するが、線平均電子密度が $\sim 3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上でその増加率が小さくなることが分かる。重要なことは、この増加率の低減がバッフル構造部で顕著である点にある。ダイバータ粒子束はほぼ飽和し、より高密度領域で若干の減少傾向も見える。これはバッフル構造部で中性粒子が圧縮されるためにリサイクリングが大きくなり、プラズマの密度が上昇し最終的にダイバータプラズマがターゲット板から離れる「非接触プラズマ」に移行する過程と考えられる。

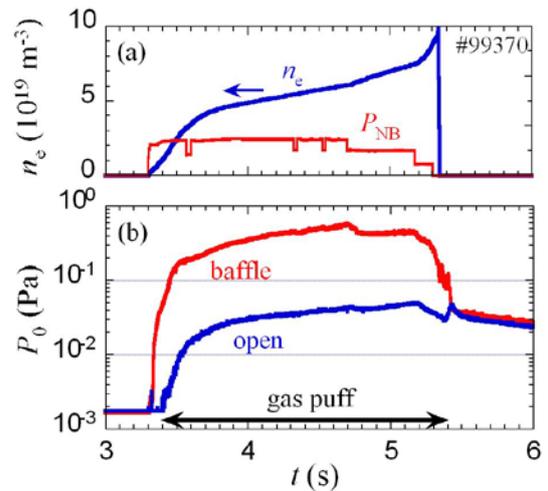


図 3.2.1-2 (b) バッフル構造ダイバータ部と、開構造ダイバータにおける中性粒子圧力の放電中の挙動。(a)に線平均電子密度と NBI の入射タイミングを示す。

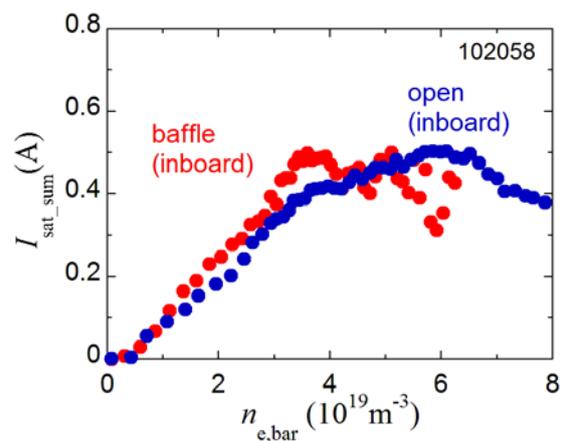


図 3.2.1-3 ダイバータ粒子束の線平均密度依存性。色の違いは、バッフル部（閉部）と開部の違いを示す。

通常のダイバータプラズマ特性に加えて、水素・ヘリウム混合プラズマにおけるダイバータ特性も調べられた。将来の燃焼炉では核融合生成物質であるヘリウムを排気する必要がある。このためにダイバータ内のヘリウム、水素の分圧を測定するために、ペニング放電を利用した新しい計測を導入した。水素放電中にヘリウムをパルス的に導入し、それぞれの分圧をバッフル構造部と開構造部で計測した初期的な結果を図 3.2.1-4 に示す。ヘリウムと水素の分圧比は、バッフル構造部で高いことが分かる。これは高速イオンゲージによる計測で、ヘリウムガスを放電途中で入射すると、バッフル構造部で圧力の減衰時間が長くなるという実験結果と矛盾しない。このような実験事実は、ガス種によるリサイクリング特性の違いを示唆している可能性があり、プラズマの輸送を含めた検討が今後の課題となっている。

ダイバータを用いた周辺制御による長時間放電の研究も継続して行われた。LHD では、中心電子密度が $1 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ を超える超高密度コア (Super Dense Core: SDC) プラズマが得られている。SDC は燃焼炉においても有望な放電モードであるが、その長時間維持が課題となっている。SDC の維持には連続的な中心粒子供給と効率的な周辺排気が不可欠である。平成 22 年度には、ペレット入射装置の改良と密度帰還制御法の確立、ダイバータの一部閉構造化により、図 3.2.1-5 に示すように、SDC プラズマの 6 秒準定常保持に成功した。以前の試験では、周辺電子密度が時間経過とともに徐々に上昇し、放射損失の増大と加熱入力の周辺部における吸収のために中心部の加熱が十分に行われず温度が低下する現象が見られていた。バッフル構造ダイバータ設置後は、図 3.2.1-5 の 4 段目の密度波形か

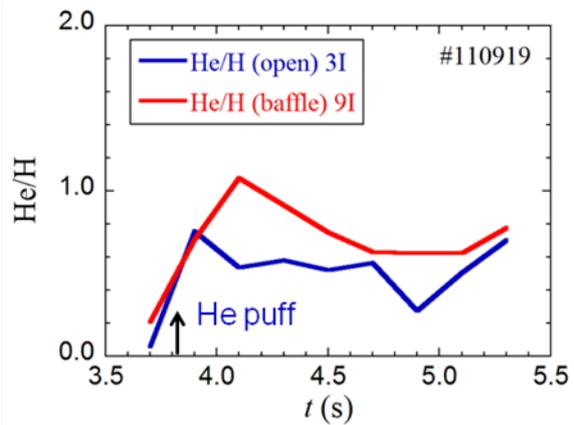


図 3.2.1-4 ペニング分光によるバッフル構造、および開構造ダイバータ部におけるヘリウム・水素分圧比。

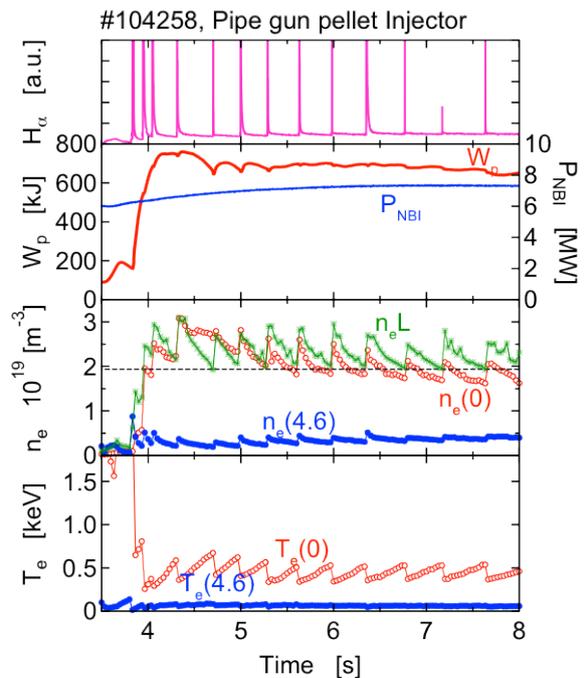


図 3.2.1-5 連続ペレットの密度帰還制御による SDC 長時間放電。上段はペレット入射タイミング、2 段目は蓄積エネルギー W_p 、3 段目は線積分密度 $n_e L$ と中心密度 $n_e(0)$ 、4 段目は中心 $T_e(0)$ および周辺電子温度 $T_e(4.6)$ 。

ら分かるように、周辺密度の顕著な上昇は見られず、加熱を停止するまで放電が安定して持続させることが可能となった。バッフル構造ダイバータでは、積極的な排気を行っていないにもかかわらず、なぜこのような排気効果が見られるのか現時点では結論が出ていない。現時点では、バッフル構造部における粒子の圧縮と、炭素の共堆積による水素吸蔵の相乗効果の可能性を考えている。これらは示唆に富んだ興味深い実験結果であり、今後のダイバータ研究の課題である。

SDC プラズマの中心圧力は極めて高く、しばしば1気圧を超える。このためその周囲の圧力勾配も高くなり、不安定性の励起が懸念される。実際これまでの実験で、中心近傍の輸送障壁が突然崩壊し、粒子が吐き出される現象（中心密度崩壊、Core Density Collapse: CDC）が観測されている。CDCの物理機構の解明と制御は、今後の高密度研究を推進する上で極めて重要な課題であるため、LHD 実験グループではプロジェクトの枠を超えた体制を敷いて研究の推進に取り組んでいる。数値実験研究プロジェクトとは、シミュレーションと実験の有機的な結合を目指し、相互に情報を交換し合いながら連携している。これまでに、非線形 MHD シミュレーションによる崩壊現象の再現に成功した他、最近では精密な回転変換分布計測と圧力分布計測に基づいた成長率の理論計算により、CDC が高 n バルーンモードに起因する可能性を示す結果を得ている（図 3.2.1-6）。

さらに核融合工学プロジェクトとは、SDC モードをはじめとする将来の燃焼炉の運転モードとして有望な高性能プラズマの開発を連携して推進している。核融合工学プロジェクトは、ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 の概念設計活動が行われており、

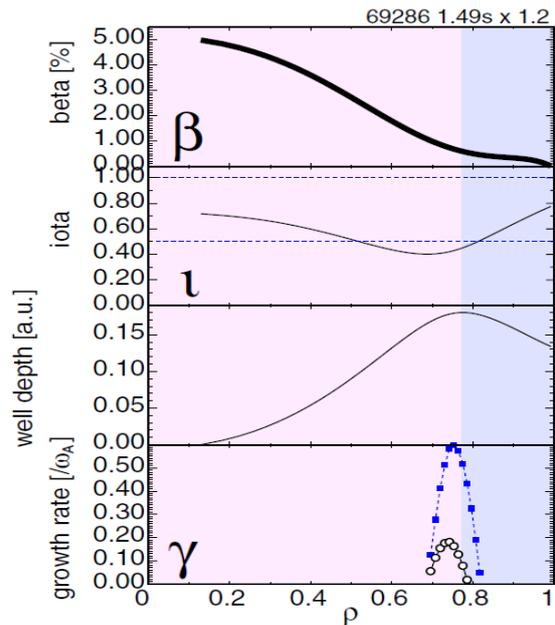


図 3.2.1-6 実験で得られたベータ分布（1段目）と回転変換分布（2段目）に基づいて計算された高 n バルーンモードの成長率（4段目）。

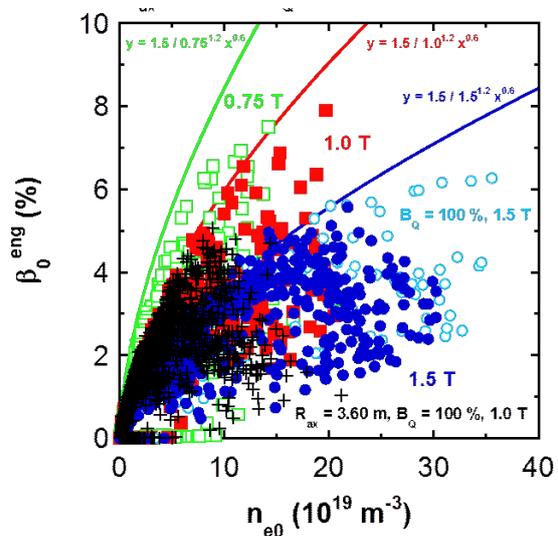


図 3.2.1-7 FFHR-d1 を模擬して IS コイルに通電しない条件の放電で得られた中心ベータの密度依存性（赤，緑，青）．通常配位も薄青，黒で示してある。

現時点で実験データを提供することが可能な唯一の大型装置である LHD との連携は極めて重要な意義を持つ。「高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善」実験では、原型炉設計に必要な閉構造ダイバータ物理・工学研究に関する実験データを提供し、核融合炉点火シナリオにおける高密度側からのアプローチで FFHR-d1 の設計に貢献してきた。最近の成果としては特に「炉心相似条件プラズマ実験」が挙げられる。LHD と相似形の FFHR-d1 では、LHD における IS コイルに相当するポロイダルコイル一対を省略することで上下ポートを最大化できることが分かっている。この配位を模擬するために、LHD において IS コイルに通電しない条件下で実験を行った。図 3.2.1-7 に実験結果を示す。本図はプラズマ中心ベータの電子密度依存性を表しており、赤い四角で示された点が最近行われた磁気軸位置 $R_{ax}=3.60\text{m}$ における結果である。FFHR-d1 と相似な本配位は、当然高密度と高ベータを同時に達成することが目標である。図からわかるように中心ベータ 8% を超える放電も得られており、本実験は、炉工学的に有利な磁場配位が高性能プラズマと両立可能であることを示した成果といえる。今回の実験で得られたプラズマは、核融合工学プロジェクトで最近開発された「直接分布外挿法」と呼ばれる、自己点火条件における FFHR-d1 炉心プラズマの温度・密度径方向分布を推定する手法を用いて評価可能であり、今後の炉設計研究活動に大きく貢献できるものと思われる。

高密度・ダイバータに関する物理研究は、上述のプロジェクト間連携とともに、共同研究においても成果を上げている。閉構造ダイバータの最適化およびデタッチメントの物理研究に関しては、モジュールモデルを用いた研究を、東海大学との共同研究で行っている。図 3.2.1-8 は東海大学で製作し、平成 22 年度より LHD で実験を開始した V 字型閉構造ダイバータモジュールである。ターゲット板にはプローブアレイが取り付けられており、ダイバータプラズマが非接触に至る過程など、基礎的な物理機構の解明を行っている。V 字構造ダイバータはトカマク装置でも採用が検討されており、LHD における実験結果は極めて有益である。

高密度・ダイバータプラズマに関する国際間の共同研究も行われている。ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所とは 2 件の共同研究が進行中である。両実験ともに研究者が来日し（うち 1 名は客員）、実際に LHD 実験に参加して行われた。1 件は他のヘリカル装置との装置間比較実験の範疇で、シミュレーションコードのベンチマークと妥当性の検証、LHD における高

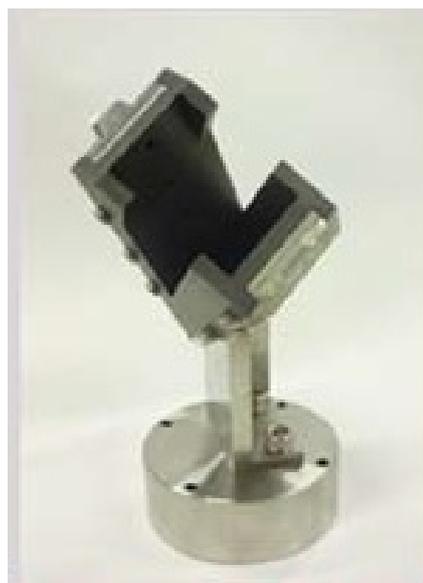


図 3.2.1-8 東海大学との共同研究で使用中の V 字型閉構造ダイバータモジュール（東海大学製作）。

密度放電のデータベース拡張を目的として、数値実験研究プロジェクトとともに連携して行われた。

今回は特に、高密度放電時の径電場、イオン温度測定に主眼を置いた実験を行い、電子密度 $5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、電子温度 1keV

程度のプラズマにおいて、半径 20cm 程度の中心近傍まで分布データを得ることに成功した。もう 1 件は、周辺・ダイバータプラズマの物理に関する、異なる方式の装置間にまたがる比較実験である。近年ヘリカル装置のみならず、トカマク装置においても磁場の 3 次元構造に対する関心が高まっている。LHD は、もともとストキャステックな周辺磁場構造を有しており、これまで理論、実験の両面から多くの研究がなされており実績も蓄積されている。従って、今後共同研究を通じてトカマク装置への貢献も行うことが可能である。今回は、図 3.2.1-9 に示すように、視覚的には異なるが物理的には共通の性質を有すると考えられている、LHD と TEXTOR 装置のストキャステック層におけるダイバータ・周辺プラズマ輸送の研究を、持参した計測器、計算コード等を用いて推進した。平成 23 年度は、外部摂動磁場が粒子輸送に与える影響について詳しく調べた。この結果は、来年度の国際会議等で発表される予定である。

上述の共同研究に加えて「高密度プラズマとダイバータによる閉じ込め改善」研究には、当該教員が指導を担当する数名の高専生、大学院生が従事した。それぞれ各教員の研究を分担し、有意義な成果を上げることができた。図 3.2.1-10 は、連携大学院・修士課程の大学院生が、修士論文のテーマとして行っている研究成果の一部である。SDC 放電時の放射強度分布をトモグラフィの手法で 2 次元化し、平衡計算で得られた圧力分布と比較した結果を描いている。放射強度のピーク位置が最大圧力位置と一致していることが分かる。本研究において、放射強度分布を平衡計算と直接比較できる手法を確立したことにより、放射計測と他の計測を比較することが容易になり、今後の高密度・ダイバータプラズマの研究に大きく貢献するものと思われる。

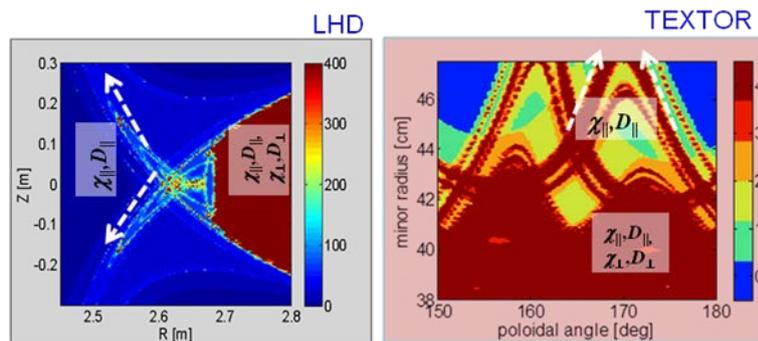


図 3.2.1-9 LHD と TEXTOR 装置の周辺磁場構造。

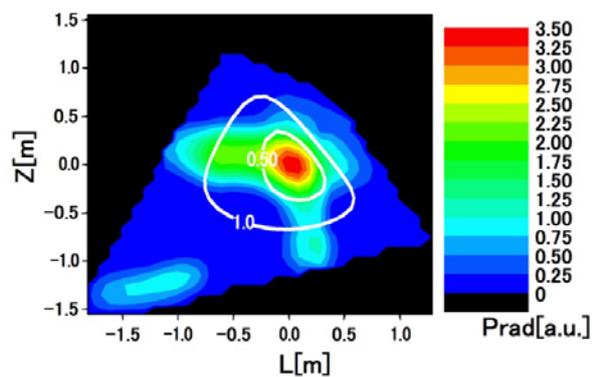


図 3.2.1-10 2 方向の計測より再構成された放射強度の 2 次元分布。平衡計算による圧力分布も重ねて描いている。

3. 2. 2 高ベータ領域の拡大

1) はじめに

これまで、低磁場実験 ($B < 0.5\text{T}$) において準定常放電で約5%のベータ値を達成し、ヘリオトロン配位で高ベータ放電が可能であることを証明している。しかし、低磁場実験ではプラズマ周辺部の電子温度が数十 eV であり、プラズマ周辺が高衝突領域であった。核融合炉を実現するために、核燃焼プラズマのような衝突周波数が非常に小さい状況で、ヘリオトロン配位で高ベータプラズマを達成できることを確認する必要がある。そこで、LHD 実験において、より低い衝突領域での高ベータプラズマを生成して高ベータ物理を考察し、核融合炉設計に外挿可能なデータを得ることが高ベータ領域の拡大テーマグループの目標である。

そこで、本テーマグループでは、

- (1) より高磁場 (より周辺電子温度が高く、低衝突領域) での高ベータプラズマの生成、
- (2) 到達ベータ値を決める物理の考察、
- (3) 高ベータ物理の高精度なモデリング、

を重点項目として実験・解析を進めた。以下、各項目について概要と結果を述べ、最後にまとめと今後の展望を述べる。

2) 高ベータプラズマ生成実験

前述のように、これまでの高ベータプラズマ生成実験は低磁場 ($< 0.5\text{T}$) で行われてきたため、特にプラズマ周辺領域の衝突度が高かった。一方、3次元 MHD モデリングによると、ベータ値の上昇に伴いプラズマ周辺領域の磁力線構造がストキャスティックになるという予想がある。図 3.2.2-1 に、3次元 MHD 平衡計算コードにより再構築された磁気面とトムソン計測の電子温度分布を比較した結果を示す。また、3次元 MHD 平衡計算結果から得られた、磁力線の結合長も参考のために示した。3次元 MHD モデリングによると周辺の磁力線構造がストキャスティックになっているにもかかわらず、有限の電子温度勾配がストキャスティック領域

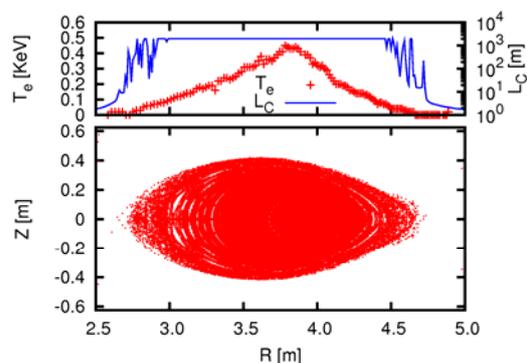


図 3.2.2-1 3次元 MHD 平衡計算により再構築された磁気面構造と電子温度分布の比較。参考に磁力線の結合長を示す (青実線)。

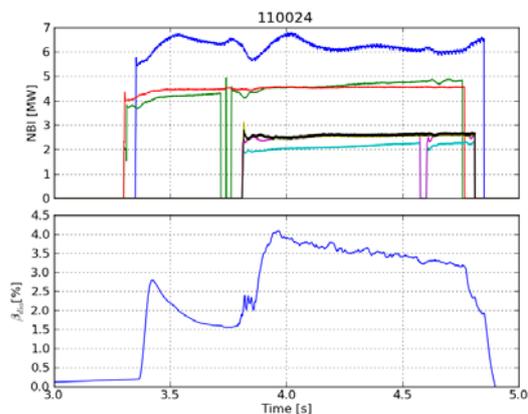


図 3.2.2-2 磁場強度 0.75T での高ベータプラズマ生成実験の放電波形。3.3 秒より接線 NBI 3 本、3.8 秒より垂直 NBI 2 本を重畳している。

に存在している。ストキャスティック磁力線上の有限な圧力勾配が、現在の高衝突プラズマの性質であるのか、核燃焼プラズマでも達成可能であるかは、将来の核融合炉設計に必要な情報である。そこで、より高磁場 ($B=0.75, 1T$) で高ベータプラズマ生成実験を行い、プラズマ周辺領域でより衝突領域が小さいプラズマを生成して、

1. 磁場構造が3次元 MHD モデリングの予想通りストキャスティックになっているか？
2. もしストキャスティックになっているとすればより低衝突度のプラズマでは閉じ込めの悪化に結びつくか？

を考察している。

図 3.2.2-2 に、磁場強度 $0.75T$ での高ベータプラズマ生成実験の放電波形を示す。プラズマの到達ベータ値と NBI 入射パワーを図に示した。まず、 3.3 秒より接線入射 NBI 3 本でプラズマを生成・維持した後、 3.8 秒より垂直入射 NBI 2 本を重畳して最高到達ベータ値を得ている。この時、垂直入射 NBI の加熱効率を引き出すために、連続ペレット入射によりピークした密度分布が得られるよう、ペレット入射開始時間、入射間隔の最適化を行っている。このショットでは垂直 NBI 入射直前の 3.7 秒より 15 ミリ秒間隔で 5 発ペレットを入射した。その結果、ペレット入射後に垂直入射 NBI を重畳した直後に最高到達ベータ値 4.1% ($B=0.75T$) を得た。

図 3.2.2-3 に $\langle \beta \rangle_{\text{dia}} \sim 4.1\%$ の時の電子温度分布を $B=0.425T, 0.75T$ で比較した図を示す。電子温度分布を比較すると、ほぼ同じ磁気軸位置であるが中心・周辺部共に電子温度が大きく異なる分布が得られている。一方、電子密度分布は、 $B=0.425T$ の時は周辺で密度が高くなるホロー分布であるが、 $B=0.75T$ の場合はホローではなくピークした分布が得られている。このことは、ピークした密度分布により垂直 NBI で到達ベータ

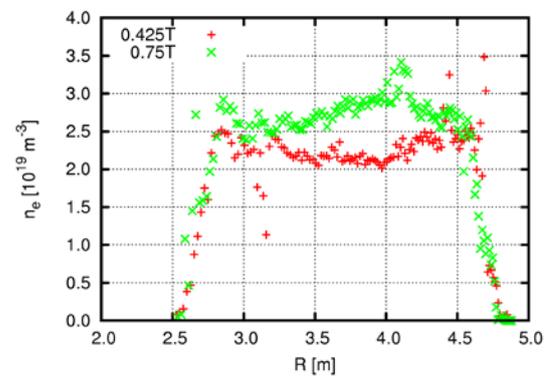
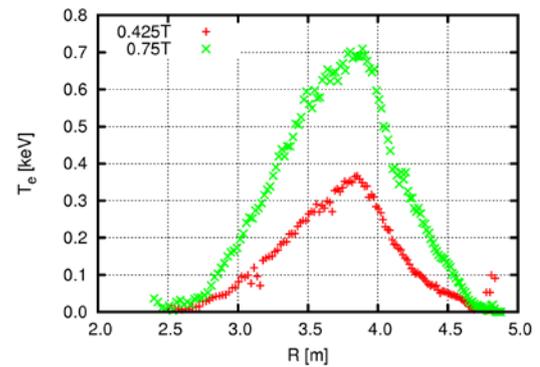


図 3.2.2-3 磁場強度の異なる条件で行った高ベータプラズマ生成実験の電子温度、密度分布の比較。

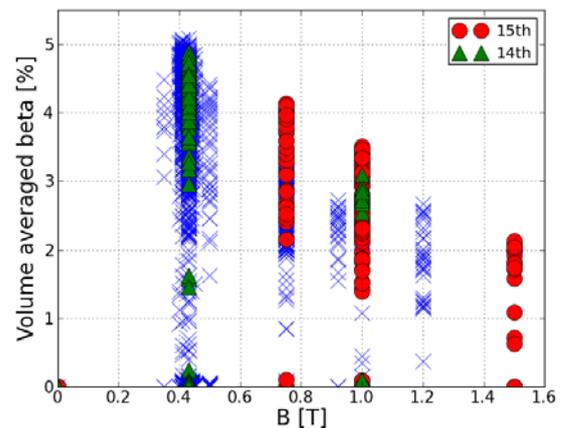


図 3.2.2-4 磁場強度と到達ベータ値のまとめ。14 サイクルを緑△、15 サイクルを赤○で示した。13 サイクル以前の高ベータプラズマ生成実験の結果も参考のため青×で示した。

タ値の向上を目指すシナリオと矛盾しないが、密度分布のピーキングが予想よりも小さい。また、周辺密度がガスパフ放電とペレット放電で差が小さいため、周辺 ($R > 4.6\text{m}$) で電子温度分布の差が小さくなっている。ペレット入射で密度分布が中心でピークしつつ、周辺の低くなる分布をどのように生成するかは今後の考察が必要である。

磁場強度が 1 T、1.5 T でも高ベータプラズマ生成実験を行っている。磁場強度 0.75 T と同様に、まず接線 NBI 3 本でプラズマを生成・維持し、その後、垂直 NBI 2 本を重畳している。ペレットは垂直 NBI 重畳直前に入射し、より高密度でピークした密度分布を生成することを目指した。その結果、1 T で最高到達ベータ値が 3.4% に達した。図 3.2.2-4 に、それぞれの磁場強度で行った高ベータプラズマ生成実験時の到達ベータ値をまとめた。横軸に実験磁場強度、縦軸は到達ベータ値である。14 サイクル、15 サイクルの結果をそれぞれ緑△、赤○で示した。参考のため、13 サイクル以前の実験結果も青×で示した。図から分かるよう、14 サイクル、15 サイクルではより高磁場 ($> 0.75\text{T}$) でのデータが取得でき、 $B=0.75$ 、1 T でそれぞれ 4.1%、3.4% の最高到達ベータ値を得ている。また、15 サイクル実験では、磁場強度 1.5 T での高ベータプラズマ生成実験も行い、2.2% の最高到達ベータ値を得ている。今後は磁場強度 1.5 T の高ベータプラズマ生成実験も積極的に行い、さらなる低衝突領域を目指した、高ベータプラズマ生成実験を充実させる必要がある。

第 14、15 サイクルの高ベータプラズマ生成実験で得られたプラズマに対して、特に周辺でのパラメータ領域を図 3.2.2-5 にまとめた。横長断面で $R=4.5\text{m}$ 、 $Z=0\text{m}$ の位置 (図 3.2.2-3 参照) のパラメータを用いた。図 3.2.2-5 (a) は到達ベータ値に対する磁気レイノルズ数を、(b) はバナナ軌道のバウンス周波数で規格化した衝突周波数を示す。これまで行ってきた低磁場のパラメータ領域から、より低衝突領域にパラメータ領域が拡大しているのがわかる。磁気レイノルズ数に関しては同一ベータでオーダーが 1 違う結果が得られているが、オーダーで 2 程度の大きく抵抗が異なる条件で比較できるデータはまだ得られていない。衝突領域も同様にオーダーが 1 程度異なるデータセットは得られたが、オーダーが大きく異なるデータセットはまだ得られていない。理由と

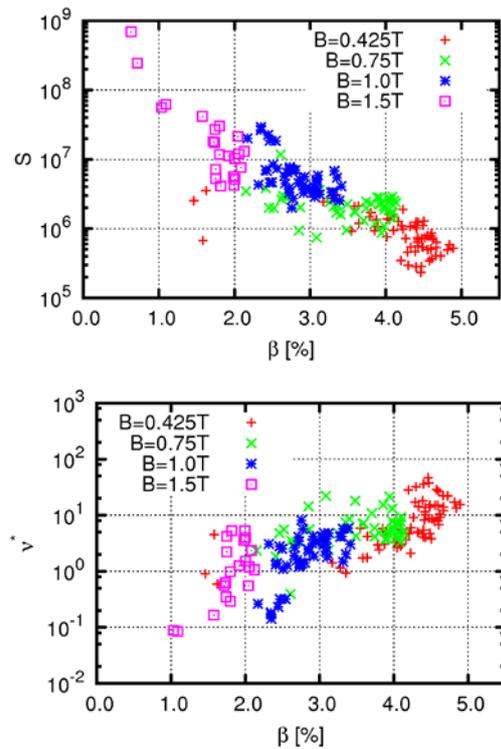


図 3.2.2-5 プラズマ周辺領域 (横長磁気面で $R=4.5\text{m}$ 、 $Z=0$) での到達ベータ値に対する (a) 磁気レイノルズ数、(b) バナナ粒子のバウンス周波数で規格化した衝突周波数。

して、図 3.2.2-3 の密度分布でわかるよう、プラズマ中心の温度・密度分布が大きく異なる放電は得られているが、周辺領域では温度・密度が大きく異なる分布が得られていないことが考えられる。つまり、 $B=0.75\text{T}$ の温度・密度プロファイルのところでも議論したように、 $B=0.425\text{T}$ の放電のように電子は密度がプラズマ周辺でホローな分布になってはいないものの、期待した様な中心に高いピークを持ち、周辺で低い密度分布は得られておらず、それが大きく電子温度が異なる分布が得られない理由と考えられる。今後は、ペレットによる燃料供給シナリオの考察、輸送解析とあわせてパラメータ領域をさらに拡大する実験シナリオを構築することが必要である。

3) 周辺磁場揺動と到達ベータ値の考察

これまでの高ベータプラズマ生成実験の結果とその解析から到達ベータ値は加熱によって決まり、ベータ値限界には達していないことが明らかになっている。したがって、より高い磁場強度 ($>0.75\text{T}$) で更なる到達ベータ値の上昇を目指すためには、いかに加熱を向上させるかを考察することが必要である。高ベータプラズマで加熱の向上を阻むものとして、低次の周辺 MHD 揺動とそれによる高エネルギー粒子の吐き出しに伴う加熱効率の劣化が考えられる。図 3.2.2-6 に、高ベータ放電中の典型的な MHD 揺動の時間発展を示す。上からベータ値、磁気軸位置、磁気軸上の電子圧力、磁気プローブで観測した $m/n=1/1$ の磁場揺動、 $m/n=3/2$ の磁場揺動を図示した。最初、周辺部で $m/n=2/3$ のモードが現れているが、ペレットの入射と共に $\iota=1$ 有理面付近の圧力勾配が強くなるために $n/m=1/1$ モードが進展する。これらのモードがバースト的な高エネルギー粒子の吐き出しを引き起こし、加熱効率の劣化を引き起こすと考えられる。

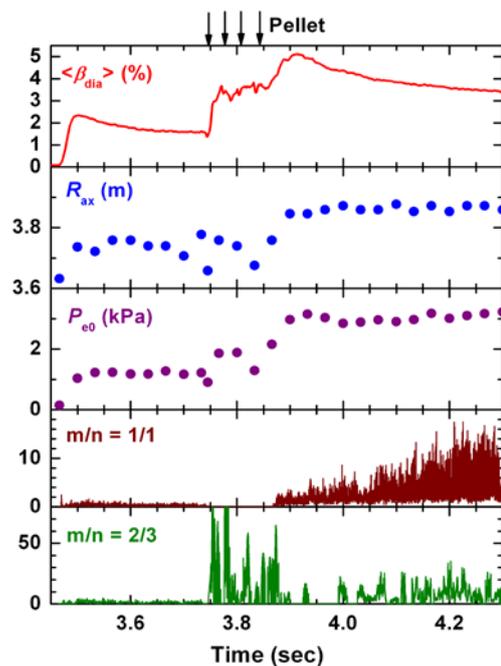


図 3.2.2-6 高ベータプラズマ実験中で典型的な MHD 揺動の時間発展

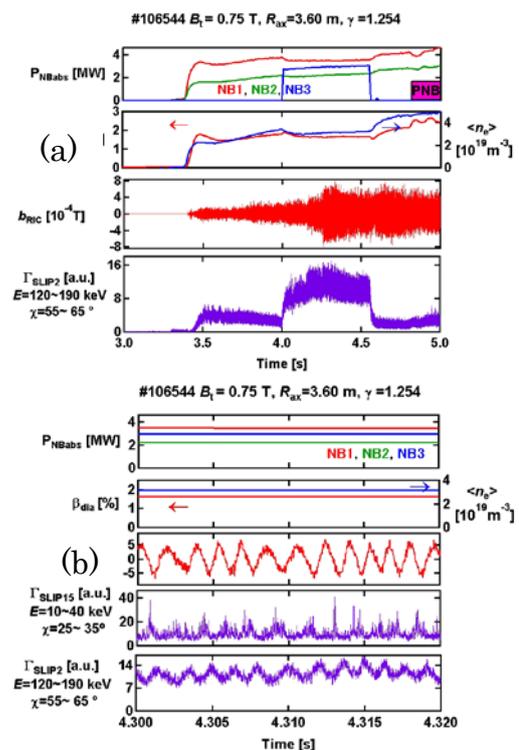


図 3.2.2-7 高ベータプラズマ中で観測される MHD 揺動の (a) 全体図と (b) 拡大図。

MHD 揺動と高エネルギー粒子の吐き出しに相関があることを損失イオンプローブにより計測した結果を図 3.2.2-7 に示す。図 3.2.2-7 の(a)は放電全体の時間波形、(b)は 4.3 から 4.32 秒までを拡大して表示したものである。図 3.2.2-7(a)を見るとベータ値の上昇と共に磁場揺動が強くなる。この磁場揺動は交換型不安定性によるものと推定される。接線 NBI 3 号機が重畳された 4 秒以降に、損失イオンプローブの信号強度が増大している。この時、損失イオンプローブで計測される高エネルギー粒子束のエネルギーは接線入射 NBI で生成される高速イオンのエネルギーと同じである。図 3.2.2-7(b)を見ると交換型不安定性の磁場揺動に同期して高エネルギー粒子の粒子束が損失イオンプローブにより計測されていることがわかる。

これまでの MHD 平衡・安定性研究から高ベータプラズマ中の周辺 MHD 揺動は抵抗性交換型不安定性であると同定されている。抵抗性交換型不安定性の場合、揺動レベルは磁気レイノルズ数 S の $-1/3$ 乗に比例すると考えられるため、周辺のパラメータ領域をより低衝突領域にすればこれらの交換型不安定性による高速イオンの損失を減少させることができると考えられる。

4) 数値モデリングの進展と国際共同研究活動

上で述べたよう、第 14、15 サイクル高ベータプラズマ実験では、パラメータ領域をより低衝突領域に拡大すべく実験を行った。この方向性は、MHD をはじめとした数値モデリングの考察・開発と密接に関連している。

高ベータプラズマの物理を数値モデリングで考察するためには、実験結果をよく再現できる MHD 平衡を高精度で再構築することが必要である。このために、入れ子の磁気面を仮定しない 3 次元 MHD 平衡計算コード HINT2 の開発・改良を進めてきている。図 3.2.2-1 の計算結果は HINT2 により得られたもので、実験結果との体系的な比較が可能なところまで開発が進んだ。HINT2 より、実験結果をよく再現できる MHD 平衡を再構築できるようになったので、HINT2 の平衡を元に、再突入粒子の効果を含む 3 次元モンテカルロコード MORH の開発が進められた。これまで主に解析に用いられていたコードは最外殻磁気面に達した粒子は損失と判定されてしまうため、正確な加熱効率の評価が難しかった。しかし、MORH コードは、そのような仮定をせずに加熱効率の計算が可能のため、より正確な加熱効率の評価が可能である。今後は、MORH コードを用いて高ベータプラズマの加熱効率を定量的に評価し、実験結果との比較・検討を行う。そのためには、スーパーコンピュータの活用も含め、実験解析を系統的に行うために解析ツールの開発もあわせて進める必要がある。

一方、HINT2 や MORH を用いた解析は、長い計算時間が必要なのが現状である。計算時間を短縮すべく改良を進めているが、実験解析のために効率よく磁気面形状を求めることができる計算コードがあれば有用である。ヘリカル系プラズマの 3 次元 MHD 平衡解析にもっとも多く用いられる VMEC コードは入れ子の磁気面を持つ MHD 平衡しか計算することができないが、非常に高速で 3 次元 MHD 平衡を計算することができる。そこで、この VMEC コードを元に、磁気計測器、トムソン散乱や MSE などによる内部

プロファイルの情報を元に 3 次元 MHD 平衡を再構築する試みがアメリカ・プリンストンプラズマ物理研究所 (PPPL)、オークリッジ国立研究所 (ORNL) のグループと国際共同研究として進められている。

5) まとめと今後の展望

高ベータ領域の拡大テーマグループでは、第 14、15 サイクル実験でより低衝突領域での高ベータプラズマの生成・維持を目指した実験を行った。結果を以下にまとめる。

1. 磁場強度 0.75T、1T での高ベータプラズマ生成実験を重点的に行い、それぞれ 4.1%、3.4%の最高到達ベータ値を得た。また、磁場強度 1.5T でも高ベータプラズマ生成実験を行った。
2. より高い磁場強度で高ベータプラズマ生成実験を行うことにより、同一ベータ値で規格化衝突周波数、磁気レイノルズ数がオーダーで 1 程度異なるデータを取得した。しかし、オーダーで 2 異なるような、大きなパラメータ領域の拡大はできなかった。
3. 周辺 MHD 揺動が加熱効率を劣化させる可能性があるため、周辺 MHD 揺動と高エネルギー粒子の相互作用の考察を進めた。その結果、損失イオンプローブにより、NBI により生成された高エネルギー粒子の吐き出しを同定した。
4. 高ベータプラズマの解析を進めるためにモデリング手法の開発を進めている。また、3次元 MHD 平衡の再構築に関して国際共同研究が進行中である。

以上の結果を踏まえ、さらなる低衝突領域での高ベータプラズマの生成のため、以下の点を今後考察する必要がある。

1. ペレット入射により、より中心で高くピークし、周辺で低い密度分布を生成し、垂直 NBI の吸収効率を高めること。そのためには、ペレットグループと協力し、ペレット入射の最適化を進めること。
2. シャフラノフシフトにより垂直 NBI の吸収効率は劣化する。そのため、ポロイダルパルス電源を活用した磁気軸移行実験を行い、さらなる垂直 NBI の吸収効率を目指すこと。
3. 周辺 MHD と高エネルギー粒子の相互作用についてさらなる考察を進める。周辺 MHD 揺動は抵抗性交換型不安定性と考えられているため、周辺プラズマの抵抗を低くしたプラズマを生成し高エネルギー粒子の吐き出しを低減させること。MHD と高エネルギー粒子の相互作用の観点から、交換型不安定性だけでなくアルヴェン固有モードが加熱効率に与える影響の考察を進めること。
4. 高ベータプラズマ実験解析を系統的に進めるためにさらなるモデリング手法の開発を進めることが必要である。

3. 2. 3 高温定常プラズマ保持

第13サイクルまでは、電子密度 $n_e \sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ あるいはそれ以下の低密度での長時間放電を実施して来た。低密度($n_e \sim 0.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)ではあるが、約1時間のプラズマ維持に成功しており、高周波入射エネルギー1.6GJの世界記録を達成している。ISS04の閉じ込め則、 $\tau_E \propto n_e^{0.54} P^{0.61}$ に従えば核融合三重積($n\tau_E T_i$)は、 $n\tau_E T_i \propto n_e^{1.08} P^{0.21}$ となり、プラズマ密度にほぼ比例する。第14サイクルからは、高い核融合三重積の高性能のプラズマの長時間維持を目標とした実験を試行した。

電子密度が増加するに従い輻射損失が増大し、加熱入射電力の30~40%に達するとプラズマが崩壊する。この現象は高速中性粒子入射あるいは電子サイクロトロン加熱により維持されたプラズマにも共通に観測されている。図3.2.3-1には、第14および15サイクルで実施された高電子密度プラズマ維持の実験結果がまとめられている。横軸はイオンサイクロトロン加熱電力(P_{ICH})と電子サイクロトロン加熱電力(P_{ECH})との合計高周波入射電力(P_{RF})である。高周波入射電力が大きい程、高い電子密度が維持されている。この実験でのプラズマ維持時間は、5~10秒である。この図において、第14サイクルに設置されたトロイダルアレイ[HAS (Hand Shake form type Antenna) アンテナ、波数制御アンテナ)アンテナ] (詳細は図3.3.5-1を参照)の実験結果および第15サイクルに設置されたポロイダルアレイ(Poloidal array、PA、詳細は図3.3.5-4を参照)アンテナとの同時加熱実験結果がプロットされている。HASアンテナは一对のアンテナから構成されており、それぞれに給電する高周波電力の位相を変化させる事により、プラズマ中に励起する速波の波数($k_{||}$)を変えることができる。高電子密度維持実験は、1MWレベルで実施された。プラズマ中に励起する $k_{||}$ の大小は、アンテナ間の位相(0, π)および(0, 0)に対応する。(0, π)および(0, 0)は、それぞれ大きな $k_{||}$ および小さな $k_{||}$ に対応する。図3.2.3-1には、大きな $k_{||}$ である(0, π)および小さな $k_{||}$ である(0, 0)の電子密度と高周波入射電力の関係が、緑丸および青丸でプロットされている。この図から大きな $k_{||}$ である(0, π)によるプラズマ生成は、小さな $k_{||}$ である(0, 0)のそれよりも約50%高い電子密度を維持することが可能であることが分かる。このことは、大きな $k_{||}$ で励起された速波の伝播可能な領域はプラズマ密度の高い領域であるので、アンテナか

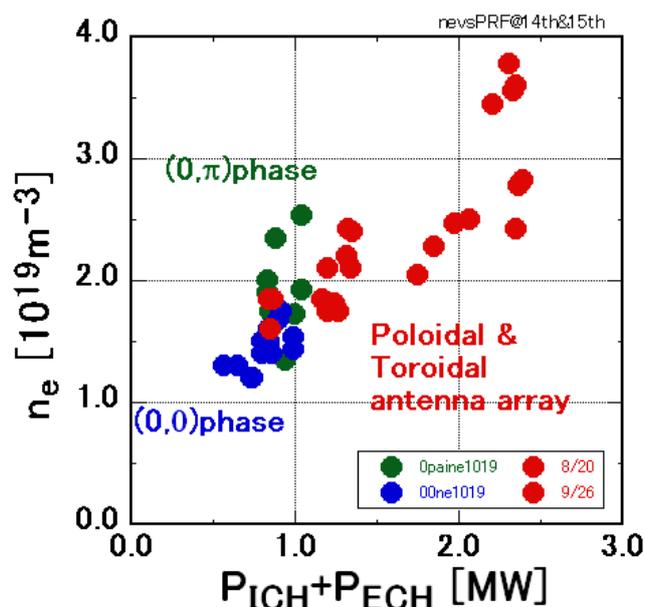


図 3. 2. 3-1 電子密度の高周波加熱電力依存性

ら入射された高周波電力が、有効にプラズマのコア加熱に寄与している、すなわち加熱効率が低いことを示唆している(詳細は図 3. 3. 5-8 を参照)。また第 15 サイクルにおいて、PA アンテナを一对設置した。その結果、HAS アンテナとの合同加熱維持実験が行われた。電子密度 $n_e \sim 3.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマを達成したことは、注目すべき実験結果である。このプラズマの核融合三重積は、 $n\tau_E T_i = 5.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ sec} \cdot \text{keV}$ である。このプラズマは $P_{\text{ICH}} = 2 \text{ MW}$ と $P_{\text{ECH}} = 0.37 \text{ MW}$ で生成維持されている。

このイオンサイクロトロン加熱では、少数イオン加熱法を採用している。これはバルクのヘリウムプラズマに少数水素イオンを混入させ、この少数水素イオンが速波の電磁エネルギーを吸収して、高エネルギー水素イオンへ加速される加熱手法である。直感的な理解によれば、速波はイオンサイクロトロン回転方向と同じ方向に偏波する左回り電磁場成分と、電子サイクロトロン回転方向と同じ方向に偏波する右回り電磁場成分を共有している。左回りと右回り電磁場成分の比率はプラズマ閉じ込め領域において、空間的に変化している。水素イオンとヘリウムイオン比率によりその空間変化の様相は大きく異なる。水素イオンとヘリウムイオン比率が小さい程、左回り電磁場成分の最大値は、イオンサイクロトロン共鳴領域に近接し、またその比率が大きくなる程イオンサイクロトロン共鳴領域から離れて行く。その目安は 10% である。イオンサイクロトロン共鳴加熱では、速波の周波数(ω)の左回り電磁場成分の最大値場所におけるイオンサイクロトロン周波数(ω_{ci})との差異をドップラーシフト量($k_{\parallel} v_{\text{thi}}$)で補完している。したがってその比率が大きくなる程 ω と ω_{ci} の差異が拡大して、大きなドップラーシフト量($k_{\parallel} v_{\text{thi}}$)が必要となり、イオンサイクロトロン共鳴加熱に対応出来る水素イオンの粒子数が減少するので、加熱効率は劣化する。また水素イオン比率が最適値より小さくなると、左回り電磁場成分の最大値の場所はイオンサイクロトロン共鳴領域に極く近接するので、イオンサイクロトロン回転運動の影響で左回り成分電磁場は消滅し、同様に加熱効率は劣化する。

以上述べた様に、水素イオンとヘリウムイオン比率 $H^+/(H^+ + He^{2+})$ が加熱効率を評価する重要な物理パラメータである。LHD の実験では、通常は高速中性粒子加速ビーム入射を用いたプラズマ実験が主であり、水素プラズマである。従って真空容器壁に水素が多く吸蔵されており、水素ガスのリサイクリングが大きい。このためヘリウムガスのみを燃料補給することにより、水素イオン比率を制御している。水素イオン比率は、高速中性粒子加速ビームとの荷電交換法で測定ができるが、高周波電力でプラズマ生成

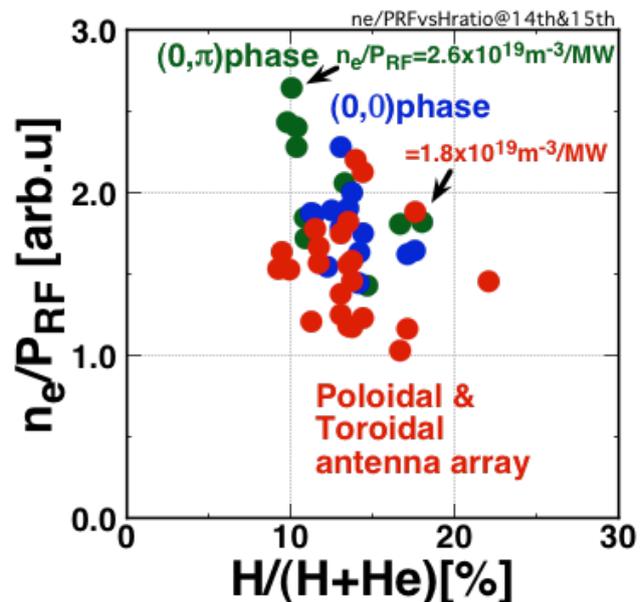


図 3. 2. 3-2 n_e/PRF と $H/(H+He)$ 比

実験を行う場合には、荷電交換法を用いた水素イオンとヘリウムイオン比率測定は適用できない。そこで高周波電力でのプラズマ維持実験では、プラズマ端における水素原子から発する $H\alpha$ 光およびヘリウム原子から発する HeI 光の可視分光の比率から求められる、 $H/(H+He)$ をパラメータとして採用した。この $H/(H+He)$ はプラズマ端での測定であり、かつ原子数の比率である。前述した様に高速中性粒子加速ビームで生成したプラズマにおいて、その高エネルギー水素イオンとの荷電交換法により、水素イオンとヘリウムイオン比率 $H^+/(H^++He^{2+})$ がのプラズマ半径分布が測定された。その測定量は、プラズマ中心において、可視分光からの $H/(H+He)$ 比よりは若干大きい、プラズマ中の $H^+/(H^++He^{2+})$ 比率を推定するに十分であるとの確証を得た。したがって、少数イオン比の目安として、 $H/(H+He)$ を今後の解析に用いる。

図 3. 2. 3-2 は、達成電子密度を入射された高周波電力で規格化した物理量、 ne/PRF を示したものであり、同一の高周波電力でどの位の電子密度が生成維持出来るかという目安である。上述したように $H/(H+He)$ 比は加熱効率良否の重要な物理パラメータである。この図に見る様に、 $H/(H+He)$ が 10% の場合に、大きな ne/PRF 比が達成されていることが分かる。図 3. 2. 3-1 と同じ様に、緑丸でプロットされているアンテナ間の位相 $(0, \pi)$ の場合において、最大の $ne/PRF \sim 2.7 \times 10^{19} m^{-3}/MW$ が達成されている。アンテナ間の位相 $(0, 0)$ の場合と HAS アンテナと PA アンテナを合同で使用したプラズマ生成においては、 $H/(H+He)$ が 12% の時に大きな ne/PRF 比が達成されているが、それは位相 $(0, \pi)$ の場合よりも 20% 程小さい。また $H/(H+He)$ が 10% 以上では、 ne/PRF 比は次第に減少し、 $H/(H+He)$ が 18% では $ne/PRF \sim 1.8 \times 10^{19} m^{-3}/MW$ となる。この一連の実験結果において、 $H/(H+He)$ の最小値は 9% である。イオン密度比は主にヘリウムガスパフで制御されるが、真空壁からの水素リサイクリングが大きく、水素原子密度を減少させることができなかつた。重水素が利用できれば、真空壁での水素吸蔵を減少させ、より低い $H/(H+D)$ 比での電子密度増加のトライアルが可能となる。

長時間放電実験は、予想されるプラズマの最大維持時間を想定して、実験周期を設定する。長時間維持プラズマにおいては、そのプラズマの蓄積エネルギー、 W_p が計測できないので、通常 3 分周期で約 10 秒間のプラズマを生成維持して W_p を計測して参照ショットとする。また高周波加熱源であるイオンサイク

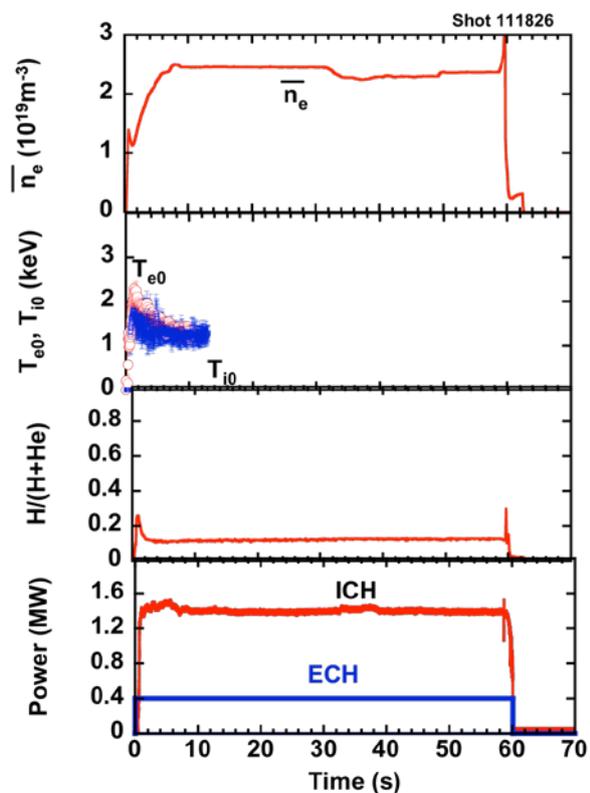


図 3. 2. 3-3 $n_e=2.4 \times 10^{19} m^{-3}$, $P_{RF}=1.8 MW$ の長時間プラズマ放電。

ロトロン加熱電力および電子サイクロトロン加熱電力を同時に遮断して、エネルギー閉じ込め時間、 τ_E とそれから算定する加熱効率も合わせて測定している。また電子温度、イオン温度も計測している。

長時間プラズマ維持中に、ダイバータに堆積した鉄と炭素から構成されている薄いフレークがプラズマに侵入して、プラズマが崩壊するが、何回かのトライアルで長時間維持に成功した放電を列記する。

1) $n_e=2.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマを $P_{\text{ICH}}=1.4 \text{ MW}$ と $P_{\text{ECH}}=0.4 \text{ MW}$ で、60 秒維持。

$n_e \tau_E T_i \sim 3.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ sec keV}$ (#111826、図 3. 2. 3-3 参照)

図 3. 2. 3-3 は、第 15 サイクルで実施された大電力高周波 ($P_{\text{RF}}=1.8 \text{ MW}$) により維持されたプラズマのプラズマパラメータの時間発展の図である。最初の 13 秒間しかデータが取れていないが、電子温度、イオン温度ともに $T_{e0} \sim T_{i0} \sim 1.2 \text{ keV}$ である。水素比率は、12~3% である。核融合三重積 ($n_e \tau_E T_i$) は、 $n_e \tau_E T_i \sim 3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ sec keV}$ である。

2) $n_e=1.37 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマを $P_{\text{ICH}}=0.76 \text{ MW}$ と $P_{\text{ECH}}=0.3 \text{ MW}$ で、320 秒維持。 $n_e \tau_E T_i \sim 3.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ sec keV}$ (#112098)

これらの実験において、水素イオン比の適正值維持 (3. 3. 5 波動加熱物理参照) のために、超音速水素入射を $2 \text{ Hz}/1 \text{ ms}$ (0.5 Pa m^3) 実施した。高周波入射電力と限界電子密度の関係は知られているので、電子密度を実時間でモニターしながら、入射、入射中断、入射再開を実施した。またこの磁気軸掃引を $3.63 \text{ m} < R_{\text{ax}} < 3.66 \text{ m}$ で実施している。

第 3 サイクルから第 15 サイクルまでに達成された核融合三重積 ($n_e \tau_E T_i$) と維持時間を図 3. 2. 3-4 にプロットする。図の青丸は高速中性粒子入射 (NBI) で、橙丸は高周波電力入射により生成維持された長時間プラズマの第 3 サイクルから第 13 サイクルまでに達成されたプラズマでの $n_e \tau_E T_i$ 達成値である。赤丸が第 14 サイクル、第 15 サイクルの達成値である。これまでに達成されている核融合三重積を進展させ、また、維持時間も伸張されている。この図には、世界のトカマク装置で実証された核融合三重積とその維持時間も、

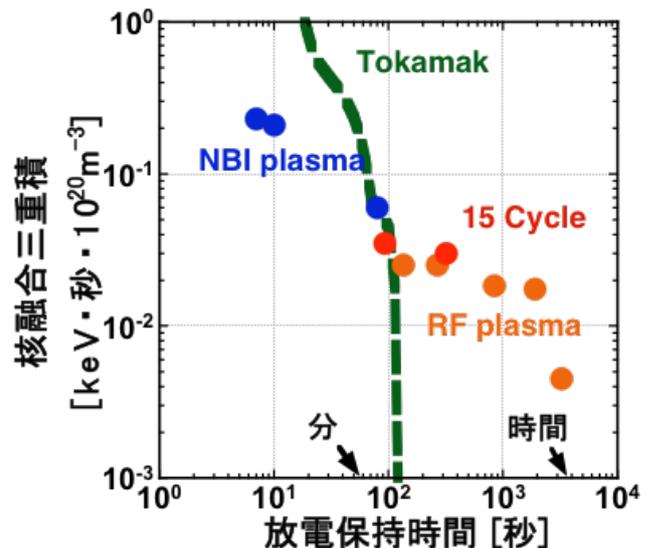


図 3. 2. 3-4 核融合三重積 ($n_e \tau_E T_i$) と維持時間

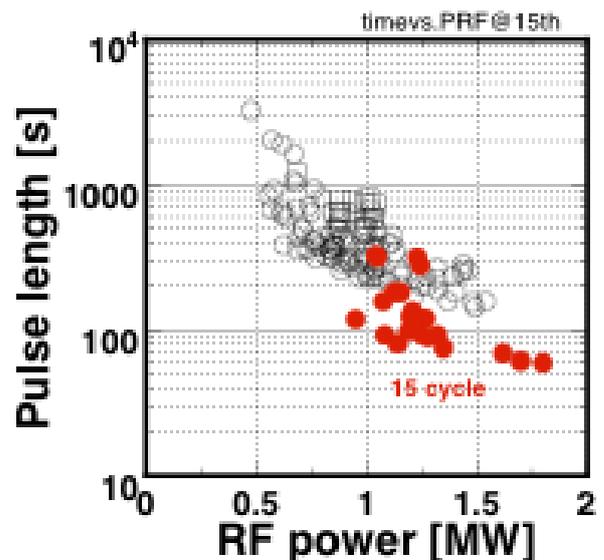


図 3. 2. 3-5 高周波加熱電力とプラズマ維持時間

破線で示されている。

図 3. 2. 3-5 にハードウェアの観点からの高周波加熱電力とプラズマ維持時間の関係を示す。第 3 サイクルから定常プラズマ維持実験が開始された。第 3 サイクルから第 13 サイクルからまでに達成されたデータを白丸でプロットしている。その白丸の包絡線から、プラズマ維持時間 τ は、 $\tau \propto \exp(-P_{RF})$ である。第 15 サイクルの実験結果を赤丸でプロットしている。高周波加熱電力が 1. 8MW 程度まで拡大している。第 3 ~13 サイクルまでは、主に $n_e=1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度で長時間放電を実施していたが、第 15 サイクルでは $n_e=1.2 \sim 2.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のより高密度放電が主であった。これまでよりも高電子密度での長時間トライアルであったので、アンテナ近傍の中性粒子密度が高めであり、アンテナにおける高周波放電が原因で、第 3 ~13 サイクルまでの実験データよりもプラズマ維持時間が短かったものと推察されるが、結論は次サイクルの実験結果課題である。

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH)、及び中性粒子入射 (NBI) 加熱に関係した高温定常プラズマ保持実験の成果を以下に挙げる

- ・ 電子温度 2 keV, イオン温度 1 keV, 電子密度 $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを ECRH パワー 0. 6MW 単独入射で約 60 秒間保持した。
- ・ 長パルス NBI 実験を試行した結果、プラズマ保持時間を長くするには真空容器壁からの中性粒子再流入を少なくするような壁コンディショニングの必要性が明らかになった。

ECRH 単独長時間放電実験の進展

電子サイクロトロン周波数帯の電磁波 (EC 波) は準光学的伝送が可能なので、反射鏡で構成された入射アンテナをプラズマから離れた位置に設置できる。このため、核融合炉の自己点火にいたるまでの加熱手法として電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) は有望であると考えられている。

ECRH 長時間放電実験には、84GHz, 1 入射系統と 77GHz, 3 入射系統の使用が可能である。各系統の入射可能

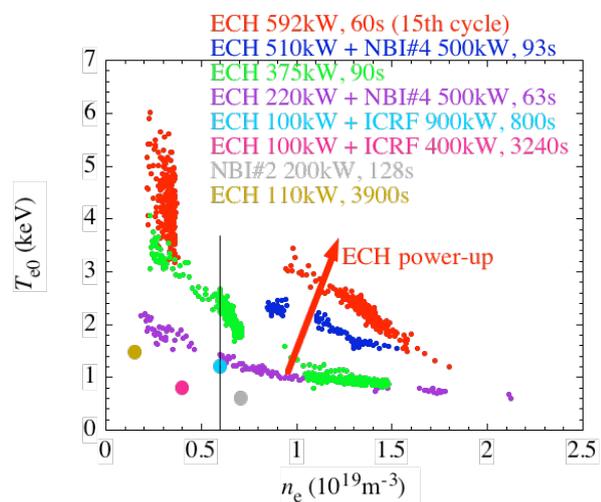


図 3. 2. 3-6 : 長時間放電時の電子密度と温度

図 3. 2. 3-6 に 60 秒以上の長時間放電におけるプラズマパラメータを示した。ECRH 単独放電では 総入射パワーが同程度の ICRF 加熱も

しくはNBI加熱を同時に行った放電に比べ、同程度の密度に対して得られる電子温度が高い傾向にある。

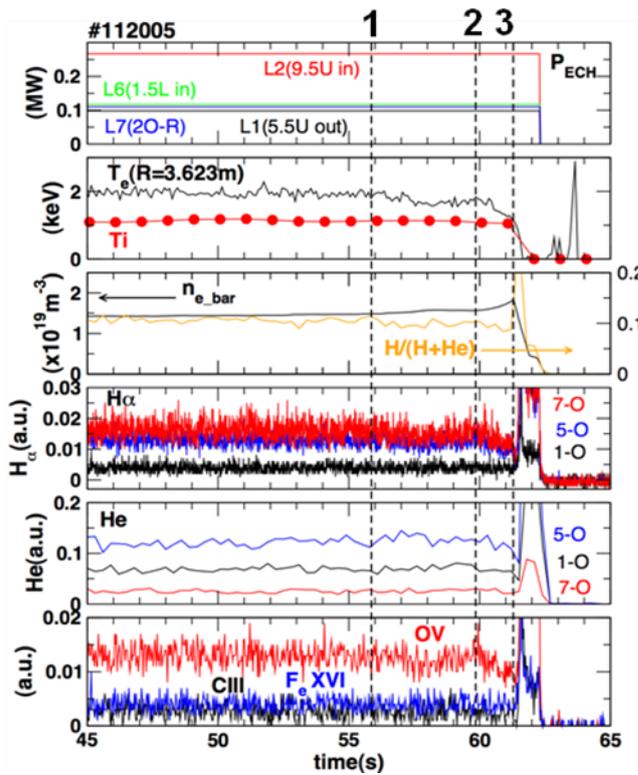


図 3.2.3-7 ECRH 0.6MW 単独放電時の放電波形

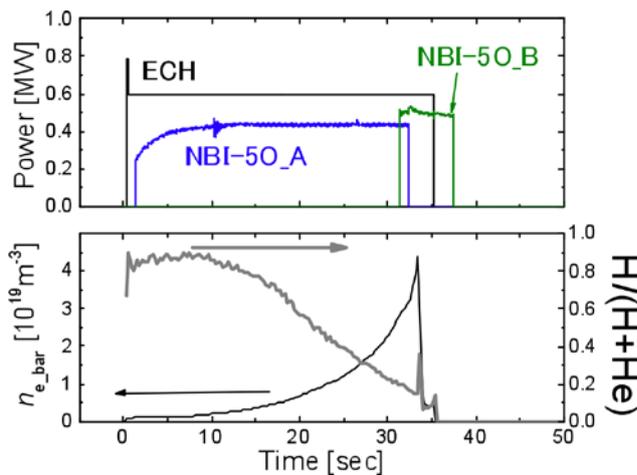


図 3.2.3-8 NBI と ECRH による長時間放電時の密度と水素ガス割合の時間変化

2010 年度より長時間放電時に入射できる ECRH の総パワーは約 0.6MW となった。図 3.2.3-7 に 2011 年度の第 15 サイクルの ECRH 0.6MW 単独放電の放電波形を示す。ICRF 長時間放電実験の後にヘリウムガスパフをフィードバック制御で入射した。放電開始後 55 秒まではフィードバック制御が有効に働き、電子密度 $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ を維持できた。55 秒を越えると徐々に温度が減少し密度が増加した。60 秒を越えると変化が大きくなりまた $H\alpha$ 強度は局所的に減少し、プラズマ崩壊に至った。何らかの原因で粒子供給とプラズマ生成のバランスが損なわれたものと考えられる。

放電の最中には、上部ポートの ECRH アンテナ付近から火花の発生が観測されている。火花発生による不純物混入もしくは壁からの中性粒子供給の変化のプラズマ放電維持に与える影響の定量的評価が必要である。

水素による高性能プラズマの長時間放電実験

高密度長時間放電時のリサイクリング/粒子バランス特性の理解は高性能プラズマの定常維持にとって重要である。ECRH および NBI による放電では ICRF 少数イオン加熱と異なり、核融合炉の燃料ガスである水素をワーキングガスとして、長時間放電時の水素のリサイ

クリング/粒子バランス特性を調べることができる。壁排気の様相は 3 秒程度の放電

を繰り返すのと、10 秒以上の長パルス運転とは異なることが指摘されており、高性能水素プラズマ放電データの蓄積は重要である。

ICRF 実験の無かった第 12 サイクルにおいてイオン源のサイクリック運転による垂直 NBI0.5MW と ECRH 0.5MW により 90 秒程度の放電を達成している。2011 年度の第 15 サイクルでは、垂直 NBI0.4MW と ECRH0.6MW により、さらに長パルスの放電を目指した。しかし、今回の実験は ICRF 放電直後に行ったため、図 3.2.3-8 に示すように NBI によって ICRF 定常実験直後の壁に吸蔵されていたヘリウムをプラズマに再流入させてしまい放電時間の経過とともに密度が急上昇し、プラズマの崩壊に至った。電子密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の時間帯では、電子温度は 2.5keV、イオン温度は 1.1keV であり、電子密度が $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の時間帯では、電子温度は 2 keV、イオン温度は 1.0keV であった。NBI を用いた高性能水素プラズマの長時間維持には、真空容器壁からの中性粒子再流入を少なくするような壁コンディショニングが必要である。

3. 2. 4 高温領域の拡大

1) 高イオン温度領域の拡大

核融合プラズマ装置では、核融合反応によるプラズマの燃焼維持の為には 10keV 程度のイオン温度を持つプラズマを生成する必要がある。LHD においては、2010 年に磁力線に対して垂直方向に低エネルギー (40keV) 中性粒子ビーム入射装置 (NBI) を増設し、ヘリカル型装置における高イオン温度領域の拡大を目指した。これにより、イオンを主体的に加熱する NBI の加熱電力が 7MW から 13MW へと増加し、2010 年には最高到達イオン温度を 5.6keV から 6.4keV に増加させることに成功した。2011 年には、イオンサイクロトロン加熱 (ICRF) を用いた真空容器壁のコンディショニング放電を事前実施する手法によって、主放電中の真空容器壁からの水素イオンのリサイクリングを抑制する手法を見いだした。その結果、放電中のプラズマ密度を下げることで可能となり、LHD で到達可能な最高イオン温度領域をさらに拡大し、7 keV という高イオン温度のプラズマをヘリカル系において世界で初めて実現することに成功した。

図 3. 2. 4-1 に単位イオン密度あたりのイオン加熱量に対する到達最高イオン温度の変化を示す。この図に示されるように NBI 増強前においては、単位密度あたりのイオン加熱量は $6.2 \times 10^{-19} \text{MWm}^3$ であったものが、2010 年の NBI 増強により $7 \times 10^{-19} \text{MWm}^3$ へと増加し、2011 年の ICRF コンディショニングによるプラズマ密度上昇の抑制により $7.5 \times 10^{-19} \text{MWm}^3$ へと増加させることが出来た。これに呼応する形で、イオン温度を 5.6keV から 6.4, 7 keV と増加させることに成功している。図 3. 2. 4-2 に最高イオン温度到達時のイオン温度、電子温度及び密度分布を示す。従来の放電では、電子密度は $1.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度の値を示し、特に $|r_{\text{eff}}| > 0.4 \text{m}$ の領域において、密度が盛り上がる傾向が見られた。ICRF コンディショニングを行った放電では、図 3. 2. 4-2 に示されている

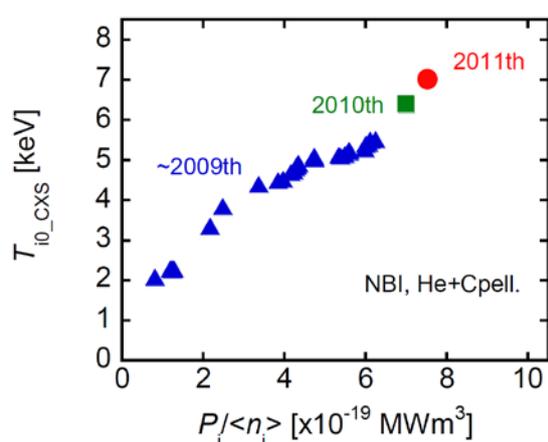


図 3. 2. 4-1. 単位イオン密度あたりのイオン加熱量に対する到達最高イオン温度の変化

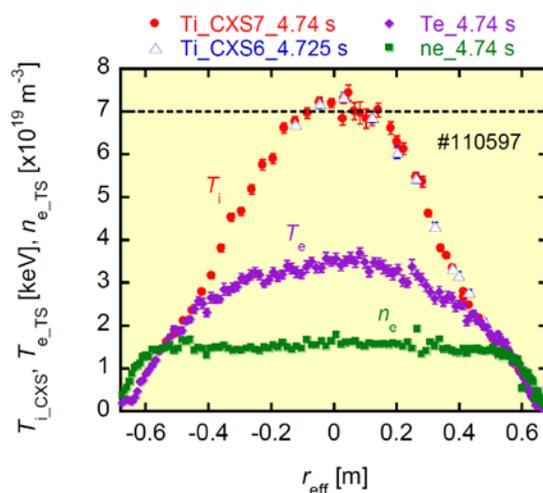


図 3. 2. 4-2 最高イオン温度到達時におけるイオン温度、電子温度、及び電子密度分布

ように、密度を $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ に抑制し、中心部でイオン温度が 7 keV を越える放電を実現している。

図 3.2.4-2 で示す放電では、プラズマに直径 1.2mm のカーボンペレットを入射することで周辺部に摂動を与え、イオン温度が高い状態が得られたが、残念ながら、その持続時間は 100ms 程度と短い。そこで、ペレットによる摂動を与えずに、イオン温度の高い放電を比較的長く維持する手法の探求も行った。図 3.2.4-3 に、このような放電の典型的な中心電子密度及び中心イオン温度の時間変化を示す。低エネルギー NB を増設した 2010 年においては、最大 5 keV、高イオン温度状態の保持としては 4.5keV 以上を 0.5 秒間維持することに成功した。この時の高イオン温度持続維持時間は低エネルギー NB の高パワー (12MW) 入射時に可能なパルス幅によって制限を受けていた。ICRF コンディショニング手法を見いだした 2011 年には、2010 年よりも更に低い密度で高イオン温度放電を実施することが可能となった。その結果、低エネルギー NB の入射電力を 11MW 程度に落とした状態においても 5 keV を超えるイオン温度放電を達成し、4.5keV 以上の高イオン温度の状態を、ほぼ 1 秒維持することに成功した。

2) 高イオン温度プラズマの閉じ込め・輸送特性に関する研究

(i) イオン内部輸送障壁 (ion ITB, i-ITB) を伴うプラズマの熱輸送・運動量輸送

LHD では、十分なイオン加熱を行うことによりイオン内部輸送障壁 (ion ITB) を実現し、イオン温度領域を飛躍的に拡大してきた。ヘリカルプラズマにおける

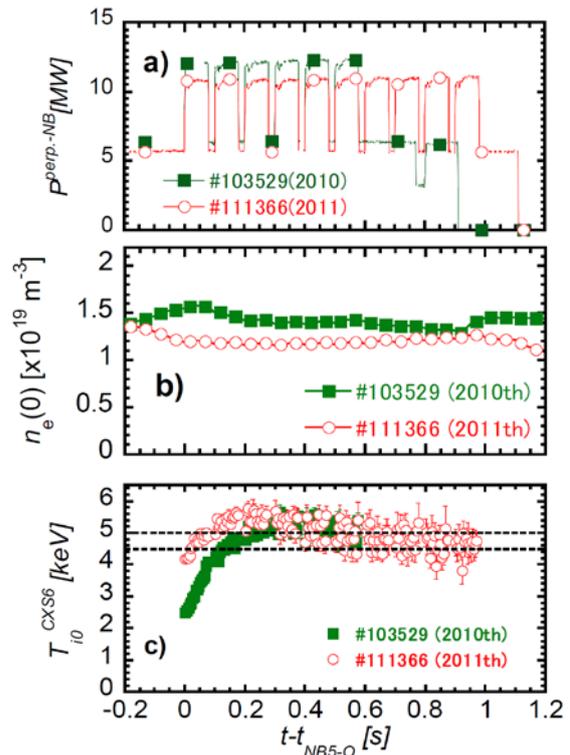


図 3.2.4-3. 準定常高イオン温度放電における (a) 低エネルギー垂直入射 NB の入射電力、(b) 中心電子密度、及び (c) 中心イオン温度の時間変化

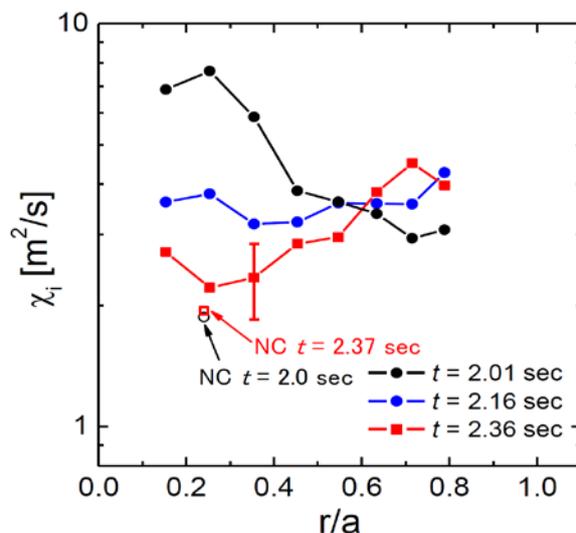


図 3.2.4-4. イオン内部輸送障壁形成時における熱拡散係数分布。コア領域では、新古典理論の予測レベル (白抜き印) まで、低減している。

イオン系 ITB プラズマの輸送特性や形成機構は、これまで明らかにされていない。LHD の ion ITB プラズマの輸送解析により、イオン熱輸送は、 $r_{\text{eff}}/a_{99} < 0.6$ で改善し、新古典理論予測レベルまで低減することがわかった (図 3.2.4-4 参照)。これにより、乱流起因の異常輸送が劇的に改善していることが明らかとなった。また、ion ITB プラズマでは、Co 方向トロイダル回転も尖塔化しており、運動量輸送の改善も示唆されていた。これを定量的に調べるために、FIT コードの改良を行い、接線 NBI が持ち込む外部駆動のトルクの評価を行った。その結果、図 3.2.4-5 に示すように運動量輸送 (粘性) は、熱輸送 (熱拡散係数) と良い相関を示し、輸送が改善することがわかった。さらに詳細な解析では、イオン温度勾配と相関する Co 方向の自発的な回転駆動が存在することが示され、その定量的評価 (輸送行列の非対角項の実験的評価) に向けた研究に取り組んでいる。これら一連の研究から、ヘリカルプラズマのイオン系 ITB 形成では、トカマク ITB のような電場シアによる輸送低減効果は、小さいことが明らかとなっており、帯状流形成などヘリカル系 ITB における輸送改善の物理機構の検証が残された課題となっている。

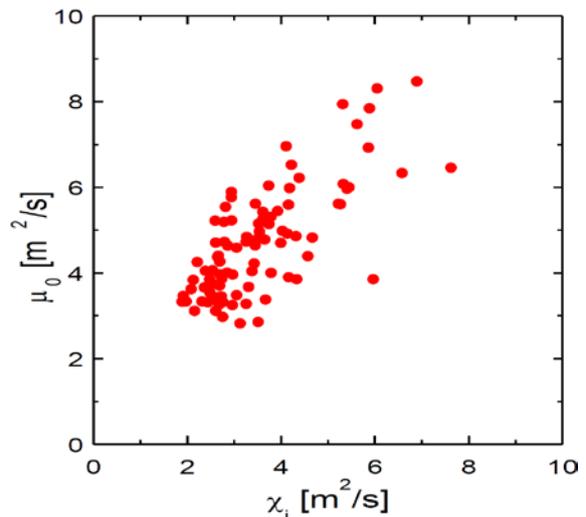


図 3.2.4-5. イオン内部輸送障壁形成時における粘性と熱拡散係数。

(ii) 不純物輸送

プラズマ中における不純物の挙動は、核融合炉の実現において重要な問題である。閉じ込め性能のよいプラズマ中では、不純物も一緒に閉じ込められてしまう傾向が一般的である。燃焼後の灰などの不純物が蓄積してしまうと、温度低下や燃料の希釈をまねき、核融合出力を低下させてしまう。LHD での高イオン温度放電プラズマ中では、熱の閉じ込めが改善されると同時に、不純物が吐き出される現象が観測された。結果として、極端にホロー形状となった不純物分布が観測され、それを不純物ホールと呼んでいる。不純物ホールの形成機構は明らかになっていないが、非線形的に形成され

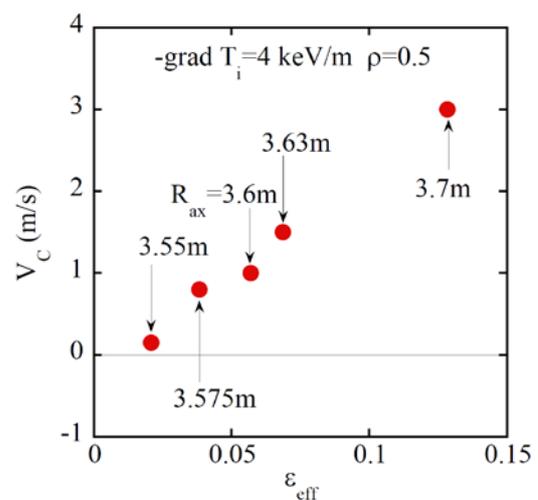


図 3.2.4-6. 不純物対流速度の実効ヘリカルリップルに対する依存性

る点など新古典理論による予測では説明できない点も観られている。理論との比較を進める上でも、実験的に不純物ホールの特性を調べておく必要があり、磁気軸位置依存性や Z 依存性を調べる実験が行われた。

磁気軸位置は、ヘリカル型の装置において重要なパラメータの一つである。ヘリカルリップルの変化をとめない新古典輸送が変化するが、異常輸送へも影響を与えることが知られている。図 3.2.4-6 は、磁気軸位置を変化させたときの不純物輸送における対流速度 V_c をプロットしたものである。正の V_c は、外向きの対流、すなわち吐き出しを示している。磁気軸位置を外側に移動させていくと、不純物の吐き出しはより強くなり、顕著な不純物ホールが観測された。

また、不純物ホールが最初に観測された炭素ばかりでなく、より高価数の不純物であるアルゴンや低価数のヘリウムについて、吐出しが観測されるかを調べたところ、図 3.2.4-7 に示されるように、より大きな Z のものは、ホロー分布がより顕著になることが分かった。

不純物ホールは、イオン温度勾配が増加するとともに形成されるが、図 3.2.4-8 に示されるように、ある閾値までは蓄積傾向にあったものが、突然吐き出しに転じる非線形的な挙動も観測された。このことから乱流による輸送が、不純物ホール形成に関わっているのではないかと予想される。

(iii) 非線形シミュレーション GKV-X と二次元位相コントラストイメージングによる乱流揺動の比較

ジャイロ運動論に基づく、非線形シミュレーション GKV-X が開発された。GKV-X により、LHD の実験平衡磁場を表現する VMEC データを読み込み、計測された電子密度、電子温度、イオン温度、およびそれら勾配を入力し、実験条件下での乱流シミュレーションを行うことができる。GKV-X は現在のところイオンの熱運動のみ取り扱って

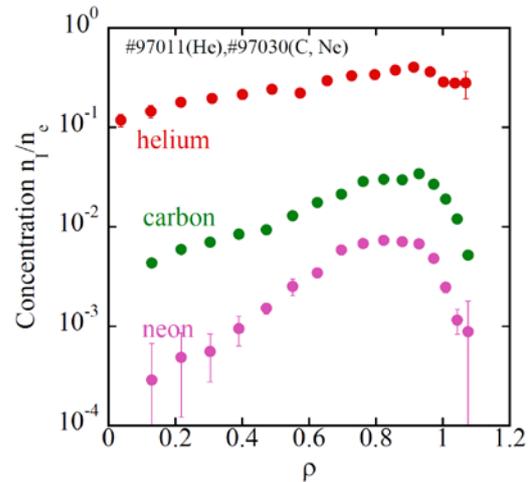


図 3.2.4-7. 不純物ホール形成の不純物種依存性

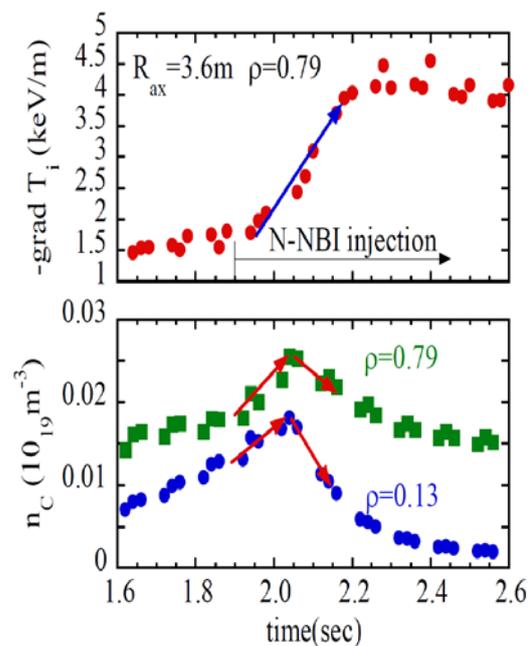


図 3.2.4-8. 上：イオン温度勾配，下：カーボン密度の時間発展波形

るので、イオン加熱主体の高 T_i 放電でシミュレーションを行い、それと同時に、乱流揺動を二次元位相コントラストイメージング(2D-PCI)による乱流の計測結果と比較した。線形計算によるとイオン加熱によりイオン温度勾配が上昇するとイオン温度勾配不安定性の閾値を超えて不安定になり、 $\rho=0.7$ 付近で線形成長率は最大となった。一方、2D-PCI で計測した乱流のピークもほぼ同じ空間位置で観測された。非線形計算により、イオンの熱流を計算したところ、図 3.2.4-9 に示すように点線で示した実験値に対して、小さい値となったが、新古典輸送による寄与を差し引いた実線で示す乱流駆動のイオンの熱流は GKV-X によるシミュレーションと近い値を示した。また、図 3.2.4-10 に示すように $\rho=0.65$ における 2D-PCI により計測した乱流揺動のスペクトルは GKV-X による非線形状態での乱流スペクトルと定性的に一致した。これらのことは、高 T_i における乱流駆動輸送がイオン

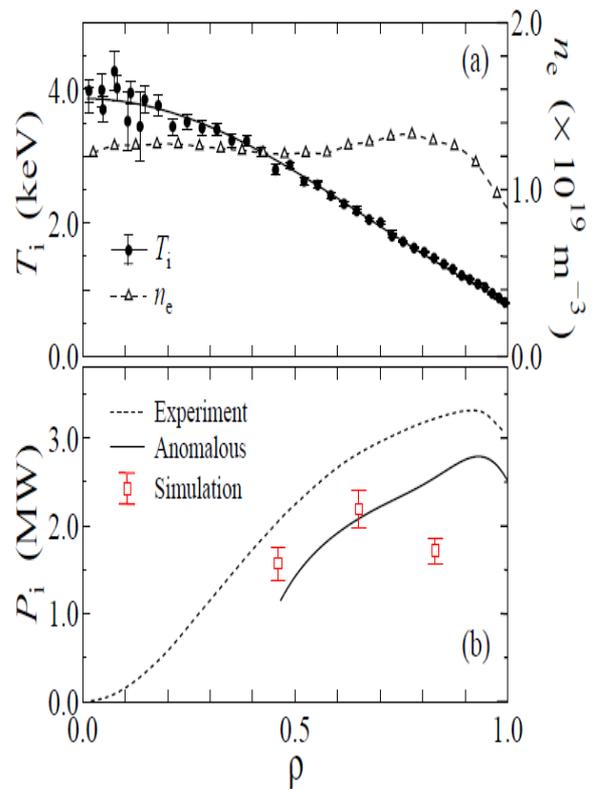


図 3.2.4-9. 高 T_i 放電における (a) n_e, T_i 分布 (b) イオンの熱流の実験値とシミュレーション値の比較。実線は乱流駆動成分を示している。

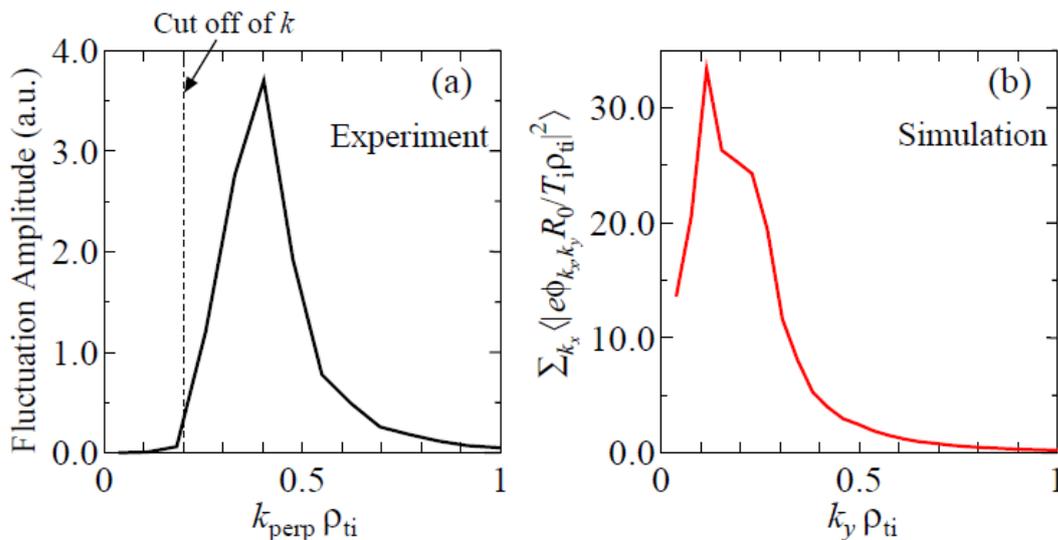


図 3.2.4-10. $\rho=0.65$ における (a) 2D-PCI による乱流スペクトル (b) GKV-X による非線形乱流スペクトル

温度勾配不安定性で支配されていることを示唆している。今後、非断熱的電子の効果も取り入れ、高 T_i における粒子、不純物輸送の実験とシミュレーションの比較を PPPL との共同研究を通じて、取り組む予定である。

(iv) TASK3D による温度分布の予測

高イオン温度プラズマに対し数値シミュレーションを行い、プラズマ輸送、径電場等の解析により、現在問題となっている高イオン温度ショットにおける非定常な振る舞いの原因を明らかにし、高温プラズマの最適なシナリオを求めることを最終的な目的として研究を進めている。特に、京都大学と核融合科学研究所で共同研究により開発されたヘリカル系の統合シミュレーションコード TASK3D (図 3. 2. 4-11) の改善を進め、実験データに対応した新古典輸送解析 (データベースの構築、その活用)、径電場解析 (特に HIBP 計測結果との比較)、パワーバランス輸送解析を行い、さらに、加熱パワーの進展によって進捗が期待されるパラメータ領域での径電場予測、その新古典熱輸送低減効果について定量的把握を進めた。また実験的な研究として、予測精度を向上させることを目指して、高イオン温度プラズマ条件で、イオン温度等の時間変動が少ない実験を行い、TASK3D で用いられている異常輸送モデルの検証および適切な比例定数を求めるため、 $R_{ax}=3.6, 3.75m$ 配位において密度・パワースキャンを行い実験データの収集を行った。これらの研究は、数値実験研究プロジェクト・統合輸送コードサブグループと連携し、京都大学との共同研究で進められている。

図 3. 2. 4-12 は、 $1 \times 10^{19} m^{-3}$ の密度で、gyro-Bohm モデルを仮定し、比例係数として以前のサイクルでの結果により得られたもの ($C_{gb}=16$) を用いた場合のプラズマ温度の予測結果とこれに対応する実験結果との比較を示す。比較的良い一致が得られているが、さらに広いパラメータ領域で一致できるようなモデルの構築を進めるために、データの収集を行い、解析を進めている。

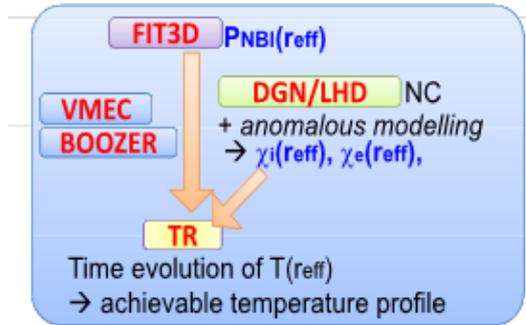


図 3. 2. 4-11. TASK3D コード 関連モジュールの概略図

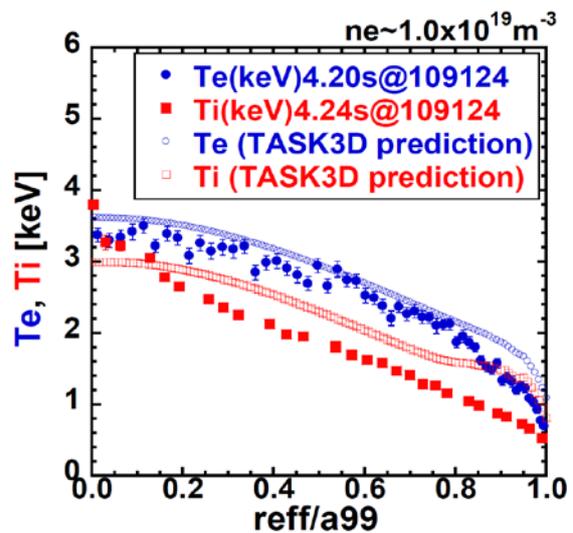


図 3. 2. 4-12. 到達温度の理論予測と実験結果の比較

3) 温度計測手法の新規開発 (XICS 計測)

米国のプリンストンプラズマ物理研究所との共同研究のもと、LHD において 2011 年から XICS (X-ray Imaging Crystal Spectroscopy) 計測が導入され、運用を開始した。本計測では、LHD プラズマの横長断面を水平方向から観測し、16 価のヘリウム様アルゴンが発する X 線スペクトルを、プラズマから約 22.5m 離れた位置に設置された球面結晶により分光した後、検出器により測定する。計測の時間分解能は 20ms、空間分解能は 2 cm であり、得られた X 線スペクトル分布のドップラー

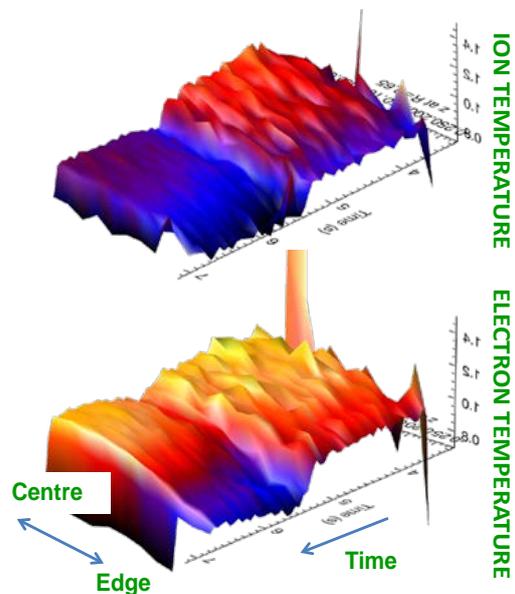


図 3.2.4-13. XICS によるイオン温度分布、電子温度分布計測の初期結果

拡がりからイオン温度分布、その強度比から電子温度分布を評価する。現在、LHD ではイオン温度分布の計測手法としては荷電交換分光法が主力となっているが、イオン温度計測のためには垂直 NB の変調入射を行う必要がある。一方、XICS 計測は受動計測であるため、NB 変調等の摂動を与えることなくイオン温度分布計測が可能である。また、本計測手法はヘリカル系への導入としては世界でも初の試みである。2011 年の高温度テーマグループ実験では、図 3.2.4-13 に示すようにイオン温度分布、電子温度分布計測の初期結果の取得に成功している。現状の XICS システムでのプラズマ計測範囲は、 $0 < \rho < 0.6$ 程度であるが、2012 年度には現在の 3 倍の大きさの検出器を導入することで、 $-1 < \rho < 1$ の範囲の計測が可能となる見通しである。

4) 高電子温度領域の拡大

2006 年以来、筑波大学との共同研究として、LHD における電子加熱用の大電力ジャイロトロン(周波数:77GHz, 単管出力: 1 MW 超)の開発が進められている。図 3.2.4-14 に実験サイクルごとの ECH 総入射電力の進展を示す。図中、棒グラフ上の数字は運用したジャイロトロンの台数を表している。2009 年(13 サイクル)までに 3 台の 77GHz ジャイロトロンの導入が完了しており、プラズマ実験に供されている。2011 年(15 サイクル)には EC 波の LHD への総

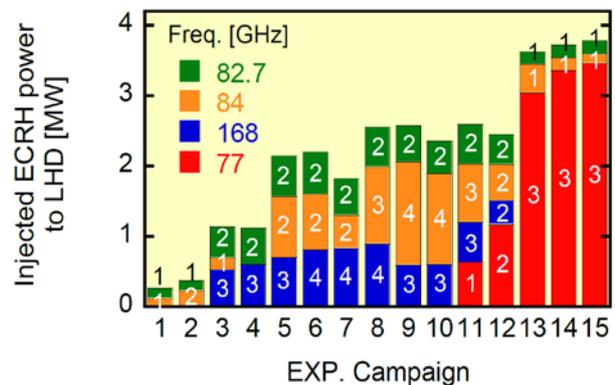


図 3.2.4-14. 実験サイクルごとの ECH 総入射電力の進展

入射電力は 3.7MW(内 77GHz ECH 電力は 3.5MW)に及び、高電子温度領域の拡大に大きく貢献している。

図 3.2.4-15 に 2009 年以降の高電子温度実験で得られた、左： $n_e \sim 0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ における電子温度の径方向分布，右：到達中心電子温度の線平均電子密度依存性を示す。2009 年においては、大電力 ECH により、LHD でのこれまでの最高電子温度 10keV を大きく上回る 15keV のプラズマの生成に成功した。2009 年以降は、大幅な電子加熱電力の増加は行われなかったものの、磁場配位や ECH 入射条件の最適化により、到達電子温度領域を拡大することができている。特に、2011 年には、実験磁場配位として $R_{ax}=3.75\text{m}$, $B_t=+2.736\text{T}$ (サブクール磁場)を選択することにより、中心電子温度 20keV を実現した。この磁場配位では、水平ポートアンテナからの 77GHz EC ビームが垂直入射でプラズマ中心を加熱することが可能であるため、同 EC ビームが斜め入射となる $R_{ax}=3.50, 3.53, 3.6\text{m}$ の磁場配位に比べて、低密度の条件における非サーマル電子の発生が少なく、バルクプラズマへの ECH 電力吸収が有効に行われていたと考えられる。

他、比較的高密度なプラズマについて、 $n_e=1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において、中心電子温度 8.7keV を実現しており、核融合プラズマ条件に向けて、着実にパラメータの進展が得られて

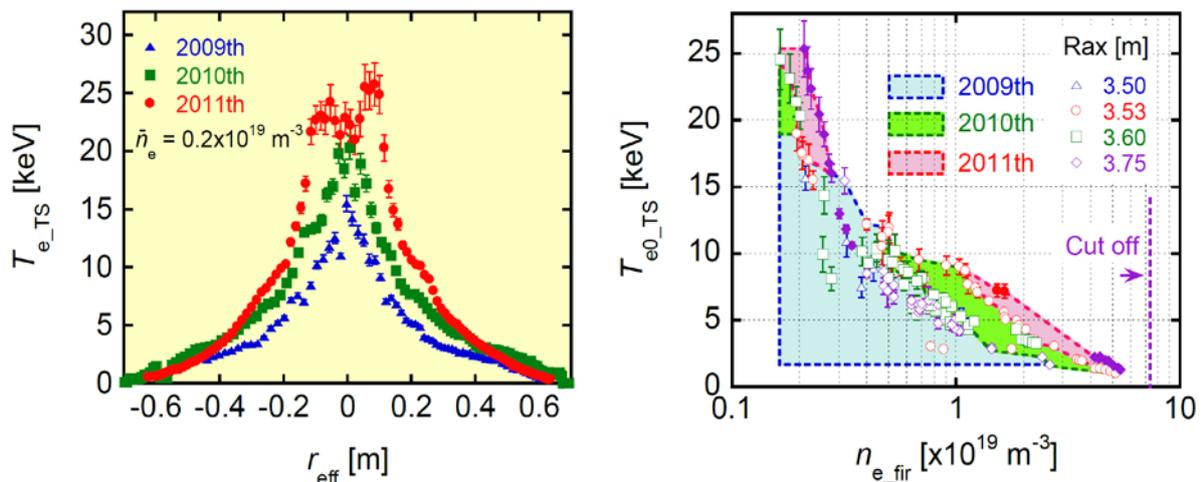


図 3.2.4-15. 2009 年以降の年度で得られた、左： $n_e \sim 0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ における電子温度の径方向分布，右：到達中心電子温度の線平均電子密度依存性

いる。さらに高密度の条件での実験も実施されており、ECH 単独の放電で $4.0 < n_e < 5.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $W_p \sim 300 \text{kJ}$ のプラズマを 2.3 秒の間、放射損失崩壊等を起こさずに、安定に保持することができた。この放電の保持時間は ECH のパルス幅で制限されていた。この結果は、より長パルスの大電力 ECH 入射の実現によって高密度プラズマの定常保持が可能であることについて有望な見通しを与えている。

5) まとめ

図 3.2.4-16 に 2011 年までにおける NBI 加熱パワー、ECH 加熱パワーの進展と、合わせて、到達イオン温度、電子温度の進展を示す。近年では 2010 年 (14 サイクル)、2007 年 (11 サイクル) からの NB#5, 77GHz ジャイロトロン の 運 転 開 始 に 伴 い、到達イオン温度、電子温度がともに大きく増進していることがわかる。これらの成果の達成には、加熱パワーの増強のみならず、有効な実験シナリオの構築が進展したことも大きな要因である。特に、直近の 2011

年 (15 サイクル) においては、高イオン温度実験では ICH による壁コンディショニングによるリサイクリングの低減により中心イオン温度 7 keV、高電子温度実験では磁場配位・ECH 入射条件の最適化により電子温度 20keV が達成された。また、高イオン温度放電に対する物理研究も並行して行われており、イオン内部輸送障壁形成時における熱輸送・運動量輸送の振る舞いの理解、不純物ホール の 特 性 評 価 が 進 展 して いる。

表 3.2.4-1 に高温領域の拡大研究に関連した共同研究、プロジェクト間連携研究についてまとめる。これらによって、連携による成果が実際に示されている。また、本研究グループでは学生の学位論文研究として、次に示すテーマを供している。

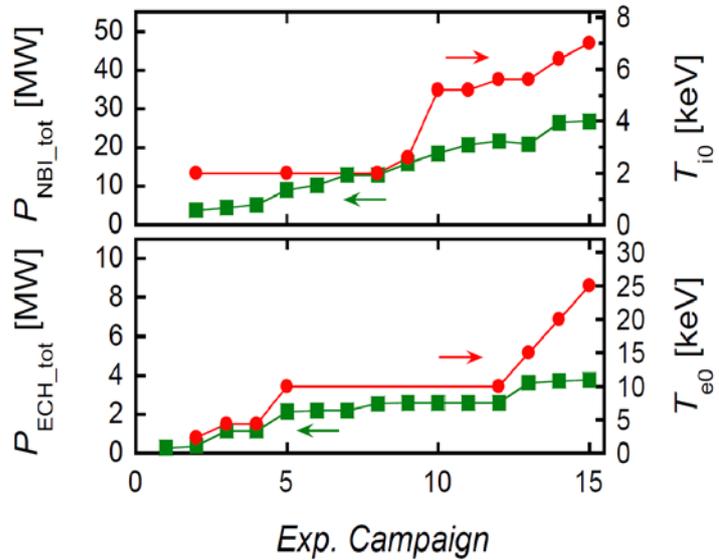


図 3.2.4-16. NBI 加熱パワー、ECH 加熱パワー、到達イオン温度、電子温度の進展

表 3.2.4-1 高温度領域の拡大研究に関連した共同研究、プロジェクト間連携研究

外部研究機関との共同研究		
研究連携先	研究内容	成果
Princeton Plasma Physics Laboratory (米国)	LHD における XICS の開発と導入	・電子温度、イオン温度の空間分布測定に成功
京都大学	TASK3D のための実験データベースの構築	・複数の磁場配位における到達イオン温度の密度依存性の取得
東北大学	高イオン温度プラズマにおけるリサイクリングの研究	・真空容器壁条件と密度分布、NB デポジション分布、到達イオン温度の関係を評価
筑波大学	LHD 用大電力 77 GHz ジャイロトロンの開発と導入	・3本の77GHz管の導入が完了 ・3.8 MW の ECH パワーで 20 keV の電子温度達成
プロジェクト間連携研究		
研究連携先	研究内容	成果
数値実験研究プロジェクト	TASK3D の開発と LHD への適用	・高イオン温度放電を対象としたシミュレーションによる温度分布予測と実験結果が定性的に一致
数値実験研究プロジェクト	GKV-X による ITG 乱流輸送シミュレーション	・PCI 揺動の線形的・非線形的特徴との定性的一致 ・ITG 乱流駆動のイオン熱損失の定量評価

- ・竹田尚弘（京都大学工学部物理工学科 4 回生）：『高 T_i プラズマの TASK3D による解析』
- ・山口裕之（京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 修士 1 年生）：『時間発展プラズマにおける NBI ビーム速度空間分布と加熱吸収分布の解析』
- ・杜曉第（総研大学修士 2 年生）：『ヘリカル系におけるフィッシュボーン的不安定性の励起』
- ・松岡清吉（2010 年に総研大博士課程を修了）：『Effect of Finite Orbit Width on Neoclassical Transport in High-Temperature Helical Plasmas』

次年度以降の見通しとして、高イオン温度放電では、2011 年度に顕著な効果が観測された ICH 壁コンディショニングシナリオの最適化、並びに、新たに運用が開始されるダイバータ排気による周辺密度制御により、真空容器からの水素リサイクリングをより低減し、NB デポジションパワーを増加させる放電を実現することで、さらなるイオン温度の向上が見込まれる。高電子温度放電に関しては、2012 年度に出力 1 MW、周波数 154GHz のジャイロトロンが新規に 1 台導入されるため、最高到達電子温度のさらなる向上が見込まれるだけでなく、これまでの 77GHz ジャイロトロンよりも発振周波数が増大することから、高密度領域での有効な局所電子加熱が期待される。

3. 3 物理テーマ実験

3. 3. 1 コアプラズマの熱・粒子輸送

本テーマグループでは、核燃焼プラズマの実現及び制御を念頭においたコアプラズマの熱・粒子輸送に関する課題解決に向けた研究を進めている。第 14、15 サイクルでは、特に、計測精度の改善と新しい解析手法の導入による輸送を担う物理機構のより革新的な検証や同位体効果解明に寄与する計測手法の開発及びその適用可能性の総合評価実施などを目標として研究を進めた。

本テーマグループで行っている実験手法の一つに、ECH モジュレーションやペレット入射といった外部からの摂動に対する物理パラメータの時間応答を精度良く計測することで輸送特性を理解する手法(ダイナミクス輸送解析)がある。これにより、従来の温度勾配と熱流束の比例関係を仮定した単純なモデルを越えた輸送物理、例えば、注目している物理量とは異なる物理量の勾配など(輸送行列における非対角成分)の影響や、輸送係数の物理量依存性(非線形性)、異なる位置の物理量に対する依存性(非局所性)を研究することができる。具体的には、非対角成分の影響については、接線 NBI 加熱時におけるトロイダル流の物理特性からトロイダル粘性と熱輸送の関係が調べられている。また、電極挿入バイアス実験によってポロイダル流を外部から駆動することで、輸送の遷移現象を担う物理機構の解明が期待される。更に、ECH モジュレーションで発生する熱パルスの伝搬特性、即ち熱輸送特性から、磁場構造を調べるといった研究も行われ、磁気面のトポロジー変化の同定に有効であることが示された。

近年ゾーナル流やストリーマに代表されるようなメゾ、マクロといった微視的乱流よりも大きなスケールを持つ乱流構造の同定が進み、それら異なるスケール間の相互作用が輸送に重要な役割を持っているとの作業仮説の下、研究が進められている。LHD では、ECE、反射計、HIBP 等といった高い精度を有する計測器が整備されている。これらによる揺動データに対して、ウェーブレット解析やバイコヒーレンス解析等を適用することによって、長距離相関を有する揺動や、異なるスケール間の相互作用の存在が確認された。また、HIBP によってゾーナル流の一種である測地線音響モード(GAM)に伴う電場揺動が計測され、高周波密度揺動がこのモードによって変調されていることが明らかになった。この他、TESPEL(Tracer Encapsulated PELlet)により Z の異なる粒子を同時にプラズマに入射することで不純物輸送の Z 依存性を 1 回の放電で取得するといった新しい試みが行われ、成功裏に実施できたことを示すデータが得られている。

これらの成果について以下に抜粋して説明する。また、長距離相関、乱流解析(九州大学)、磁気シアの寄与(大阪大学)、電極挿入バイアス実験(東北大学)、で共同研究が行われ成果が得られている。

非局所輸送

LHD では、遠く離れた場所で起きた現象に対して瞬時に応答する現象、つまり拡散的描像では到底理解できない非局所輸送現象と呼ばれる現象について研究を進めている。図 3.3.1-1(a)に示すように、LHD プラズマに微小な不純物ペレットを入射すると、周辺部で発生した温度降下が拡散的にコア部へ伝播（コールドパルス）するのではなく、コア部の温度が即時的に上昇する場合がある。この時、プラズマ中心部における電子熱流束と電子温度勾配の関係は、局所的な流束と勾配の関係の一意性を根拠とした局所輸送の概念では到底理解できない時間変化を示している。この局所輸送からのずれを定量的に評価するために、滞在時間分布解析を導入した。この解析では、1)「周辺冷却によるプラズマの変動」は「乱流のゆらぎによるプラズマの変動」と等価である、2)「乱流のゆらぎによって変化する熱輸送状態の存在確率」は「ある温度勾配領域における滞在時間」に等しい、という作業仮説を基にしている。例えば、定常状態では温度勾配は一定であるため、滞在時間分布はその温度勾配でデルタ関数のような鋭いピークを示す。また、局所拡散輸送が支配的な場合では、過渡応答を与えても元に戻ることで元の温度勾配をピークとした少し広がった分布を示す。しかし、非局所輸送現象が発現するプラズマでは、図 3.3.1-1(b)に示す様に、その様相は一変する。非局所輸送現象が発現するプラズマでは、プラズマ中心部の広い範囲 ($0.2 \leq \rho \leq 0.45$, 約 15cm) において、同じような滞在時間を持ったまま、電子温度勾配が大きく変化していることが明らかとなった。このことは、プラズマ中心部における熱輸送が一意に決まらない状態となっていることを示唆している。一方、プラズマ周辺部の広い範囲 ($\rho > 0.55$, 約 6 cm 以上) においては、元の輸送状態とは別の輸送状態が存在していることも明らかとなった。いずれの領域も、典型的な微視的乱流サイズ (数 mm) よりも十分大きなサイズを有している。

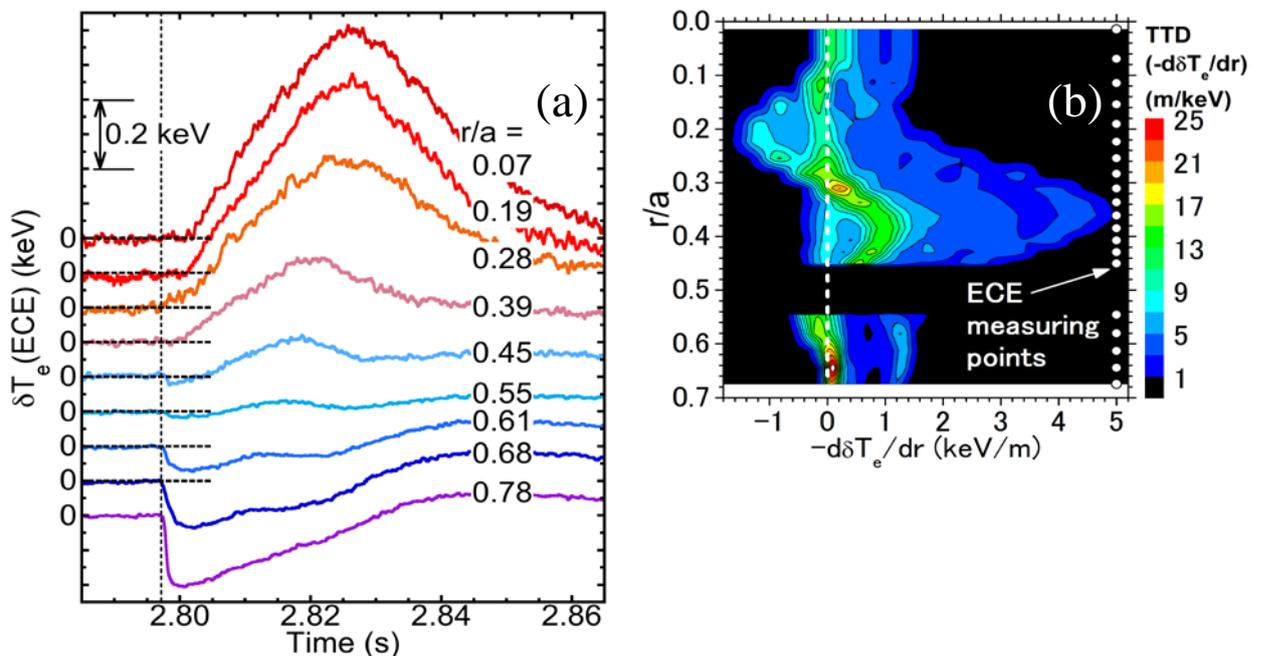


図 3.3.1-1 (a) TESPel 入射時刻を 0 とした TESPel 入射前後の電子温度の変動分の時間変化。

(b) TESPel 入射時刻を 0 とした電子温度勾配の変動分に対する滞在時間分布の空間分布。

これらのことは、周辺部を冷却したことで発現する非局所輸送現象は、これら2つの大規模なコヒーレント構造同士が作用した結果であることを示唆している。このように、過渡応答を調べることによって、一見安定定常に見えるプラズマにも大きな変化を引き起こす潜在的構造があることを見出すことができる。

長距離相関揺動の発見

プラズマ中に誘起した熱パルスが拡散輸送による予測よりも速くプラズマ中を伝播する現象や過渡的な輸送障壁形成現象が LHD 及び多くのトカマクで観測されている。これらの現象は、“プラズマ輸送は質的に非拡散的であり、核燃焼プラズマの動的輸送変化をジャイロボーム的な拡散モデルから予測する事は困難である”事を示す。

これまで微視的揺動の集合として捉えられていたプラズマ乱流を「ミクروسケール揺動とメゾ/マクروسケール揺動が共存する系」として捉える見方が提唱されている。乱流の動的応答においても“異スケール揺動間の結合”が重要な役割を担っている事が指摘されている。図 3.3.1-2 に示すように長距離相関を持つマクروسケール揺動を介して離れた位置のマイクロ揺動が相互作用する可能性がある。この長距離相関揺動が世界で初めて LHD にて発見された。この揺動は多種の計測器間の相関を観測するという手法(correlation hunting)を用いて同定した。図 3.3.1-3 に揺動の径方向相関関数の等高線を示す。揺動は低周波数(2-4kHz)でプラズマ半径と同程度の径方向相関長を持つ。径方向位相速度は平均して 1 km/s でありダイナミック輸送実験で観測される“速いパルス伝搬”の伝搬速度と同程度である。相関関数とポロイダルモード数(=1)を用いて再構築した揺動のポロイダル断面構造ではスパイラル状の構造によってプラズマ中心とエッジがつながっている。反射計計測とのクロスバイスペクトル解析により、長距離相関揺動はマイクロ揺動と非線形結合している事も明らかになった。長距離相関揺動の発見により、輸送の動的応答の理解が飛躍的に進展すると期待される。

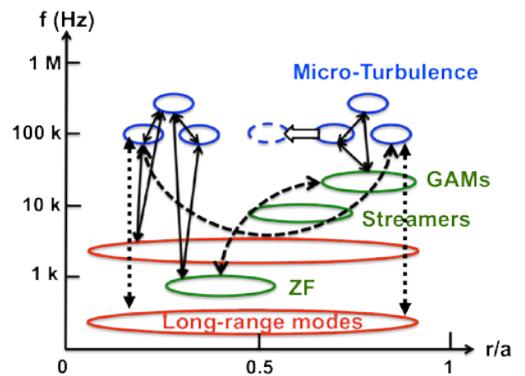


図 3.3.1-2 マルチスケール揺動の共存図中の矢印は非線形結合を意味する

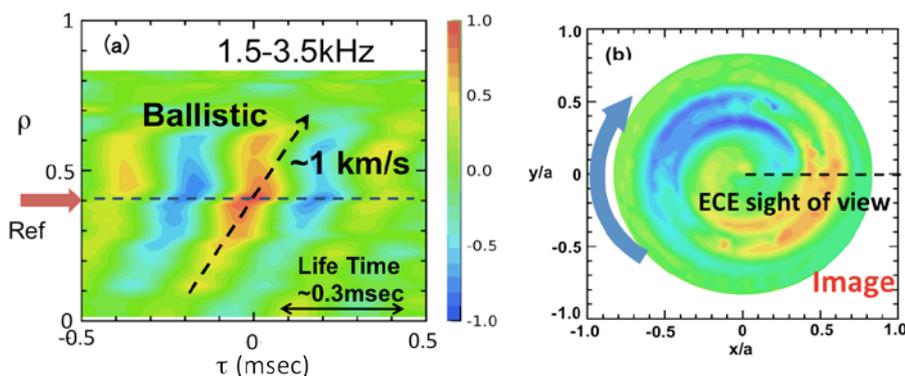


図 3.3.1-3 (a) 揺動の相互相関関数のコンター相関関数は $\rho=0.41$ をreferenceとしている。

図, (b)再構成した揺動のポロイダル断面図

トロイダル流と非対角項及び自発回転

高イオン温度時に大きなトロイダル流速が生じることから、非対角項が運動量輸送へ及ぼす影響に注目が集まっている。また、不安定性の制御の観点からもトロイダル流は注目を集めている。トロイダル流及び非対角項の理解を助けるためにも、ヘリカルプラズマ中における流れが、外部からの駆動力でどのように生じるのかを把握しておく必要がある。そこで外部からの駆動力の向きを切り替えた時に、プラズマ中心部の流れが、どのように変化するかを観測する実験が提案された。図 3.3.1-4 に示すように、中性粒子ビームを Co 方向に入射した後、その方向を Counter 方向に切り替える実験である。ビーム入射方向に、閉じ込め時間程度の時間スケールでトロイダル方向の流れが駆動されることが予想される。全時間にわたって、Co 方向、及び Counter 方向に駆動力を増加させた場合には、青実線や緑実線で示すように、それぞれの方向にオフセットした変化が予想される。切り替え後の変化量は、駆動力を一方方向に増加させた場合でも変化はないことも予想される。実際に応答を観測すると、そのような単純な応答を示さなかった。1本のビームラインを用いて切り替え実験をした場合、Co 方向への変化と Counter 方向への変化の時間スケールに違いが観測された。特に、Co 方向への変化が閉じ込め時間（数 100ms）に比べ非常に緩やかな点が興味深い。さらに駆動力を追加した場合には、Co 方向の大きなトロイダル流速が一時的に生じることや、Counter 方向への流れが抑制される現象が観測されている。これらにはイオン温度の分布や磁場構造などが関連していることを示唆するデータが得られており、磁気軸位置を変化させた場合の観測とあわせて解釈を進めている。

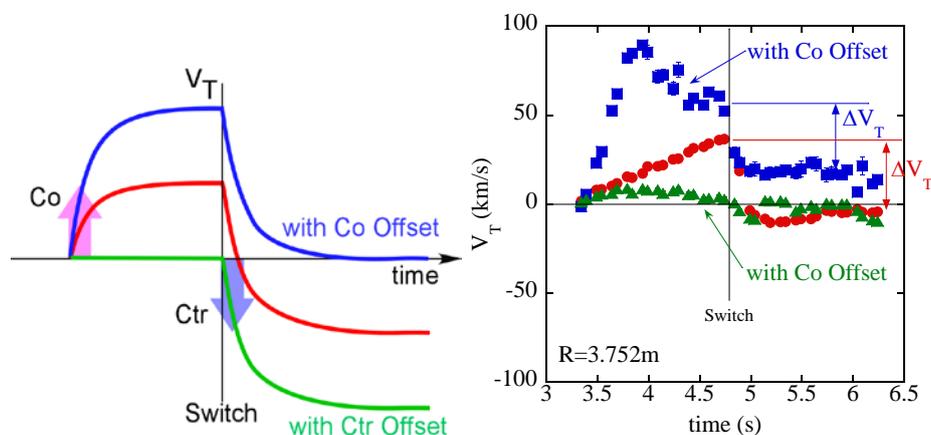


図 3.3.1-4 ビーム切り替え実験の概要（左）と実験における観測

LHD におけるトロイダル流及び非対角項の影響に関して、更に次のような進展があった。一つ目は、イオン ITB 形成プラズマを対象とした解析により、運動量輸送が熱輸送と相関し、イオン ITB 形成とともに改善することを示した。二つ目は、イオン温度勾配と相関する Co 方向の自発回転（輸送行列の非対角項効果）が明らかとなった。図 3.3.1-5 に示すのは、イオン ITB 形成時の運動量輸送束と運動量勾配の関係である。Co 方向と Ctr 方向に外部トルクがある場合の比較では、自発回転の効果により原点非

対称となっていることがわかる。

ストキャスティック構造の同定

中性粒子ビームの入射方向を co から counter に切り替えたところ、磁気シアが低減し、磁場のストキャスティック化に伴い電子温度とイオン温度に平坦化が起こると同時にトロイダル回転が大幅に減少する現象が観測された。図 3.3.1-6 で示されるように、磁場のストキャスティックが起こる前には中心ピークした counter 方向のトロイダル回転が得られているが、ストキャスティック化後は中心部のトロイダル回転が大幅に減少するものの、ゼロにはならなかった。

モジュレーション電子サイクロトロン加熱 (MECH) を行い、off-axis ($r_{\text{eff}}=0.15\text{m}$) 加熱にてヒートパルス伝播実験を行った。図 3.3.1-7 に示す様にビームの co から counter への切り替えを行う前の温度分布がピークしている $t=6.2\text{s}$ では、輸送に対応するパルス伝播が観測されているが、電子温度が平坦化している $t=7.0\text{s}$ では、パルスの振幅が平坦化すると共に速いパルス伝播がコア部で観測された。

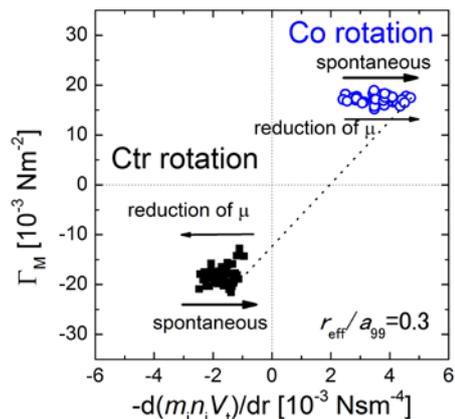


図 3.3.1-5. イオン ITB 形成 (大きなイオン温度勾配) 時の運動量輸送束と運動量勾配の関係。

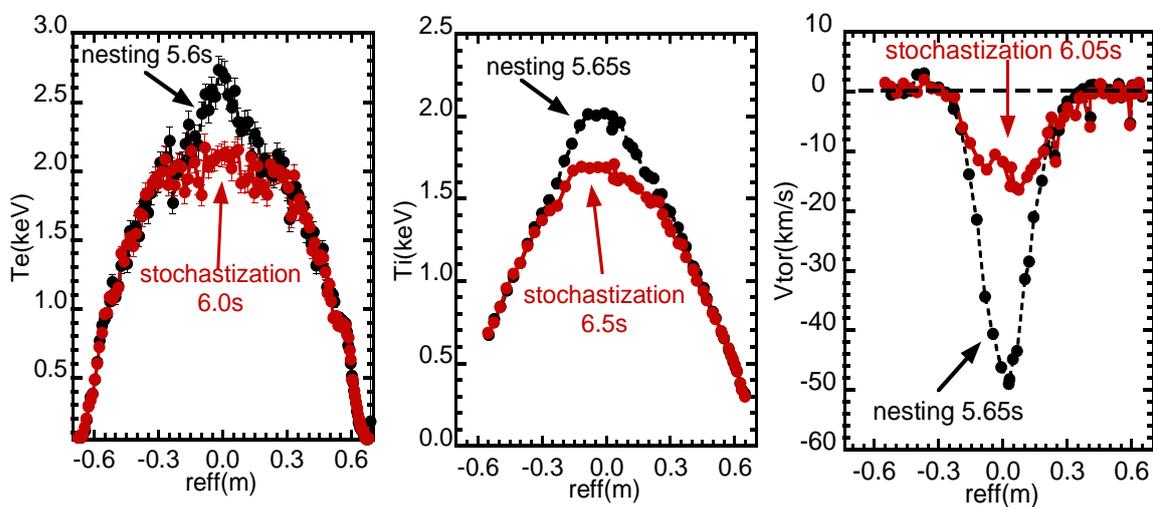


図 3.3.1-6 磁場のストキャスティック化の前後 ($t=5.6\text{s}, 6.0\text{s}$) の電子温度、イオン温度、トロイダル回転速度分布

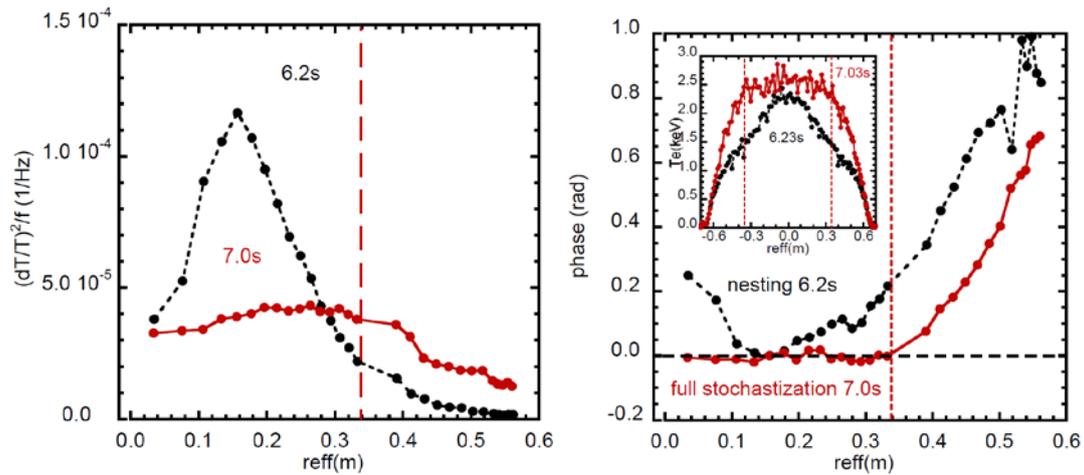


図 3.3.1-7 磁場のストキャスティック化の前後 (t=5.6s, 6.0s) の電子温度、イオン温度、トロイダル回転速度分布

強イオン加熱 LHD プラズマの熱輸送特性に係わる磁場構造(磁気シア)と電子・イオン温度比ならびに衝突度の寄与

トロイダル系閉じ込め装置における輸送機構の普偏的理解と核燃焼プラズマの性能予測精度向上を目的として、プラズマ電流による磁場形成を伴わないヘリカル装置である LHD で、磁気シアの効果に注目した実験(対向する接線方向入射 NNB を用いて 120kA を超えるビーム電流を駆動することによって磁気シアを変調)を幅広い放電領域(電磁流体的な不安定性の排除を睨んだ外寄せ配位)で行い、JT-60U 等のトカマク装置と比較検討した。

その結果、LHD プラズマでは過去のトカマク研究に基づく予測に反して磁気シアが熱輸送特性に顕著な寄与を及ぼさないことが分かった(密度の領域にかかわらず磁気シアがほぼゼロになっても温度勾配の特性長の変化は数%以内)。JT-60U における高性能放電は強力なイオン加熱が主体であり、電磁場構造の制御(負磁気シア配位と強力な径方向電場の形成)による成長率の低減が可能なイオン系乱流揺動を抑制することによって得られていると考えられる。電子加熱が支配的な LHD では磁気シアの寄与が小さいと考え、 T_e/T_i に注目した解析を比較的(NB#4 による)イオン加熱の割合が高い放電($T_e/T_i < 1.5$)に注目して実施したが、やはり明確な磁気シアの影響は確認できなかった。トカマク装置と LHD ではコア領域($\rho < 0.25$)の乱流揺動の特性が異なり、磁気シアが成長率の抑制に有効なイオン系乱流揺動が LHD 装置には存在しない可能性がある。

大振幅の高速イオン励起高周波帯状流を有する反転磁気シアプラズマにおけるバルクイオン温度の自発的増加

LHD では counter NBCD で反転磁気シア(RS)配位を生成する手法を開発した。このような RS プラズマでは高速イオン励起の反転磁気シアアルヴェン固有モード(RSAE)と

測地線音響モード(GAM)が準定常的に励起されることが明らかとなった。このようなRSプラズマではRSAE周波数が、NBCDで誘起される電流に応じて回転変換の極小値 $(1/2\pi)_{\min}$ が $2/3$, $1/2$ 及び $1/3$ と低下するとともに特徴的な極小値を經由して下方及び上方掃引を示す(図3.3.1-8 上段の図の $n=-1$ モード)。この極小周波数はGAM周波数とバルクプラズマ圧力と高速イオン圧力の空間勾配に関係している。この極小値と同程度のほぼ一定の周波数を有する $n=0$ のトロイダルモード数のコヒーレントな磁場揺動が観測される。この高速イオン励起GAMは、DIII-Dで観測されたように過渡的の発生するのではなく準定常的に励起されるという特徴を有している。この放電において、重イオンビームプローブによりプラズマ電位分布と電位揺動さらには密度揺動の測定を行った。図3.3.1-8 中段の図に示すようにプラズマ中心部($r/a\sim 0.18$)におけるGAMによる電位揺動(実効値)は極めて大きく、計測位置の電子温度と同程度あるいはこれを超える値である。

このようなプラズマで、プラズマ中心部のイオン温度の自発的な上昇が観測された。図3.3.1-8 下段の図が示すように、 $(1/2\pi)_{\min}$ が $1/3$ を通過した直後からプラズマ中心部のイオン温度が約0.4sの間直線的に増大している。このイオン温度上昇の要因として、(1)大振幅GAMによる径電場シアの増大による閉じ込め改善、あるいは(2)GAMのバルクイオンによるランダウ減衰によるイオン加熱、が考えられ、現在解析中であり、現状ではまだ明確な結論が得られていない。

この結果、トカマクやヘリカルプラズマにおける高速イオン励起GAM特性とそれの高速イオンや背景のバルクプラズマへの影響についての統一的描像の構築に寄与するものと期待される。

高速イオン励起測地線音響モードの研究

GAMはトーラスプラズマにおける帯状流の一種として励起されるモードであり、乱流の非線形結合に伴い励起されるモードとして乱流輸送研究の分野で精力的に研究されてきた。一方、GAMは高速イオンの速度分布上の非一様性によっても駆動されることが明らかになってきている。LHDではHIBPを用いたプラズマ内部での電位揺動の局所直接計測ができるため、GAMを含む帯状流の本質である電位揺動の検出が可能である。この利点を生かして、高速イオン励起GAMの同定及びその特性を調べるための

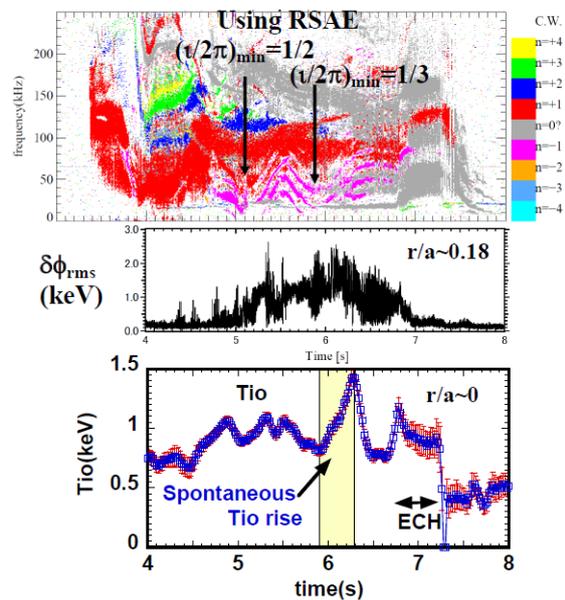


図3.3.1-8 GAMによる大振幅電位揺動が観測された反転磁気シア配位プラズマにおけるバルクイオンの自発的な上昇現象。

研究を進めた。

この研究の結果、高速イオン励起 GAM がプラズマ中心近傍に励起されていることを明らかにし (図 3.3.1-9)、その電位揺動が、電子温度に対応するエネルギーの数 10% に及ぶ大きなものであることを世界で初めて明らかにした。さらに、この結果から電場揺動、つまり流れの揺らぎを伴ったモードであることを示し、带状流の一種である GAM であることを同定した。この GAM は密度揺動の高周波成分の振幅変調としても観測されており (図 3.3.1-10)、高エネルギー粒子駆動モードがバルクプラズマの輸送に影響を及ぼしていることを示している可能性もあり、現在解析を進めている。

揺らぎの場の量が定量的かつ局所的に明らかになったことは、理論解析・シミュレーションとの比較を容易にし、物理モデルの試金石として精密化に寄与する。また、高速イオン励起 GAM に伴い大きな電位揺動が存在しているという観測結果は、高速イオンのエネルギーが GAM の Landau 減衰を経てバルクイオンの加熱に寄与するという新しい GAM チャネリング理論を進展させる動機の一つになっており、今後の LHD 実験における検証が、将来の核融合炉におけるイオン加熱チャンネルとして核融合炉の成立性を議論する上で重要な知見を与えると考えられる。

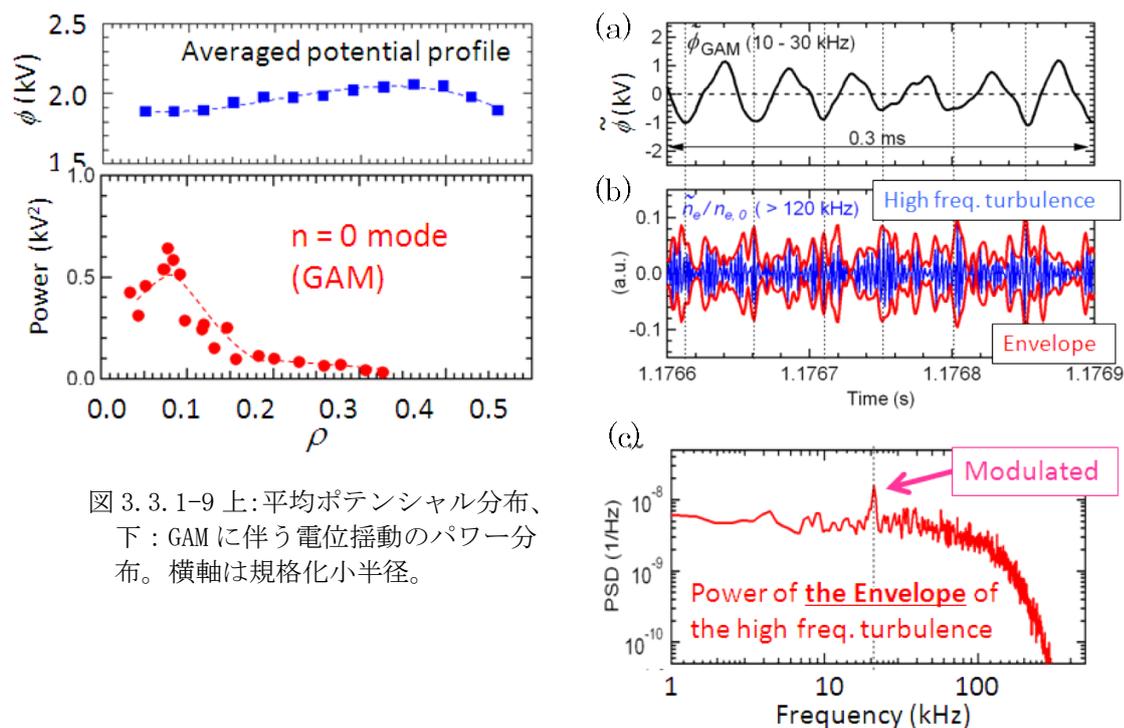


図 3.3.1-9 上: 平均ポテンシャル分布、下: GAM に伴う電位揺動のパワー分布。横軸は規格化小半径。

図 3.3.1-10 (a) GAM に伴う電位揺動。(b) 規格化密度揺動の高周波成分 (120kHz 以上) とその包絡線。(c) (b) の包絡線の周波数スペクトル

LHD における電極バイアスによる径電場制御実験

本研究は東北大学の笹尾・北島研究室との共同研究である。カーボン製電極を真空容器に対してバイアスする事により、径電場を能動的に制御し、閉じ込め状態の遷移を実現する事が本研究の目的である。

図 3.3.1-11 に $R_{ax}=3.60\text{m}$, $B_t=2.75\text{T}$ の磁場配位で実施された電極バイアス実験における、(a) 電極電圧と電極電流, (b) エネルギー閉じ込め時間, (c) MIR 密度揺動の周波数スペクトルの典型的な時間発展波形, (d) 電極電圧-電極電流の特性曲線, (e) 4 配位において Shaing モデルから計算されたポロイダルイオン粘性のポロイダルマッハ数依存性, (f) 遷移駆動力の磁場配位依存性を示す。本実験では $\sim 200\text{kW}$ の ECRH により、生成・維持されたプラズマをターゲットとした。また、電極ヘッドは $\rho \sim 0.8$ まで挿入されており、真空容器に対して正バイアスする事で、電子捕集による径電流駆動を試みた。この放電ではパルス幅 200ms , ピーク値 600V の三角波で、 $t=0.91\text{--}1.11\text{s}$ の間バイアスをしている。図より、電極電圧のランプアップ時、 $t=0.99\text{s}$ において、電極電流が減少している事が確認できる。この結果は径方向の抵抗の増大を示しており、粒子閉じ込めが改善した事を示唆している。またこの時、エネルギー閉じ込め時間が 8% 程度増大している。さらに、図 3.3.1-11(c)からは、バイアスが開始されると 10kHz 以上の密度揺動振幅が増大するが、抵抗の増大後は広範な周波数領域で揺動レベルが低減している事が確認できる。電極電圧のランプダウン時は、 $t=1.06\text{s}$ において逆遷移が発生しており、エネルギー閉じ込め時間の変化は明確ではないが、密度揺動は再び増大していることがわかる。

図 3.3.1-11(d) より、 450V 程度の電極電圧までは電極電流は単調増加するが、それ以上の電極電圧が印加されるとプラズマは負性抵抗を示すようになる事が確認できる。また、順遷移・逆遷移の特性曲線において、 $420 \leq V_E \leq 600\text{V}$ において履歴特性が現

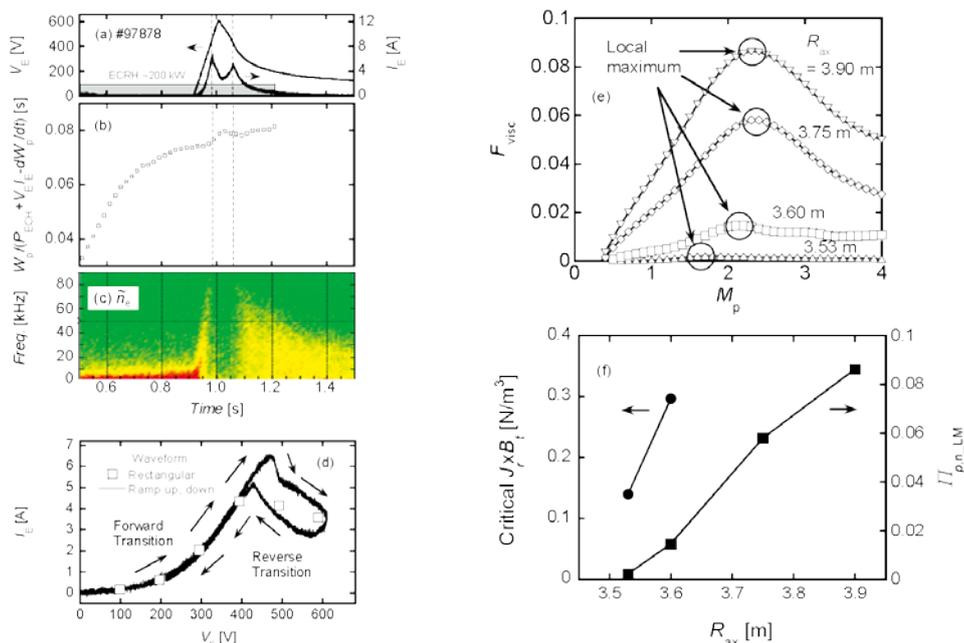


図 3.3.1-11 (a) 電極電圧と電極電流, (b) エネルギー閉じ込め時間, (c) MIR 密度揺動スペクトルの典型的な時間発展波形, (d) 電極電圧-電極電流の特性曲線, (e) 4 配位におけるイオン粘性のポロイダルマッハ数依存性, (f) 遷移駆動力の磁場配位依存性

れている。これらの特性は、電極バイアスによってプラズマの小半径方向に流れた電

流が誘起するポロイダル回転駆動力が、図 3. 3. 1-11 (e) に示される粘性の極大値を超えることによって(逆遷移の場合は駆動力が極小値を下回ることによって)、閉じ込め状態が遷移するというシナリオによって解釈される可能性がある。また、図 3. 3. 1-11 (f) に示されるように電極バイアスによる遷移駆動力の磁場配位依存性は外寄せ配位ほど大きくなる傾向にあり、理論の予測と定性的に一致した。今後は、他装置の電極バイアス実験の結果との比較研究を進めることで、ポロイダルイオン粘性のリプル構造依存性の理解の進展が期待される。

TESPEL (Tracer Encapsulated PELlet) を用いた不純物輸送

LHD では、3 種混合トレーサーを内蔵した TESPEL による不純物輸送に関する研究を行っている。本実験の目的は、同一のプラズマにおいて異なった原子番号と質量の不純物の振舞いの違いを観測すること、及び真空容器内壁から由来する Fe などのプラズマ中に元来混在する不純物との比較を行うことである。第 15 サイクルで 3 種混合トレーサー (V, Mn, Co) を内蔵する TESPEL 入射実験を行い、上記の Fe や Cr の原子番号をちょうど ±1 で挟んだ形となっている。まず、3 種混合トレーサーが $K\alpha$ 線でクリアに観測できている例を図 3. 3. 1-12 a) に示す。TESPEL 無しの b) と比較すると違いが明瞭である。このトレーサーと元来混在する不純物である Fe や Cr の振舞いが、密度によって際立った違いを見せることを確認した。図 3. 3. 1-13a) に示すように、電子密度が $3.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ではトレーサー不純物の $K\alpha$ 線は 500ms から 1 s 程度で減衰するのに対して、Fe や Cr は加熱の十分ある 4.5 秒までほとんど減衰せず、プラズマ周辺部からの Fe や Cr の継続するインフラックスを示しているのに対して、b) に示すように $6.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ではトレーサー不純物はほとんど減衰せず、一方で Fe や Cr は始めから $K\alpha$ 線強度が非常に小さい。密度が高い場合にはプラズマ周辺部からの Fe や Cr の混入が抑えられ、トレーサー不純物は非常に長く閉じ込められることを明確に示した。

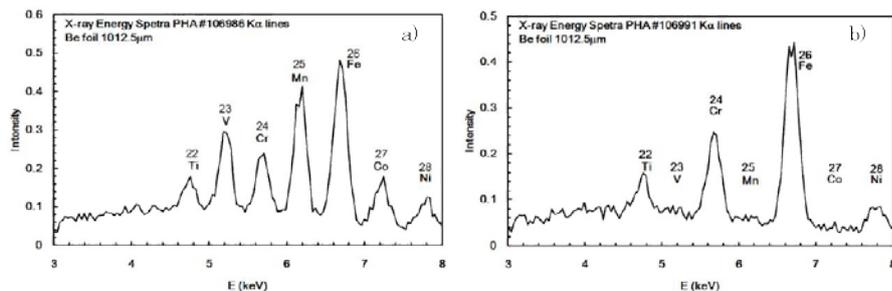


図 3. 3. 1-12 a) 3 種混合トレーサー入射時及び b) TESPEL 無しの時の X 線 PHA 信号

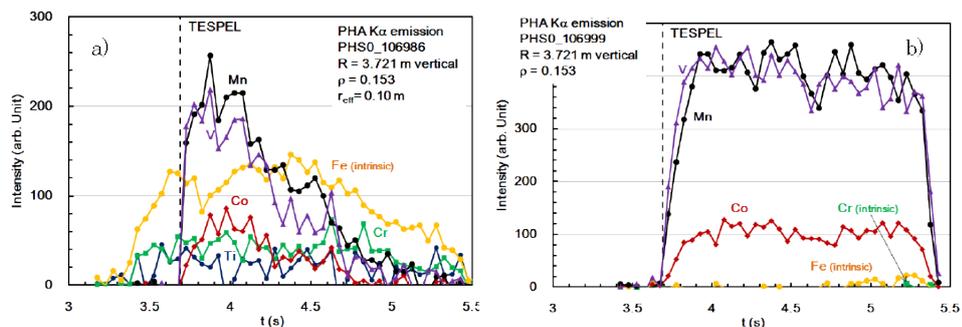


図 3. 3. 1-13 a) 電子密度 $3.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ での PHA-K α 線の時間変化、a) $6.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ での PHA-K α 線の時間変化。

新しい計測器と今後の展望

研究テーマグループは、LHD における輸送の物理を更に深く探求するため、新しい計測器及び計測手法、例えば、図 3.3.1-14 に示すようにドップラー反射計、二次元 BES 計測を開発している。これらを用いて、乱流揺動を詳細に計測し、輸送の非局所性、非線形性や異なるスケール間の相互作用について更に理解を深めていく予定である。また、将来の重水素実験を見越して、輸送の質量依存性を調べるためヘリウム放電の実験を行っているが、この時の水素/ヘリウム比を精度良く評価する必要がある。第 15 サイクルにおいて CXS によるこの比の計測手法を新しく開発し、有効性を確認した。これらの新しい計測器を活用して、輸送と閉じ込めの質量依存性について更に研究を進める。

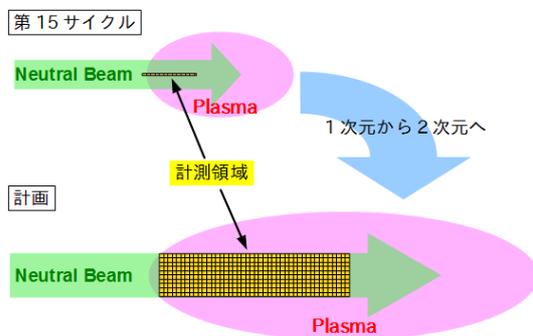
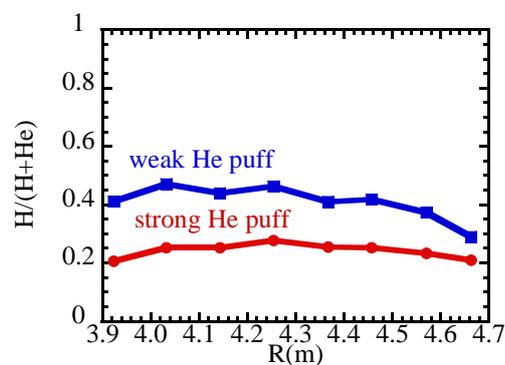
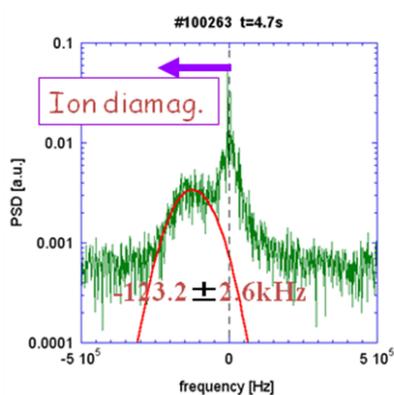


図 3.3.1-14 左上: ドップラー反射計によるポロイダル回転計測結果

左下: ビーム放射分光の計測領域の現状と今後の計画

右上: CXS による水素/ヘリウム比の分布計測結果

3. 3. 2 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用

はじめに

最初に、本テーマグループでの研究成果のハイライトを観点毎にまとめる。

まず、理論プロジェクト、炉工プロジェクトの連携として以下の成果があった。

- ・ 実験(試料設置)と ERO コードによる炭素の輸送計算により、真空容器内壁に堆積する炭素の起源が確かめられ、理論プロジェクトとの連携により、不純物堆積の理解が深まった。
- ・ EMC/EIRENE コードにより、外部摂動磁場によって低温領域を拡大し、放射損失を増大できることが予測され、実験によって実証された。EMC/EIRENE コードは閉ダイバータ設計のために計算領域をダイバータレグ領域までの拡張が図られている。その拡張は放射損失増大実験においても、周辺プラズマ挙動の理解に有用である。
- ・ ヘリカル炉での実用的な手法とするため、放射損失増大実験は炉工プロジェクトとの連携の下で行われ、実験条件の議論を行っている。ヘリカル炉で有用な運転方式と期待される超高密度コア(SDC)プラズマにおいて、放射損失の増大を図り、20%の熱負荷の軽減に成功した。

なお、上記放射損失増大実験は、プラズマコンファレンス 2011 において、テーマグループリーダーである名古屋大学大野哲靖教授による招待講演として採択され、共同研究ベースで挙げられた研究成果として報告された。

また、本テーマグループでは各実験サイクルにおいて、PWI に関して 10 以上の共同研究を行っている。例えば、第 15 サイクルにおいては、以下があげられる。

- ・ マテリアルプローブによる LHD プラズマ壁相互作用及び共堆積炭素膜特性の評価(北海道大学)；不純物堆積の構造と水素吸蔵
- ・ ダイバータ熱・粒子負荷分布への有限 β 効果(Max Planck Institute)；熱粒子負荷分布計測による平衡計算の評価
- ・ 水素リサイクリング解明のための水素同位体-材料相互作用ダイナミクス(静岡大学)；複合照射下での水素同位体滞留評価
- ・ 堆積抑制用フィン構造のグロー/主放電での効果の検証(九州大学)；第一ミラーの反射率低下抑制の試み
- ・ 微小タングステンロッド試料へのプラズマ照射(九州大学)；放出・熔融タングステン挙動の評価
- ・ ナノ構造タングステン試料のプラズマへの照射実験(九州大学、名古屋大学)；熱負荷下でのナノ構造挙動の評価
- ・ アモルファス系炭素堆積層の構造に関する詳細解析と水素保持特性(北海道大学)エアロゲルを用いたダスト捕獲実験(JAXA)
- ・ 分光法による炭素ターゲットの実時間損耗測定(京都大学)；炭素損耗のモニター先進的タングステン被覆 SiC/SiC 複合材料および SiC 基複合材料の実機プラズマ

への適応評価(室蘭工大)

- ・ 閉ダイバータ化に伴う LHD 周辺・ダイバータプラズマ中のイオン挙動への影響(長野高専) ; イオン・電子温度・流れの同時計測
- ・ 閉ダイバータ化に伴うプラズマ対向壁の特性変化(九州大学) ; 閉ダイバータ部の堆積物物理・化学特性と水素リサイクリングへの影響
- ・ ダイバータ熱負荷の実時間計測法の開発(大阪府大) ; 熱電対による熱流速評価法の確立
- ・ LHD ボロン膜に対するトリチウム滞留挙動と炭素・酸素不純物との相乗効果に関する研究(静岡大学)
- ・ LHD 非接触プラズマ中でのプラズマブロップ輸送現象(名古屋大学)

が実施された。

PWI 研究は様々な分析手法・分析機器が不可欠であるが、それらは一つの研究室・大学でカバーすることは難しい。LHD では共同研究とすることで、幅広い PWI 研究を実施することができていると共に、それぞれの手法・分析機器を所有している共同研究者に、高温・高密度プラズマの実験プラットフォームを提供できている。

海外との協力では、2010 年より、IPP グライフスバルトとの共同研究を実施している。受熱板上の熱粒子負荷分布を計測するカメラシステムを LHD に設置し、分布の β 値依存性より、平衡計算の妥当性を検証するという野心的な試みである。IPP のグループは、材料中の 2 次元熱輸送コード THEODOR や、数百枚の特殊な反射鏡を用いた絶対位置較正のスキルを LHD グループに提供すると共に、将来的に平衡の検証結果が得られる。本結果は、Peter Drewelow 氏の博士論文としてまとめられる予定である。

学生教育としては、3 名の博士課程の学生、及び各大学から共同研究として多くの学生が実験に参加している。成果としては、例えば Plasma Conference 2011 では 6 件、第 21 回国際土岐会議では 6 件の発表が行われた。

さらに、核融合以外の学際的展開としてプラズマ放電中に移動するダスト捕獲のため、KEK 及び JAXA/千葉大から提供された SiO_2 エアロゲルを用いた実験を行った。エアロゲルの特性評価、事後解析手法に関する情報の相互交換により、双方の分野における進展が得られている。

以下にトピックスを上げて、研究成果を述べる。

1) 不純物パフによる放射損失の増大

ダイバータへの熱負荷を軽減するため、非接触ダイバータ状態を得るには、最外殻磁気面外側の周辺電子温度を低下させることが必要である。周辺部での放射損失はそのために重要となる。現在稼働中の中・大型装置では、プラズマ対向材料である炭素が、主として放射を担ってきた。しかし炭素材は、トリチウムリテンション及び損耗の観点から、将来の核融合炉において同様に使用することは難しいと考えられる。そこでトカマク型装置では、ネオンなどの不純物ガスを導入することにより周辺部の放射損失を得る実験が行われている。LHD においても 2010 年の第 14 サイクル実験から、

ヘリカル型装置としては初めての本格的な不純物パフを用いた放射損失増大実験を開始している。

図 3.3.2-1 にネオンパフを導入した典型的な放電波形を示す。この放電では、ネオンは時刻4秒から 120ms の間パフされている。放射損失はネオンパフ開始から増加し始め、ネオンパフ終了後に最大となり、約2MW から約4MW に、2倍程度の増加を得ている。また、放射損失はゆっくりと減少し、NBI の入射パワー低下による放電終了直前まで高い放射損失状態が維持されている。これはネオンのリサイクリングによると考えられる。この放電ではプラズマ加熱電力は約 13MW であり、放射損失はその約 23%程度である。ネオンパフに伴うプラズマ蓄積エネルギーの低下と線平均密度の増加は小さく、閉じ込め性能が大きく劣化していることはない。ダイバータ部の電子密度・温度はともに低下しており、熱・粒子束が減少していることが分かる。

図 3.3.2-2 に、図 3.3.2-1 と同じ放電における電子密度・温度分布を示す。それぞれ、ネオンパフ直前の値で規格化している。高い放射損失状態では、電子温度は低下し、電子密度は増加しているが、それぞれ、影響は周辺部に限られていて、中心部には影響が及んでおらず、閉じ込め性能とダイバータ負荷軽減の同時達成が得られたと考えられる。

ダイバータの粒子束の低下は、主として分布のピーク部でのみ顕著であり、いわゆる部分デタッチメント状態に近い分布であることが観測されている。また、適切なネオンパフの制御により、長パルス放電時にも高放射損失状態を維持することができている。これらの結果により、周辺磁場構造がトカマクと異なるヘリカル装置においても、不純物パフが熱負荷軽減に有効であることを初めて示し、また本運転は将来の定常ヘリカル炉において実用的な手法であることが確認できた。

さらに 2011 年の第 15 サイクル実験からは不純物として窒素、アルゴンを導入する実験も

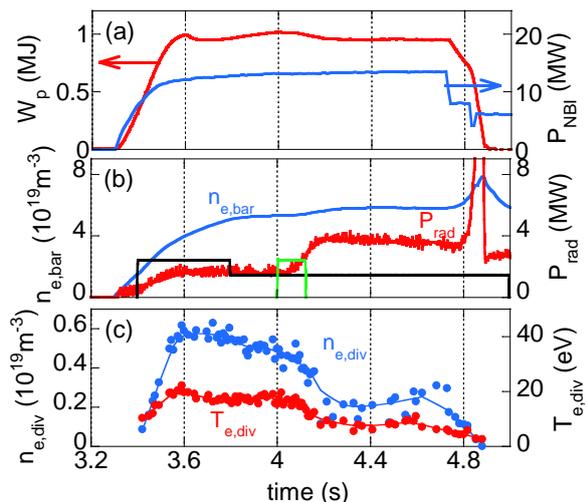


図 3.3.2-1 典型的なネオンパフ導入放電波形。(a) プラズマ蓄積エネルギー (赤) と NBI パワー (青)。(b) 線平均電子密度 (青) と全放射損失 (赤) 及びガスパフ波形 (黒は水素、緑はネオン)。(c) ダイバータ部の電子密度 (青) 及び電子温度 (赤)。

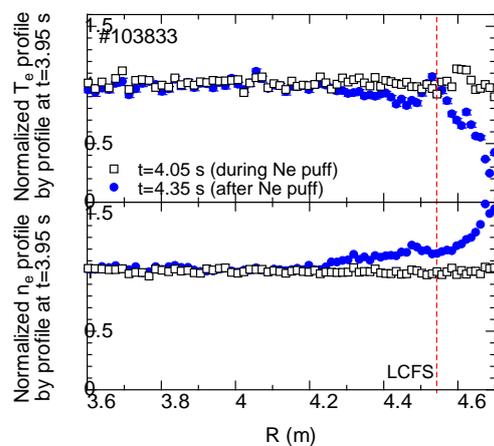


図 3.3.2-2 ネオンパフ直前の値で規格化した電子温度 (上) と電子密度 (下) の径方向分布。赤破線は最外殻磁気面の位置を示す。

開始しており、更なる高性能化に向けて不純物パフの最適条件の探査を進めている。また、主に周辺でのパワーバランスを考慮した理論的考察も進めており、周辺磁場構造の違いに着目してそれを体系化することで、放射損失増大・制御の環状プラズマでの理解に大きく寄与すると考えられる。

2) 共鳴摂動磁場による周辺部放射損失の制御

$m/n=1/1$ の共鳴摂動磁場を印加することにより、周辺部のストキャスティック層に残留磁気島を形成することができる。このような磁場構造の変化はプラズマのエネルギー輸送に大きな影響を与えると考えられる。図 3.3.2-3(a) は摂動磁場有り無しの場合の電子温度分布の計測結果を示す。残留磁気島が周辺部に形成されるため、温度の平坦化が起こっている。図 3.3.2-3(b) にはトムソン散乱計測から得られたこれらの温度、密度分布から、炭素密度=0.01×電子密度とコロナ平衡を仮定した場合の放射損失分布である。この図 3.3.2-3 から、摂動磁場が印加されると磁気島付近で放射損失が大きく増加すると考えられる。これを利用して、ダイバータの熱負荷軽減を目的に、周辺領域での放射損失を増大・制御することは、世界的にも類を見ない試みである。

図 3.3.2-4 は摂動磁場有り無しの場合の、放射損失のボロメータ計測結果を線平均密度の関数としてプロットしたものである。同じ密度に対して、摂動磁場印加により、放射損失は約 2 倍に増加させることができる。またこの時、特定のダイバータ板に設置されたラングミュアプローブから計測したプラズマ粒子束が大きく減少していることが観測された。

一方、各種計測から、ダイバータ板への熱負荷分布はトロイダル方向に一様でないことがわかってきた。例えば、摂動磁場コイル電流位相を変え、磁気島の 0 ポイント位置を 6-0 ポートとした場合、10.5U 付近ダイバータ板上で観測したイオン飽和電流

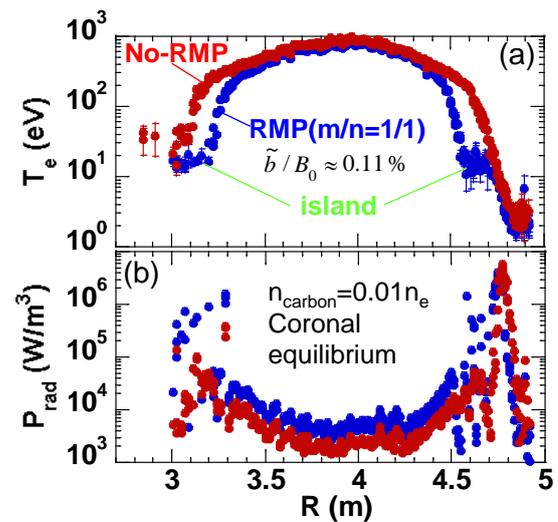


図 3.3.2-3 (a) 共鳴摂動磁場有り (青) 無し (赤) での電子温度分布。(b) 炭素密度=0.01x 電子密度、コロナ平衡を仮定した場合の放射損失分布。

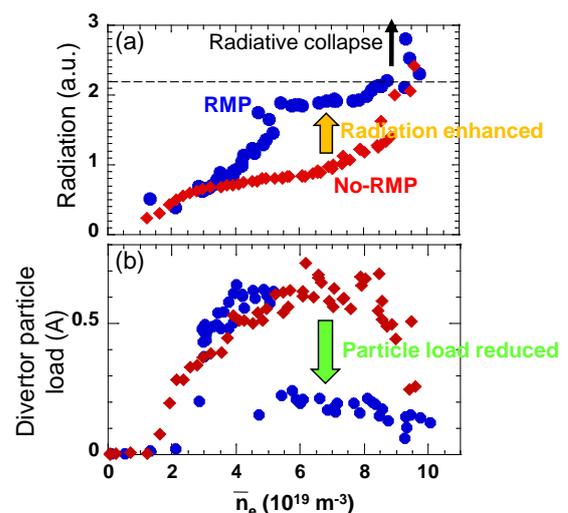


図 3.3.2-4 (a) 共鳴摂動磁場有り (青) 無し (赤) での放射損失の線平均密度依存性。(b) ダイバータ粒子負荷の線平均密度依存性。

は急激に減少するのに対し、3-0 ポート位置に設置したダイバータ干渉計による電子密度は、デタッチ後も緩やかに上昇する。残留磁気島の0 ポイント位置を1-0 ポート及び6-0 ポート位置に持ってきた場合、図 3. 3. 2-5 に示すようにダイバータ干渉計で計測したダイバータ密度は、前者はデタッチメント遷移後も緩やかに増大し続けるのに対し、後者では急峻に減少している。これらは共鳴摂動磁場を用いたデタッチメントプラズマに3次元異方性があることを示唆している。デタッチメント中に観測され

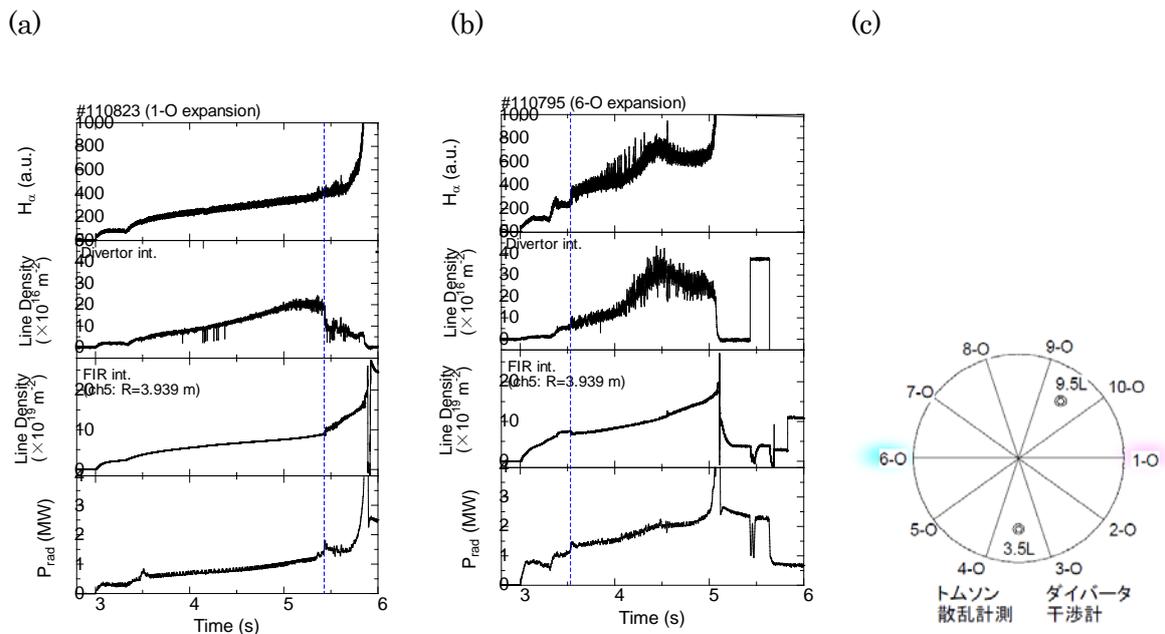


図 3. 3. 2-5 $R_{\text{ax}}=3.90 \text{ m}$ で LID 磁場 (3300 A) を印加した場合のデタッチメント放電波形。
(a) : 1-0 拡大、(b) : 6-0 拡大、(c) : トロイダル方向の配置

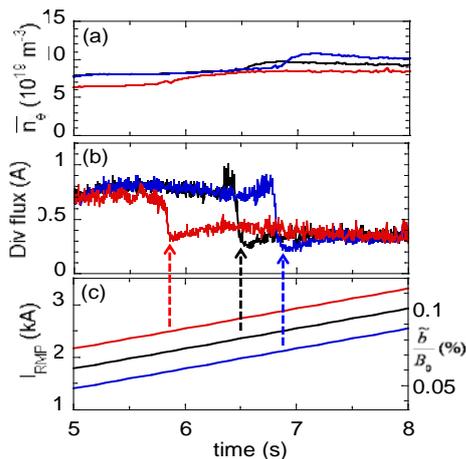


図 3. 3. 2-6 摂動磁場コイル電流を放電中に掃引した場合のプラズマパラメータの時間変化。(a) 線平均密度、(b)ダイバータ粒子束、(c)摂動磁場コイル電流。

るバースト現象にも違いがあり、ダイバータ干渉計が観測する 3-0 ポート位置では、後者の方が激しいバーストが観測される。これも 3次元異方性を持つ可能性がある。

さらに、摂動磁場強度を放電中に変化させることにより、放射損失が増大しダイバータ粒子束が減少したモードに自由に遷移させられることが実証された。図 3. 3. 2-6 はその時のプラズマパラメータの時間変化を示す。時刻 6 ~ 7 秒付近で加熱入力、密度はほぼ一定であるが、摂動磁場コイル電流が増加し、2 kA 程度に達するとダイバータ粒子束が大きく減少する。コイル電流の立ち上げ開始時刻を前

後させると、プラズマの遷移時刻もそれにつれて前後させられることを示し、将来の核融合炉で必須とされる放射損失の制御ノブとしての制御性の高さを実証した。

今後、摂動磁場が印加された時のダイバータ熱負荷分布について明らかにすると同時に、摂動のモード数やトロイダル方向の位相を時間的に変化させるなどして、ダイバータプラズマの放射損失の新しい制御手法を確立することが大いに期待される。

3) 周辺部の不純物輸送

これまで、炭素からの発光強度の密度依存性と3次元輸送シミュレーションの比較から、高密度領域でストキャスティック層において不純物の遮蔽効果があることが示唆されていた。さらに不純物からの発光分布を計測し、シミュレーションと比較することにより、その詳細が明らかになった。

図 3.3.2-7(a)にはシミュレーションで得られた低密度 ($n_{LCFS}=2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) と高密度 ($n_{LCFS}=5.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) における炭素 C^{3+} のポロイダル断面の2次元分布を示す。低密度ではポロイダル方向にほぼ一様に分布しているが、遮蔽効果が現れる高密度では小半径外側に移動し、結果として赤道面付近のダイバータレグ周辺に集まる。実験では C^{3+} からの発光 (CIV, 154.8nm) の水平方向の視線積分を計測している。図 3.3.2-7(c)がその垂直方向分布であり、(b)のシミュレーションの結果とともに示されている。高密度で赤道付近に C^{3+} が集中するためにピークが現れるが、実験でもその様子が明瞭に観測されており、高密度領域における炭素不純物の遮蔽効果が確認された。

本結果は、周辺に元々ストキャスティック層を持つヘリカル装置での不純物輸送を明らかにしただけでなく、現在世界中のトカマクで試みられて、ITERでも検討されているELM制御のための外部摂動磁場によるストキャスティック層での不純物輸送に知見を与えるものである。また、不純物を用いた放射損失増大実験にとっても重要な基礎研究である。

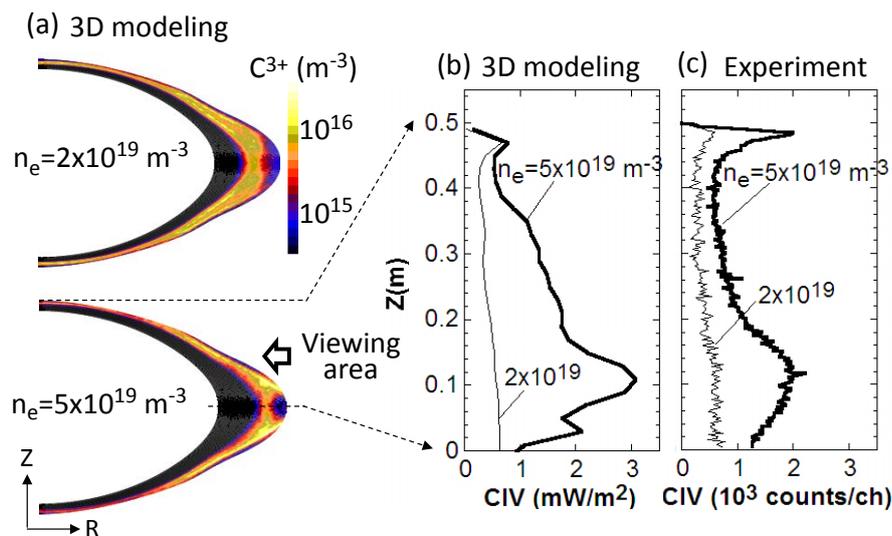


図 3.3.2-7 (a)シミュレーションによる C^{3+} のポロイダル断面分布。
 (b)シミュレーションによって得られた C^{3+} からの発光 (CIV, 154.8 nm) の水平方向視線積分の垂直方向分布、(c)同じく実験結果。

4) 赤外線カメラを用いたダイバータ板上熱流束分布計測

ドイツ・マックスプランク研究所との共同研究により 2010 年より実施した。

ダイバータ板上の熱流束・粒子束分布は、ダイバータ板に接続する磁力線構造に強く依存することがわかっている。 β 値が 1 % 以下の低い場合には、これらは真空条件の磁力線構造を反映した分布となる。しかし β 値が大きくなると磁力線構造は真空条件から変化し、ダイバータ板上の熱流束・粒子束分布もそれに応じて変化する。 β 値に対してこれらの分布がどのように変化するかを観測することは、これまで詳しく行われたことがなかった。平衡計算で得られた有限 β 条件下の磁力線構造と観測された熱流束・粒子束分布を比べることにより、逆に平衡計算の計算条件の妥当性を検証することも可能になると考えられ、独創的な試みである。

本研究では、赤外線カメラにより放電中のダイバータ板の温度変化を計測し、材料中の 2 次元熱輸送コード THEODOR を用いて熱流束分布の再現を試みた。

本研究では、熱流束分布と磁力線構造の空間関係を正確に比較するため、実験に先立ち、観測対象のダイバータ板列位置の測定を行った。LHD のダイバータ板位置は、種々の理由から必ずしも設計図面とは一致していないためである。LHD の大気開放作業期間に、真空容器やダイバータ板に特殊な反射板を取り付け、それらを多くの角度で写真撮影して再構成して反射板同士の相対位置を求めた。絶対位置のわかっている反射板を基準とすることで各反射板の絶対位置が分かる。

実験では、トーラス外側の (10-0) ポートに赤外線カメラを設置し、トーラス内側 (10-I) 部のダイバータ板列の温度変化を観測した。図 3.3.2-8 はカメラの設置位置と、ダイバータ板列の観測画像例であるが、ダイバータ板が 7 枚程度観測できていることがわかる。放電条件は、線平均電子密度をほぼ一定 ($4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) にして、加熱電力の変化及び磁場強度の変化により、 β 値を変化させてデータを取得した。図 3.3.2-9 は、磁気軸 3.75m 配位における観測データから THEODOR コードを用いて、図 3.3.2-8 右中の黄破線に沿った熱流束分布を再現したものである。赤外線カメラの受光強度と温度の較正がなされていないため、得られた熱流束分布定性的であるが、 β 値の変化により分布が変化していることが分かる。今後は、赤外線カメラ較正を行って熱流束

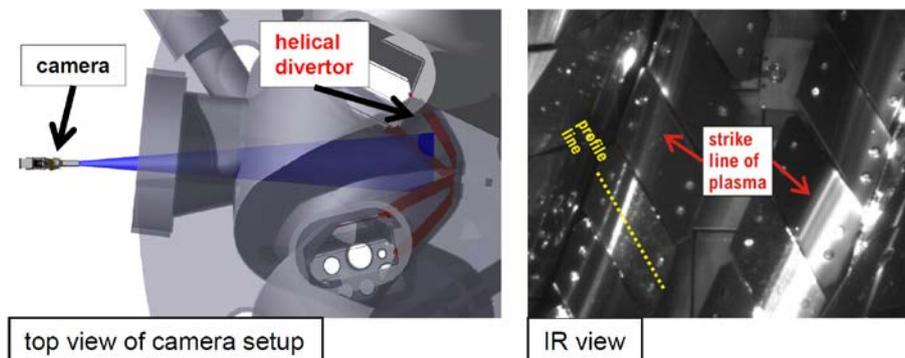


図 3.3.2-8 (左) 赤外線カメラ位置。(右) 赤外線カメラによる観測画像例。

値を補正し、3次元平衡計算コードHINT2及び磁力線追跡計算により、有限 β 条件でのダイバータ磁力線構造を得て観測された熱流束分布と比較することにより、本研究の目的を達成する。

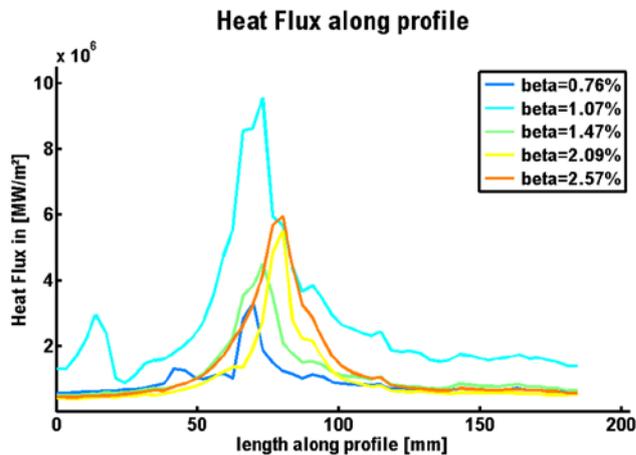


図 3.3.2-9 磁気軸 3.75m 配位におけるダイバータ熱流束分布の、 β 値による変化。ただし縦軸の値は仮の値である。

ン研究とともに相補的に進めていくにあたり、磁場構造特性の大きく異なる装置間で輸送特性を比較することは極めて効果的であると考えられる。しかし3次元的で複雑な磁場構造を持つヘリカル装置では、定量的な評価例は非常に少なかった。

本研究はヘリカル装置における局所のプラズマブロップ輸送速度を初めて定量的に明らかにすることを目的として、2芯の電極を備えたプローブヘッド（図 3.3.2-10(a)参照）を用いて LHD 周辺領域中のイオン飽和電流(I_{sat})揺動信号を計測した。プローブヘッドは高速掃引機構を備えており、装置上方から 1~2m/s の速さで挿入され、図 3.3.2-11 に示すようにプライベート領域、ダイバータレッグを横切りエルゴディック層までを一度の放電で計測することが可能である。図 3.3.2-10(b)には、真空磁場計算コード KMAG により求められた磁力線の接続長(L_c)分布及び各電極の掃

5) LHD 周辺領域における非拡散的プラズマ輸送の研究

トカマク装置のスクレイプ・オフ層中において、磁場を横切る非拡散的なプラズマ輸送現象（“プラズマブロップ輸送”）が観測されている。近年ヘリカル装置や直線型装置でもよく似た現象が確認されたことから、磁場閉じ込め方式に依らない普遍的な現象であると認識され始めている。同現象の理解を、理論・シミュレーシ

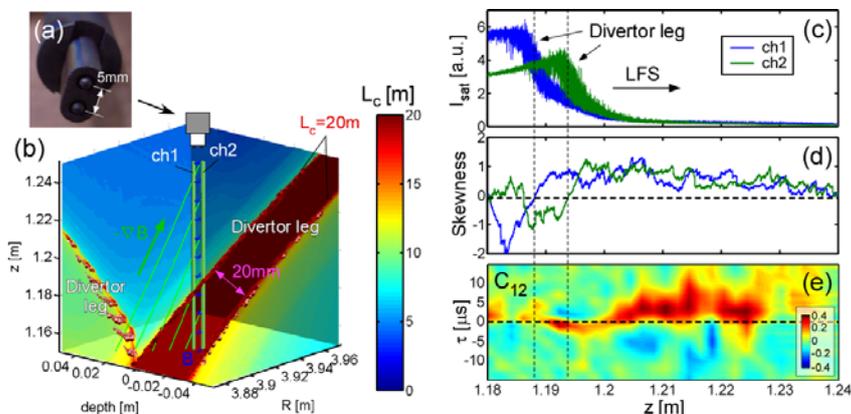


図 3.3.2-10 (a)プローブヘッド写真、(b)接続長分布および掃引軌道、(c)イオン飽和電流、(d)Skewness、(e)相互相関係数の z 方向分布

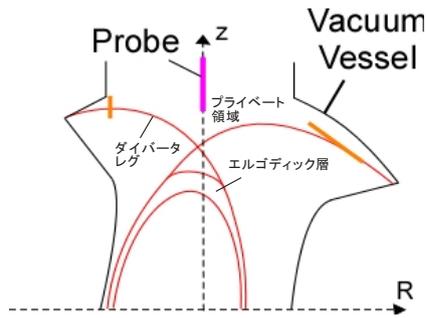


図 3.3.2-11 高速掃引プローブとプラズマの位置関係

引軌道を示す。接続長の長い領域はダイバータレック位置におおよそ対応し、図 3.3.2-10(c)に示す I_{sat} の高さ z 方向分布では、同じ位置で大きな I_{sat} が得られている。

プラズマブロップは I_{sat} 信号中に正にスパイク的な成分として現れるため、揺動の3次の中心モーメントを規格化した指標である Skewness を計算することで、プラズマブロップの有無を調べることがよく行われる。図 3.3.2-10(d)には Skewness の z 方向分布を示す。 $z > 1.2\text{m}$ のプライ

ベート領域中では、両電極で Skewness がともに正となり、すなわち正にスパイク的な信号が現れていることを示している。スパイク信号の時間遅れを評価するため、図 3.3.2-10(e)では 10kHz 以上の揺動成分から求めた両電極の信号間の相互相関係数を示す。輸送が両電極で捉えられていると考えられる Skewness 正の領域では、時間遅れ $\tau \sim 4\mu\text{s}$ にピークする正の相関が確認された。

プラズマブロップは理論的に、弱磁場方向に輸送されることが予想されている。これより、揺動解析により得られたスパイク信号の時間遅れと、磁場構造に対する電極位置の対応から、理論に基づくプラズマブロップ輸送速度を定量的に評価することに成功した ($v_b \sim 1.15\text{km/s}$)。この速度はトカマク装置で報告される値と比較的近い。

今後の見通しとしては、多芯電極を備えたプローブヘッドを使用することで、輸送の駆動力が他の閉じ込め装置と同一であることを確認するとともに、同現象が LHD において担う輸送粒子束の割合を評価する予定である。このようにヘリカル型磁場配位における輸送特性を詳細に明らかにすることで、磁場閉じ込め装置一般におけるプラズマブロップ輸送の総合的理解への寄与を図る。

6) ユニポーラアーキングによるタングステンナノ構造 (W-fuzz) の剥離

ITER 及びそれ以降のデモ炉においては、トリチウム保留の観点から、従来のカーボンダイバータの代わりにタングステンを使用することが提案されている。近年、実験室における基礎研究から、タングステンに He を照射した際に極めて複雑なナノ繊維状微細構造を持つ表面損傷組織 (W-fuzz) が確認されている。照射条件はいずれも試料温度 1,000~2,000K、照射量 $\sim 10^{25}\text{He/m}^2$ 、入射イオンエネルギー 20eV 以上の条件で発現する。これらはダイバータが受ける照射環境に近いいため、実機でも形成される可能性がある。その場合、ナノ構造の損耗や溶融によって、将来の核融合炉においてトリチウム保留やプラズマへの混入が問題とされるダストの発生源となり得るため、損耗や溶融がどのように進行するのか十分に検討しておく必要がある。

本研究では、名古屋大学の線形ダイバータシミュレータ装置 (NAGDIS) を用いて上記のような照射条件において W-fuzz 試料を製作し、LHD ダイバータプラズマへの曝露実験を行った。ダイバータ位置への挿入には、図 3.3.2-12 に示す試料駆動装置を用い

た。照射は放電時間 1.5~2.0s, プラズマ密度 $n_{e(\text{core})} \sim 3\text{-}4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の水素放電プラズマにて実施した。

2010 年度の実験では, W-fuzz 試料表面とダイバータプラズマの磁力線角度がほぼ垂直となる条件にて照射を行った結果, 図 3.3.2-13 に示すようなユニポーラアークトレイルが観測された。アークスポットの幅は約 $8 \mu\text{m}$, 深さは $1 \mu\text{m}$ であり, アークトレイル部の W-fuzz 組織は剥離を起こしている。W-fuzz 組織のユニポーラアーキングによる剥離が強磁場実機装置において確認されたのは本実験が初めてである。トレイルのフラクタル次元解析を行った結果, フラクタル次元 $D=1.922$ が得られた。フラクタル次元は, 1 に近いほど Linear motion に近く, 逆に 2 に近い場合は Brownian motion で動いていたことを意味する。アークスポット運動は磁力線の向きに影響され, その向きは $-j \times B$ に等しいことが過去の実験から示されている。

このような結果を踏まえ, 2011 年度の実験では, W-fuzz 試料へのダイバータプラズマの磁力線の入射角を, W-fuzz 面に対して 5° に設定し, 強磁場下におけるアークスポットの運動が, 磁力線角度に対してどのように異なるのかを検証した。実機装置の W ダイバータでは試料表面に対して入射磁力線角が浅く設定されることが多い。そのような場合にアークスポットの移動がどのように変化するかを確かめておくことは重要である。図 3.3.2-14 に, 照射後に得られたユニポーラアークトレイルの光学顕微鏡像を示す。アークスポットの進行方向はほぼ $-j \times B$ に等しく, 2010 年度の実験とは逆に Linear motion に近い動きであったことがわかる。W-fuzz 面と磁力線の角度が浅いために, ストライクポイントを正確に W-fuzz 試料の中心に位置させることが困難であった。そのため, 本実験では, ストライクポイントが W-fuzz 密度の比較的低い場所に位置したが, 明瞭なアーク痕が確認された。W-fuzz 密度が低い場所であっても, He プラズマ照射の影響は残っているため, アーキングを誘発したことが示唆される。

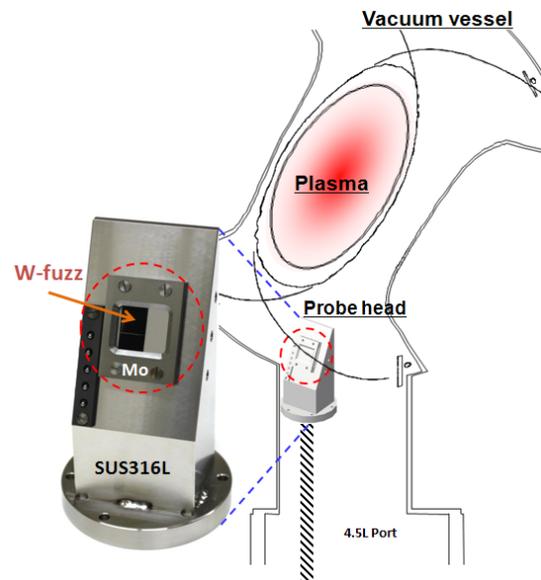


図 3.3.2-12 2010 年度の LHD ダイバータプラズマ照射実験における W-fuzz 試料の照射位置模式図[1].

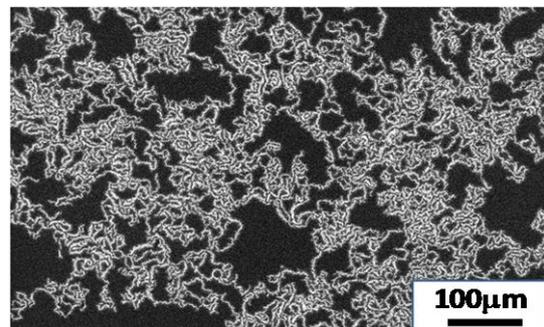


図 3.3.2-13 2010 年度の LHD ダイバータプラズマ照射実験で確認された W-fuzz 試料上のユニポーラアークトレイル. 走査型電子顕微鏡 (SEM) 像[1].

以上の結果より、He 照射を受けた W 試料表面ではユニポーラアークが起こる確率が高く、不純物発生源となり得ることが分かった。また、アークスポットの動きは磁力線の角度に強い影響を受けることが明らかとなった。ITER を含めた将来の核融合炉では、タングステンダイバータが採用される可能性が高く、He の影響によってこのようなユニポーラアークが発生することが考えられる。ユニポーラアークは、W 表面の損耗を促進するため、材料の寿命への影響も懸念される。

7) Mixed-Material 形成に伴う LHD での水素リテンション特性変化

LHD では平成 22 年度より部分的ではあるが閉ダイバータ化が始まった。閉ダイバータ化によりプラズマ中の中性粒子や不純物イオンなどの挙動が大きく変わることが予想されるが、それに伴う PWI の変化を明らかにすることは放電の定常化などプラズマの高性能化に直結する重要な研究課題である。対向材料表面は、常に損耗・堆積・He 照射によるダメージを受け続け、それらの複合環境下では複雑な微細構造を伴う堆積層が形成され、それを“Mixed-Material”と呼ぶ。Mixed-Material が形成された場合、材料表面の物理特性は初期とは全く異なった状態となる。壁の水素吸蔵・放出は、粒子バランスや特に定常プラズマでの密度制御をする上で非常に重要であるが、プラズマ粒子の保持・放出挙動を材料内部の微細欠陥と関連付けて根本的に理解しようとする研究は、世界的にも類を見ない。ここでは第 12・13 サイクルにおいてトラス内側第一壁に設置した、プラズマ曝露試料及びグロー放電曝露試料についての研究結果を報告する。

プラズマ曝露試料(W)に2keV の重水素イオン(D₂⁺)を 1x10²¹D₂⁺/m² 照射し、重水素の昇温脱離挙動を調べた。図 3.3.2-16 は図 3.3.2-15 に示した表面に Mixed-Material 層が形成された試料と同じ位置に置いた試料からの重水素

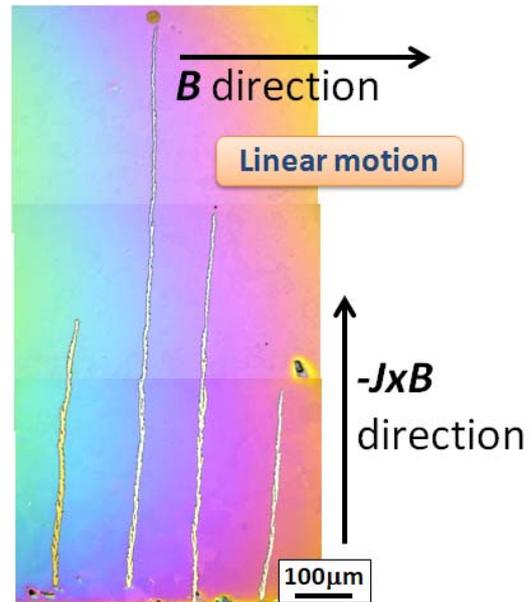


図 3.3.2-14. 2011 年度の LHD ダイバータプラズマ照射実験で確認された W-fuzz 試料上のユニポーラアークトレイル. 光学顕微鏡像。

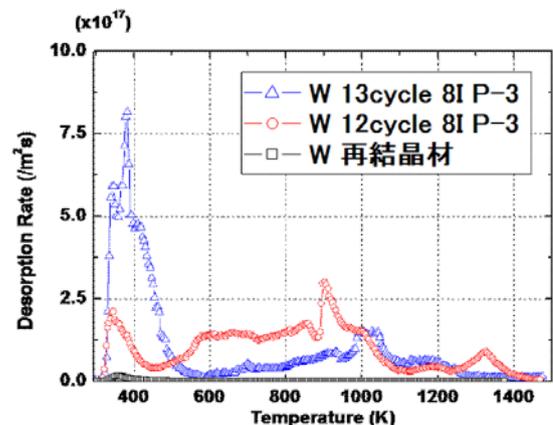


図 3.3.2-16 注入重水素の熱放出. C-12(△)、C-13(○)

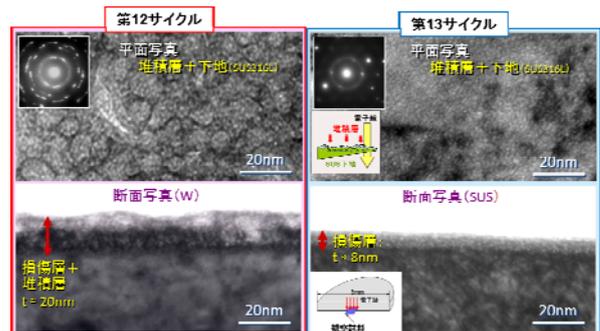


図 3.3.2-15. C-12(左)と C-13(右)の表面変質

昇温脱離スペクトルを比較したものである。何れも表面構造の複雑さを反映してスペクトルも複雑であるが、大きな特徴としては炭素濃度の高い C-12 では注入された重水素の大半は 600K 以上の高温で放出され、その多くは結合力の強い炭素に捕捉されていたと考えられる。これに対して、金属及び金属酸化物の増えてきた C-13 では逆に金属堆積層で特徴的に見られる 600K 以下での放出が大半となる。何れの試料においても $1 \times 10^{21} \text{D}_2^+ / \text{m}^2$ 注入した重水素の 10%程度が捕捉されており LHD のプラズマ対向面では水素捕捉サイトの密度が非常に高いことを示している。なお、壁温度が室温に近い LHD にとって 400K までの水素放出量が多い C-13 の状態は粒子コントロールを難しくさせる可能性がある。C-13 から Ne 及び He を用いたグロー放電洗浄が大幅に減らされた。このことにより不純物の堆積や損傷が減り表面の特性も変わってきたものと考えられる。

長期据え置き試料はその実験サイクルでの最終状態を示すもので、途中どのような経緯を辿ったかを知ることは難しい。そこで実験サイクルの開始時に主放電実験に先立って行われる長時間のグロー放電洗浄に試料を曝し壁の初期状態を調べた。立ち上げ時のグロー放電洗浄 (Ne-GDC 12 時間→H-GDC 122 時間→He-GDC 24 時間) に壁位置で曝した試料の表面は炭素、酸素、鉄、下地元素を成分とする厚さ 5nm 程度の堆積層で覆われ、下地も含め高密度の He バブルの発生が見られた。表面変質層は多少薄いものの構造や組成は図 3.3.2-15 に示した長期据え置き試料と良く似ており、LHD におけるプラズマ対向面の特性はグロー放電洗浄によってほぼ決まってしまうことが明らかとなった。実験期間中短時間ながら繰り返して行われるグロー放電洗浄も含め様々な条件でのプラズマ放電実験が行われるが、プラズマ対向面は、多少の変動はあるものの、図 3.3.2-15 に見られるような組織を保ち、この変質層の特性が水素の吸・放出挙動などを決めているものと考えられる。

第 14 サイクルでは、閉ダイバータ化された 9I および 8I ポート近傍の第一壁上 4 箇所に長期試料を設置することによって、第 14 サイクルのプラズマ放電に曝されたプラズマ対向面がどのように変化するかを調べた。また、各サイクルでプラズマ実験に先立ち実施される一連のグロー放電洗浄が壁表面に与える影響を明らかにするために可動式試料搬送装置を用いたプラズマ曝露実験を行った。

本研究は、これまで注目されていなかった Mixed-Material の水素吸蔵・放出特性を明らかにし、室温近傍での水素の保持・放出が密度制御へどのような影響を及ぼすのか問題提起した。また、堆積層の形成が、初期のグロー放電での壁コンディショニング時に決まることはこれまで知られておらず、LHD だけでなく、ITER を含めた他の装置においても重要な知見となる。

8) LHD におけるダスト研究

核融合分野でのダスト研究は、ITER等におけるトリチウム蓄積を評価すると共に除去手段を確立するため、現在、大型装置でも積極的に進められている。その結果、異なる容器形状・対向材や実験履歴の条件下で実験後に採取されたダストの粒子径分布、位置分布及びそれらの組成、形状に関する解析結果が得られている。従って、その生

成や様相に関する物理課程の理解には、事後解析と共に実時間情報をいかに得るかが大変重要である。

一般的にはプラズマ放電時のダスト捕集法としてSi基板などの試料を真空容器内に設置し、その試料表面に付着・堆積したダストを分析することが多いが、ダストが堆積したSi基板を真空から大気中へ取り出し時の圧力変化により、ダストが動くことが実験的に明らかとなっており、付着・堆積時の履歴が保持できないことが問題となっていた。そこで本実験ではダスト粒子を捕捉するターゲットとして新たにシリカ(SiO₂)・エアロゲルを使用し、ダスト捕集測定としての信頼性について分析・評価を進めている。同様のエアロゲルは宇宙分野において宇宙塵の非破壊捕集材として利用されており、今回の実験ではJAXA/千葉大から提供された0.061g/ccを用いた。核融合プラズマ中で発生したダスト捕集の観点からは、高速でエアロゲルへ衝突した場合には、Si基板に対する付着とは異なりダスト粒子はエアロゲル中へ捕捉されるため、プラズマ真空容器から大気圧中へ取り出す際の圧力変化による影響が格段に軽減されると考えている。このことは、事後解析であるがエアロゲルへの捕捉時の情報が保持されるという大きな利点を持つ。

エアロゲルによるダスト捕捉実験の一環としてLHDの水素放電中に第一壁の表面位置に図3.3.2-17に示すようなエアロゲルを設置し、約300秒間曝露する実験を行った。その後、デジタルマイクロスコープ(キーエンス社、VHX-1000)でエアロゲル表面を分析した結果を図3.3.2-18(倍率:2000x)に示す。表面から金属光沢と思われる様相の大きさ10x20ミクロン程度のダストが、周辺のエアロゲル中に侵入している様子が観測された。エアロゲルの表面とダスト表面の焦点深度がほぼ等しいことから、本視野角からはダストとエアロゲルの表面位置はほぼ等しいと考えられ、ダストはエアロゲルにめり込むような形で捕捉されていることがこの図3.3.2-18から確認される。

エアロゲルを水素放電に曝露した際に同じ試料ホルダ上に設置したSi試料に対して行った分析結果と比較すると、エアロゲル上で検出されたダスト個数密度は少なくともSi上の2倍以上であった。エアロゲルは真空中から試料を取り出す際の圧力変化による影響が少ないと考えられるが、本実験もそれを支持する結果であった。今後、このダストの組成を調べるために走査型電子顕微鏡(SEM)併設のエネルギー分散型X線分光器による分析も合わせて行う予定である。



図3.3.2-17 未使用のエアロゲル表面状態



図3.3.2-18 水素放電に曝露したエアロゲルの表面状態

9) 炭素堆積層の構造解析と水素リテンション

核融合炉内で損耗した炭素が非プラズマ曝露面で共堆積した場合アモルファス構造となり、ITER ではこのような堆積層へのトリチウム蓄積が問題となっている。アモルファス構造を持つ炭素堆積層については工業用途として様々な分析が行われており、実験結果から物理パラメータ、例えば密度、水素保持量、構造について報告されている。つまり炭素の構造特性を正しく評価できれば水素蓄積特性についても推測が可能となる、本研究ではLHD で得られた堆積層に対してラマン分光およびX線光電子分光法（XPS）の二つの方法で構造評価を行った。この際、ラマン分光では、炭素に起因する2つのピーク、G及びDピークの位置、半値幅、強度の比較を行うため、解析手法として背景信号の除去、およびフィッティングによるピーク分離を行う必要がある。今回は背景信号に対してガウシアンピークによるフィッティングを使用した。ラマン分光法では、堆積層の膜厚（～1ミクロン）に対してほぼ全体を積算した値としてデータを取得しているという特徴を持つ。他方、XPSにおいては炭素の構造によって異なる導電性のsp²と絶縁性のsp³を分離して測定することが可能であり、これまでにダイヤモンド様構造ではsp³の比率が多く、グラファイト様構造ではsp²の比率が多いことが報告されている。また、イオン銃によるエッジングを併用すると深さ分布特定が可能であり、核融合装置における非一様の成長過程を示す堆積層において深さ情報は大変重要である。

図 3.3.2-19 に黒鉛ダイバータ近傍に設置した試料（S2）に堆積した炭素層をラマン分光により測定した結果を示す。X軸はD及びGピーク比、Y軸はGピークの半値幅を示す。これまでの報告から、Gピーク半値幅の広がりや3次元欠陥の増加を示しており、 I_d/I_g の増加は2次元欠陥の増加を示していることが分かっている。

図 3.3.2-19 で示す試料では、3次元欠陥が比較的増加している堆積層であることが分かる。

図 3.3.2-20 では、XPSによるS2堆積層の原子組成比に関する深さ分布を示す。炭素が約80%を占める堆積層で、他にボロン、鉄などの不純物を含む層であり、層の厚みが約500nm程度ある。深さ約30nmにおいてsp²:sp³を解析した結果を図 3.3.2-21 に示

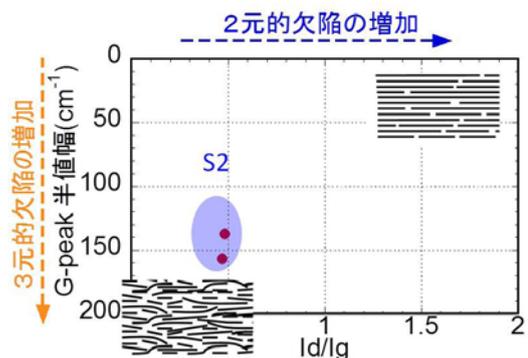


図 3.3.2-19 ラマン分光データの解析結果

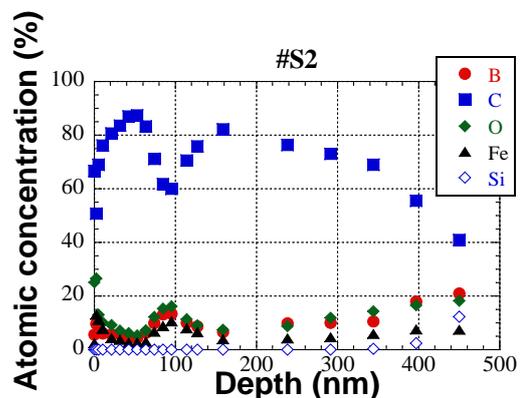


図 3.3.2-20 XPSによる原子組成比の深さ分布

す。

図 3.3.2-21 では $sp^2:sp^3$ は 95:5 で、グラファイト様構造が主であることを示唆している。深さ方向に比較するとより表面近傍では sp^3 の割合が増加し、最大で約 20%であった。しかしながらラマン分光によるデータが示す結果では sp^3 の比率はさらに高いため、現在ラマンと XPS で解析結果における違いがある。

この堆積層では図 3.3.2-20 に示すように炭素だけではなくボロン等が含まれており、このような不純物が炭素堆積層の構造を作る上で影響を及ぼしているか、実験室で成膜された堆積層との比較を予定している。

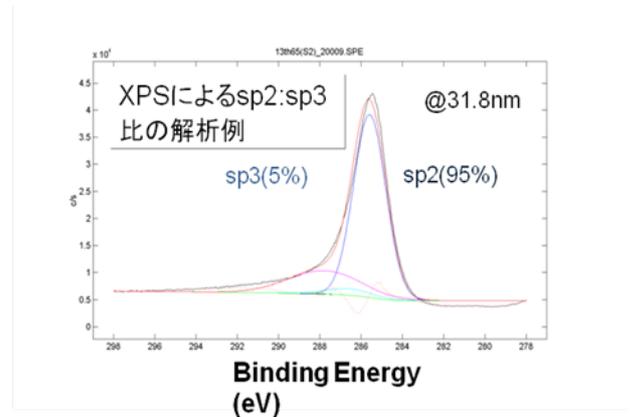


図 3.3.2-21 XPS による炭素の $sp^2:sp^3$ 比

3. 3. 3 MHD 平衡と安定性

はじめに

ステラレータ/ヘリオトロン配位における無電流プラズマの巨視的平衡および安定性特性について、大型ヘリカル装置における実験を通じて核融合炉に外挿可能となる物理的知見を得ることが本テーマグループの目的である。無電流プラズマにおける巨視的平衡においては、ベータ限界や閉じ込め劣化をもたらす磁気トポロジーの自発的変化が大きな研究対象であり、その物理現象の解明は磁場閉じ込めプラズマにおいて共通の課題である。磁気島の成長・緩和過程及びストキャスティック層における閉じ込め特性、ブートストラップ電流の発生機構及びその磁気島を含む閉じ込め磁場への影響等について広範な磁場配位において実験研究を進めている。安定性の観点からは、理想・抵抗性交換型モード、バルーニングモード等の圧力駆動型不安定性の発生、成長、緩和に関する物理的理解と閉じ込めへの影響、外部摂動磁場を用いた安定性への影響等について重点的に研究を進めている。また周辺局在化モード(ELM)の発現領域同定、及び外部摂動磁場やペレット等を用いた制御手法の確立を目指した実験を行っている。

第 14, 15 サイクル実験では、従来の平衡、安定性研究に加えて、以下の三点を重点課題と位置付けて実験を行った：

(1) ストキャスティック層の同定法確立と閉じ込め、安定性への影響

有限ベータ効果による周辺部磁場構造の変化は、閉じ込め領域を制限し到達ベータ値を制限することが予測されている。本グループは、閉じ込め磁気面とストキャスティック層との境界に対する同定法の確立を目指すものである。磁場構造と径電場構造との比較、及び熱パルスの伝播構造から最外殻磁気面の同定を試みる。

(2) 磁気島の物理機構解明

外部摂動磁場の印加に対する磁場遮蔽の閾値を実験的に評価する。磁場構造(磁気シア)に対する閾値の磁場配位依存性及びプラズマパラメータ依存性(プラズマ流など)について研究を進める。また、磁気島拡大、縮小現象に対するヒステリシスについても実験的知見を得る。

(3) 周辺局在化モードの制御法確立

L/H 遷移時に発生する周辺局在化モードの発現領域の同定を行った上で、共鳴摂動磁場や超音速ガスパフを用いた ELM の周波数・安定性制御に関する実験を行う。

研究成果

1) ストキャスティック層の同定法確立

一般的に閉じ込め磁場構造は、外部磁場計測等を用いた平衡解析により評価され、閉じ込め領域に入れ子状の磁気面が存在していることを仮定している。しかしながら近年、トカマクをはじめとする二次元装置において外部摂動磁場等を用いた安定性制御等が積極的に行われており、外部摂動磁場による閉じ込め磁場領域への影響を定量

的に評価する上で、形成された磁力線の乱れる領域（ストキャスティック領域）を実験的に評価する事が課題となっている。一方、ヘリオトロン配位では入れ子状の磁気面と周辺部にストキャスティック領域が真空時に存在し、ベータ値の上昇に伴うストキャスティック領域の拡大が閉じ込め磁場領域を制限する可能性が指摘されている。本課題は、そのような磁場構造の境界を実験的に評価することを目標としており、(1) 短パルス ECH（モジュレーション ECH:MECH）による熱パルスの伝達からの磁場構造の類推、(2) 径電場分布形状による同定を試みた。本実験は米国研究者チームとの共同研究の下に進められた。

1-1) MECH による磁場構造同定

本手法は、MECH を用いて最外殻磁気面内側領域（ $R \sim 4.37\text{m}$ ）を加熱し、熱パルスの径方向への伝播を調べることにより磁気面及びストキャスティック層の境界を同定するものである。図 3.3.3-1 に MECH を用いた場合の各径方向位置での電子温度の変化を示す。コア領域での電子温度の上昇が周辺部へ伝播している様子が確認できる。プラズマ大半径に対する熱パルスの遅延時間を図 3.3.3-2 に示す。 $R \sim 4.46\text{m}$ で熱パルスの遅延が緩やかに変化する傾向にあり、この変曲点位置は数値計算による結果とほぼ一致している。遅延時間の変化は、乱れた磁場領域での径方向の熱輸送が磁気面領域よりも速いことを示唆している。今後は本手法を広範な磁場配位に対して適用し、本手法の妥当性に関する検証を進める。

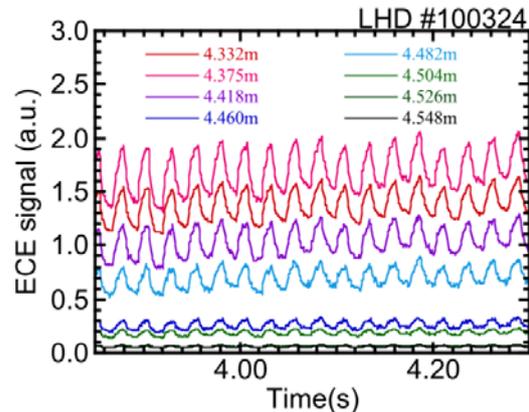


図 3.3.3-1 MECH 使用時の ECE 信号の変化

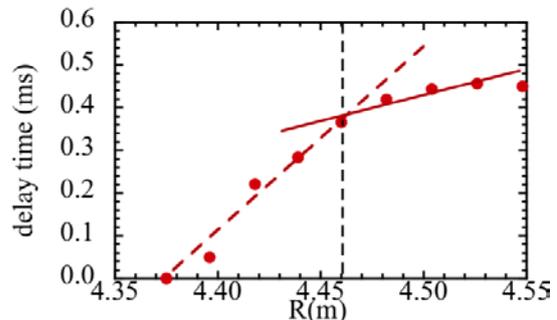


図 3.3.3-2 プラズマ大半径に対する熱パルスの遅延時間

1-2) 径電場分布による磁場構造同定

ストキャスティック領域は磁力線結合長が短いことから、磁気面内と比較して径電場分布が異なることが予測される。ここではベータ値が異なるプラズマに対して荷電交換分光計測を行い、予測される磁場構造と径電場分布との対比を行った。図 3.3.3-3 に 3次元 MHD 平衡コード HINT2 による磁場構造とプラズマのポロイダル速度を示す。ポロイダル速度分布形状は径電場とほぼ同一であり、正のポロイダル速度が正電場に対応する。プラズマのポロイダル速度は磁気面境界近傍において大きく増加する傾向にあり、ベータ値の増加に伴う磁場領域の拡大に伴い、ポロイダル速度分布も広がる傾向が確認できる。ただし磁気面境界位置が電場の最小値に対応するのか、あるいは最大電場勾配をとる位置なのかについては、現在評価を進めている。

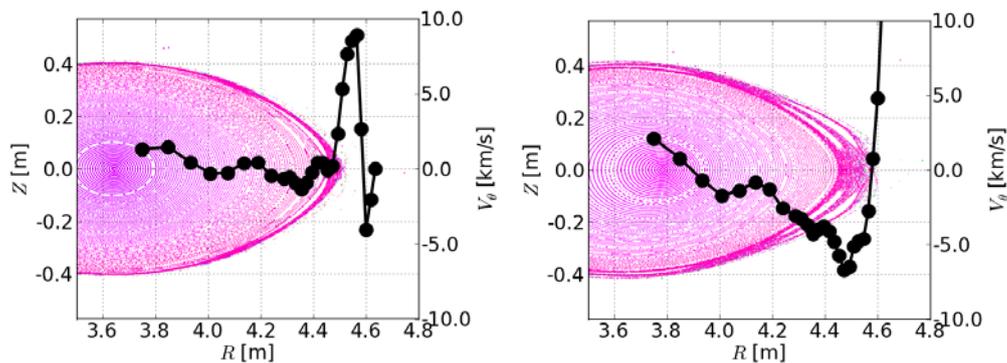


図 3.3.3-3 ベータ値 1% (左) 2% (右) における磁気面とプラズマポロイダル速度

2) 磁気島の物理機構解明

高温プラズマを維持する上で健全な閉じ込め磁場構造を生成、維持することは必要不可欠であるが、外部機器や電流フィーダー部等より誤差磁場が生じた場合、閉じ込め磁場構造が乱れ、島状の磁場構造が形成される(磁気島)。LHD では電子ビームマッピングにより誤差磁場の存在が確認されており、プラズマアスペクト比の増加やプラズマ電流の増大によって磁気シアを低下させた配位においては、誤差磁場に起因すると思われる $m/n=1/1$ (m, n はそれぞれポロイダル、トロイダルモード数) 構造を持つ磁気島の発現によりコア領域の崩壊現象が観測されている。このような磁気島はベータ値や衝突性によって発現、緩和する事がわかっている。本研究では、外部摂動磁場(RMP)を積極的に用いて磁気島のプラズマ応答を調べることを目的とし、外部共鳴磁場のプラズマによる遮蔽効果、及び磁気島のポロイダル流に対する影響についてプラズマパラメータ依存性を明らかにするための実験を行った。ここでは共鳴磁場摂動に対する磁場遮蔽効果について報告する。

誤差磁場(外部摂動磁場)のプラズマによる磁場遮蔽効果を明らかにするために、磁気シアが異なる配位において RMP ランプアップ実験を行った。図 3.3.3-4 にプラズマアスペクト比 (A_p) が異なる配位における放電を示す。 $A_p=8.3$ が低磁気シア、 $A_p=6.6$ が高磁気シア配位に対応する。低磁気シア配位では、外部摂動磁場を印加する前より磁気島が発現し、放電後半では摂動磁場の増加に伴って磁気島幅が拡大していく傾向にある。一方、高磁気シア配位では外部摂動磁場はある閾値に達するまで遮蔽され、閾値を超えた時に急激に磁気島構造が現れ、ベータ値を低下させる。発現後の磁気島幅は低磁気シア配位と同等であり、いずれも真空時に予測される外部摂動磁場による磁気島幅よりも大きい。

図 3.3.3-5 に磁気シアに対する磁場遮蔽閾値を示している。磁気シアの増加に伴い、閾値が線形で増加していく傾向がわかる。外部摂動磁場コイルの極性を反転させた場合にも同様の結果が得られているが、両者の差分は磁気シアに対してほぼ一定であり、その磁場強度、空間構造は電子ビームマッピングで観測された誤差磁場と一致している。

磁場遮蔽閾値については磁場配位に対する効果の他にプラズマ流が大きな鍵となるため、今後その依存性について調べる予定である。

3) 周辺局在化モード (ELM) の制御法確立

トカマク装置での H モードと同様に、LHD においても H モード遷移後、周辺に局在した不安定性 (ELM) が観測されている。トカマク装置では ELM によるダイバータ損耗が問題となっており、この解決が核融合炉の成立性を決める大きな要因の一つとなっている。これまで、ELM 緩和のために共鳴摂動磁場 (RMP) を印加して周辺領域に統計的磁場領域を作ったり、ペースコントロールのためのペレット入射を行ったりする試みが様々なトカマク装置で行われている。特に前者は DIII-D、JET にて摂動磁場コイルを追加して ELM 緩和に成功したことから、ITER においてもその適用が議論されている。よって LHD では、同様に共鳴摂動磁場コイルを用いたアプローチ、及びポロイダル磁場コイル電流値の増減により四重極磁場を変えることで、元々周辺部に持つ統計的磁場領域の層厚等を変化させる実験を行った。

3-1) 共鳴摂動磁場を用いた ELM 制御

LHD では、真空磁気面の磁気軸を $R_{ax}=3.6\text{m}$ から 4.0m まで可変することにより H モードプラズマ特性と周辺局在化不安定性 (ELM) の性質が大きく変化する。 $R_{ax}=3.6\text{m}$ のような内寄せ配位では ELM なしフェイズは 20ms 以下と極めて短く、その直後に小振幅で $\sim 100\text{Hz}$ を超える高い繰り返し周波数の ELM が発生する。一方、 $R_{ax}=3.9\text{m}$ のような外寄せ配位では LH 遷移後、エネルギー閉じ込め時間の 10 倍程度の長い間、ELM が完全に抑制されており電子密度が時間とともに線形に増大する。この長い ELM なしフェイズは大振幅で $\sim 10\text{Hz}$ 程度の低繰り返し周波数の ELM により遮断される。このような H モードの一例は、図 3.3.3.-6 と図 3.3.3-7 の共鳴摂動磁場 (RMP) なしの場合に対応したものである。なお、このショットでは $t\sim 3.8\text{s}$ で L-H 遷移し、 $t\sim 4.7\text{s}$ で H-L 遷移して L モードフェイズに戻っている。

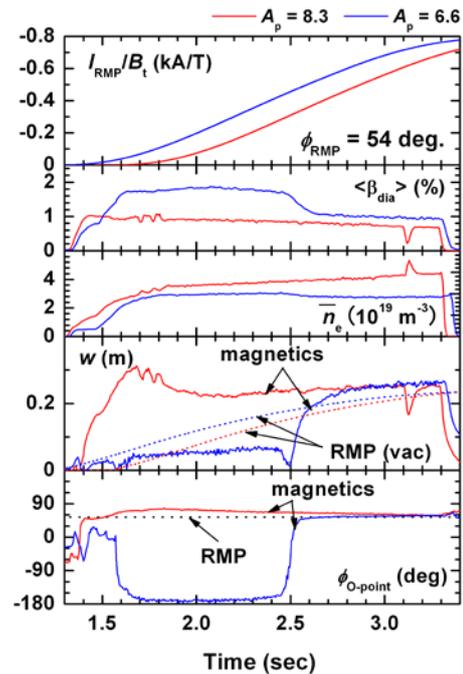


図 3.3.3-4 異なるアスペクト比における磁場遮蔽の様子

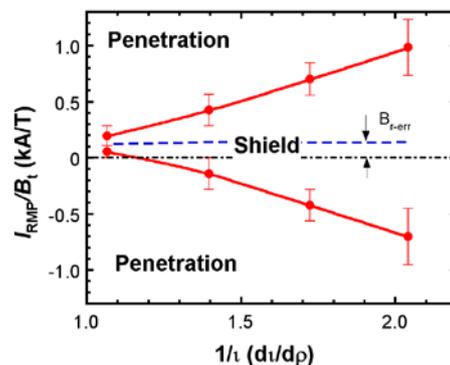


図 3.3.3-5 磁気シアに対する磁場遮蔽閾値

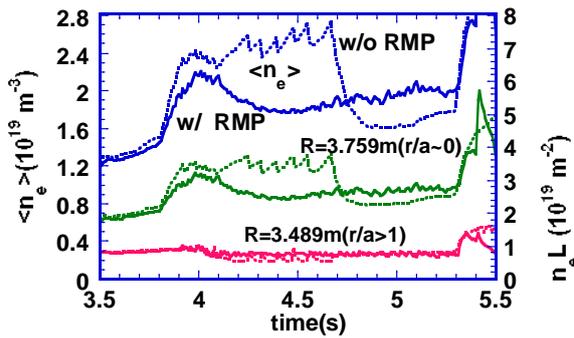


図 3.3.3-6 RMP を印加しない場合(破線)と印加した場合(実践)における電子密度の時間変化の比較。

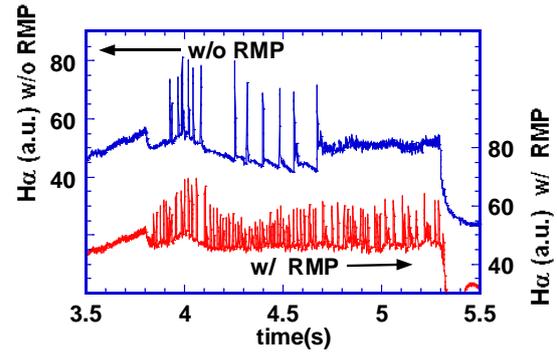


図 3.3.3-7 RMP を印加しない場合と印加した場合の H アルファ信号の比較

このショットが得られた磁場配位は $R_{ax}=3.9\text{m}$ であり、 $\nu/2\pi=1$ の共鳴面は最外殻磁気面(LCFS)の外の統計的磁場領域にある。この磁場配位に $m/n=1/1$ 共鳴擾動磁場を印加すると、図 3.3.3-6 や図 3.3.3-7 の RMP 印加時のショットのようになる。すなわち、ELM 振幅が約 1/2 と低減され、ELM 繰り返し周波数は約 5 倍に増加し電子密度の線形的上昇は抑制される。トロイダル磁場で規格化した RMP 磁場強度は $\sim 5 \times 10^{-4}$ である。RMP により周辺部の電子密度が低下し、結果としてプラズマ周辺にある $\nu/2\pi=1$ の共鳴面付近の圧力勾配は若干低下している。これが ELM 抑制に効果があったと思われる。注目すべきは、RMP の印加による閉じ込め性能の低下は、ISS 則に基づいて評価すると $\sim 11\%$ 以下と小さく、RMP による ELM 制御をヘリカルプラズマで初めて実証した。

3-2) 四重極磁場による ELM 制御

図 3.3.3-8 に標準的な四重極磁場 (B_q) である 100% の場合 (a) と、縦長断面変形に相当する 72% の場合 (b) での放電を示す。 $B_q=72\%$ でのポアンカレプロットより、この配位で周辺の統計的磁場領域は 100% と比較して厚いことが分かる。いずれの配位においても、電子密度が自発的に増大し、

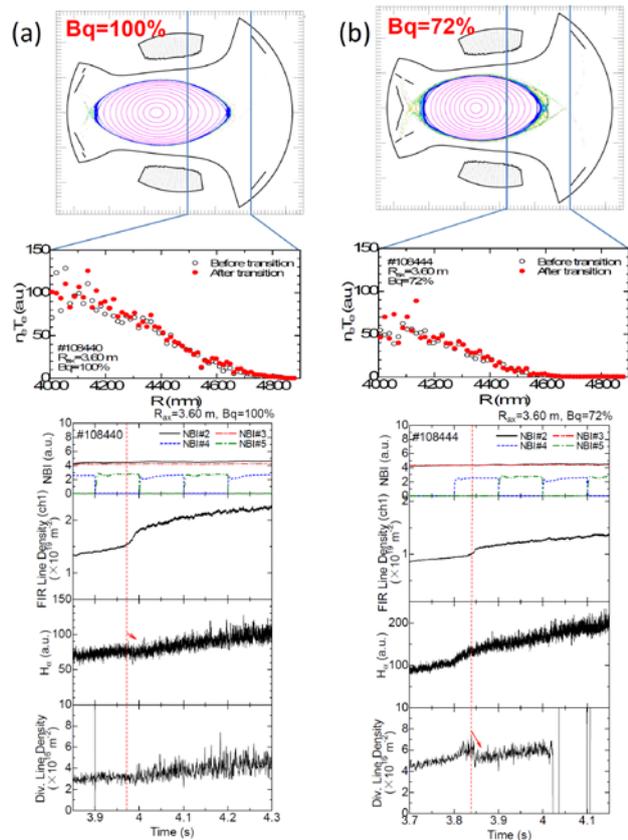


図 3.3.3-8 四重極磁場が異なる配位での遷移。(a) $B_q=100\%$, (b) $B_q=72\%$

Hモード遷移が得られている。ELMに伴ってダイバータ領域に吐き出されるスパイク状のプラズマは、両者を比較すると $B_q=72\%$ の場合の方が少ないことが、ダイバータ領域の密度（図 3.3.3-8 最下段）から分かる。これは、統計的磁場領域を増やしたことで、周辺領域の圧力（密度・温度の積）勾配が幾分抑制されたことに起因すると考えられ、 B_q 制御による ELM コントロールの可能性を示した。また、このような統計的磁場領域を増やした配位においても、Hモードへ遷移することも特筆すべき点である。

4) その他の研究

上記の重要課題の他にも、交換型不安定性の物理特性理解を目的とした研究を進めている。

4-1) 理想安定性境界の評価

LHD では、磁気シアが小さくなる配位や磁気シアが小さくなる方向にプラズマ電流が流れたときに MHD 不安定性が成長し、コラプスが発生する現象が観測されている。本研究では、一方向からの中性粒子ビームの入射によってプラズマ電流を駆動し、水素プラズマ中へのネオンガス入射量を変化させることでプラズマ電流の増加率を調整することで、コラプスの発生境界を明らかにすることが目的である。図 3.3.3-9 にコラプスが発生した放電としない場合の放電波形を示す。#105387 では $t=4.17\text{sec}$ 付近でコラプスが発生している。#105390 ではネオンガスを入射していないため #105387 に比べてプラズマ電流の立ち上がりが緩やかになりコラプスが発生しなかった。また両方の放電とも、放電ガスである水素の入射は $t=4.5\text{sec}$ で終了している。

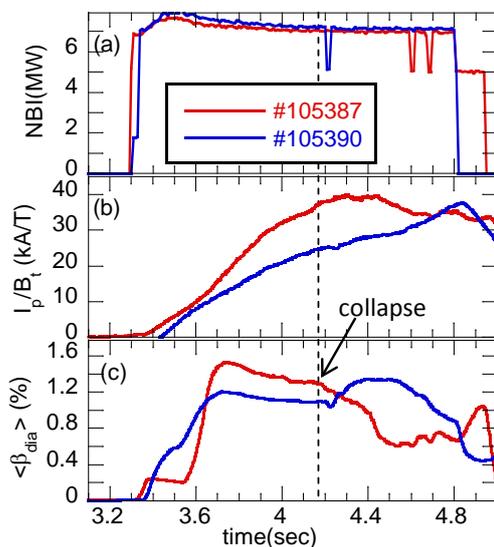


図 3.3.3-9 コラプス現象発生(105387)と発生しない場合(105390)のNBI入力とプラズマ電流とベータ値の時間発展

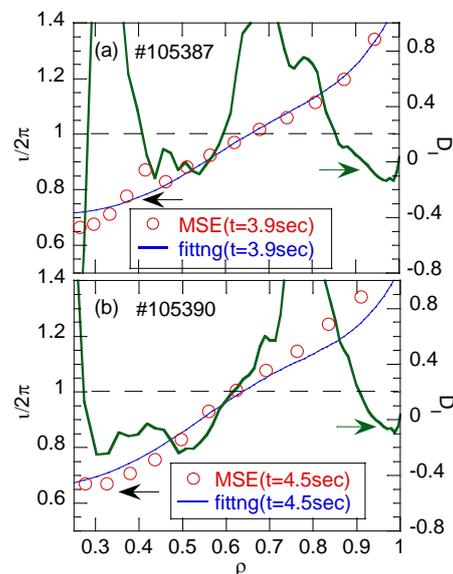


図 3.3.3-10 MSE 計測で得られた回転変換分布と平衡計算により得られる回転変換分布とメルシエパラメータ

図 3.3.3-9 の放電の MSE 計測結果と平衡計算結果を図 3.3.3-10 に示す。図 3.3.3-10 から、コラプスが発生する放電のほうが、磁気シアが弱く、メルシエパラメータ D_I が大きいことがわかる。今後は、MSE 計測結果をもとに、コラプス直前の平衡計算を行い、 D_I によるデータベースを構築することで、コラプス発生 の 閾値を明らかにすることができるかを検証する。

4-2) 外部印加摂動磁場を用いた低次 MHD 不安定性の抑制

LHD の高ベータ放電では、閉じ込め性能の劣化を引き起こすような崩壊現象は観測されていないが、周辺の有理面に共鳴する長波長(低次)の抵抗性交換型 MHD 不安定性が観測され、その磁場揺動強度はベータ値の増加や衝突頻度の増加(磁気レイノルズ数の減少)に伴い、増加する特徴があることが知られている。このような不安定性の閉じ込め性能に対する影響の実験的な定量化が最近行われ、揺動の小半径方向の変位を指標として、閉じ込め性能が評価できることが分かった。この結果によると、不安定による閉じ込め性能への影響は、揺動の径方向変位の空間的な最大値が大きいほど、巨視的閉じ込め性能への影響が大きく、径方向変位量が小半径の 5%程度で閉じ込め性能が 10%劣化すること、閉じ込め性能の劣化の範囲は有理面近傍に限られることが分かった。本研究の目的は、このような高ベータ放電で観測される低次 MHD 不安定性を、外部印加摂動磁場を用いて抑制する手法を開発することである。

高ベータ放電の典型的な長波長の不安定性揺動である $m/n=1/1$ モードが

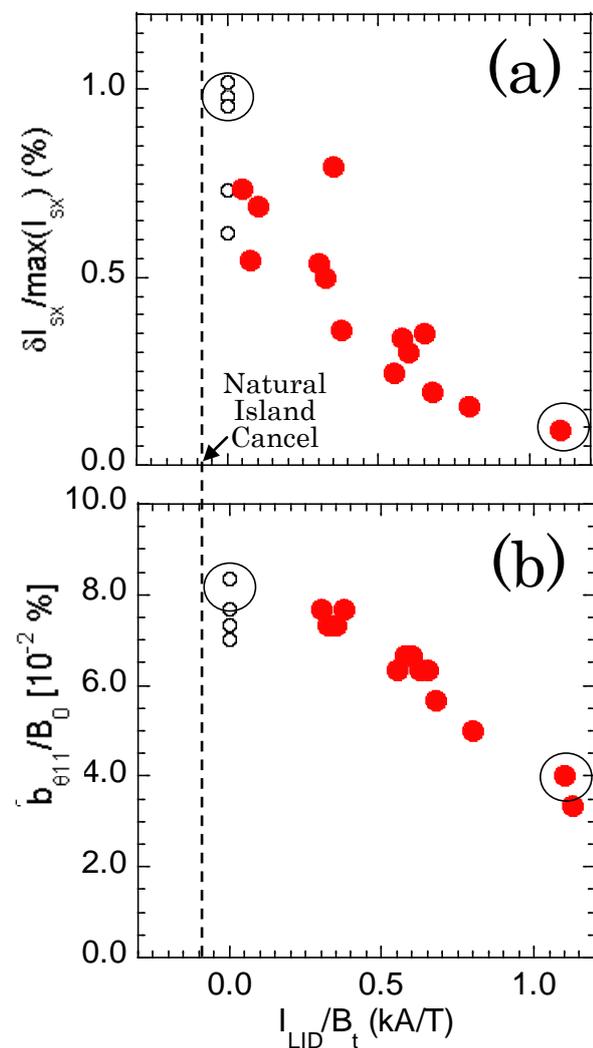


図 3.3.3-11 摂動磁場を印加した時の長波長の MHD 不安定性の揺動強度の変化。(a) 同一視線の定常値で規格化した軟 X 線で計測した揺動強度(線積分値)。(b) 運転磁場で規格化した磁気揺動強度(プラズマ外部で観測)。

発生しているプラズマに対して、RMP を使って、主に、 $m/n=1/1$ モードの摂動磁場を静的に印加する実験を行い、長波長 MHD 揺動がどのように影響を受けるかを調べた。この時、揺動の径方向の変位量の空間分布は、軟 X 線計測法を使って評価し、磁場揺動はプラズマ外部に設置した磁気プローブを使って計測した。プラズマの放電は、 $m/n=1/1$ モードが発現しやすく、軟 X 線計測に適した条件で行った (磁気軸位置 3.75m, 4 重極磁場 100%、プラズマアスペクト比 6.7、磁場強度 1.2T、典型的な体積平均ベータ 0.9~1%)。

図 3.3.3.-11 に、外部から印加する摂動磁場強度を変えた時の $m/n=1/1$ モードの小半径方向の揺動振幅の最大値 (a) と磁場揺動強度 (b) の変化を示す。印加する摂動磁場強度は、摂動磁場コイルに通電した電流値を運転磁場で規格化して表記しており、縦の点線に当たるコイル電流値が、LHD 装置固有の誤差磁場を打ち消す大きさに対応している。装置固有の誤差磁場は $m/n=1/1$ モードが支配的で、プラズマ小半径の 10% 程度の幅をもつ磁気島を形成する大きさに対応しており、図 3.3.3-11 の解析の対象とした実験では、適用した最大摂動磁場がプラズマ小半径の 20% 程度の幅を持つ磁気島を形成する大きさに対応している。図 1 (a) は、小半径方向の揺動振幅の線積分値 δI_{sx} を DC 成分の最大値 $\max(I_{sx})$ で規格化したものを表示している。局所的な径方向の変位をガウス分布で仮定したモデルによると $\delta I_{sx}/\max(I_{sx}) \sim 1\%$ が、小半径方向の変位の振幅が小半径のほぼ 1.5% の場合に対応している。印加摂動磁場の増加に従って、小半径方向の揺動振幅が減少しており、摂動印加磁場強度が誘導磁気島幅換算で小半径の 20% 程度になると、揺動強度振幅が 1/10 程度に減少することが分かった。一方、プラズマ外部で観測した磁場揺動強度も印加摂動磁場強度の増加につれて減少し、摂動印加磁場強度が誘導磁気島幅換算で小半径の 20% 程度になると、揺動強度振幅が 1/2 程度に減少することが分かった。交換型 MHD 不安定性は圧力勾配の大きさに強く依存するので、図 3.3.3-11 の解析で対象とした実験において、圧力勾配がどの程度変化したかを示すために、図 3.3.3-12 に静的な摂動磁場を印加しない場合とプラズマ小半径の 20% 程度の幅を持つ磁気島を形成する大きさに対応する摂動磁場が印加された場合 (図

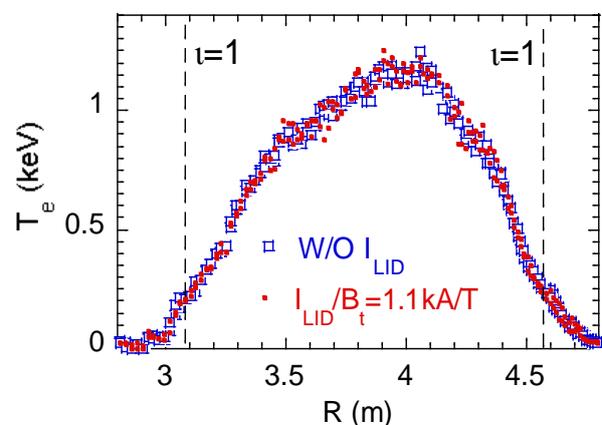


図 3.3.3-12 摂動磁場を印加しない場合と印加した亜場合の電子温度分布。図 3.3.3-11 の○で囲まれたデータの計測値に対応。

3.3.3-11 の○で囲まれたデータに対応)の電子温度分布を示す。2つの場合で、外部印加摂動磁場の大きさがかなり異なるにも係わらずほとんど電子温度分布は変化せず、鏡面有理面付近で明確な平坦化も観測されていない。

以上のことから、外部摂動磁場印加による不安定性の揺動強度の減少は圧力勾配変化を通じた応答ではなく、磁場の境界条件の変化を通じた応答である可能性が高いことが分かる。

大きな磁気島が、形成が予測される摂動磁場を印加したにも係わらず、電子温度分布に平坦化構造が見られなかったこと、摂動磁場未印加時の電子温度分布との変化がほとんど見られなかった理由は、共鳴摂動磁場のプラズマへの遮蔽効果が原因の一つとして考えられるが、今後の研究課題である。また、揺動強度の減少による閉じ込め性能の改善度の定量化や摂動磁場による不安定性揺動強度抑制機構の解明も今後の研究課題である。

3. 3. 4 高エネルギー粒子の物理

1) 高エネルギー粒子物理研究の最近の成果について

LHDにおける高速イオンのリップル輸送、閉じ込めの配位依存性について

3次元磁場配位であるヘリカル系においては、磁場の対称性が仮定出来ないため、粒子軌道が複雑になる。このため、衝突周波数が低い高速イオン、特に核融合反応で生成した α 粒子の閉じ込めが懸念されており、ヘリカル系においては高速イオンのリップル輸送は重要な研究テーマとなっている。高速イオンのリップル輸送に関する研究はヘリカル系のみならず、トカマク型装置でも問題となっている。通常このような高速イオン閉じ込めの議論は、重水素プラズマに重水素中性粒子ビームを短パルス入射 (blip 入射) し、その時の中性子発生率の減衰時間から評価される。

LHD では、中性子を発生するような実験をすることが出来ないため、軽水素プラズマに、軽水素ビームを blip 入射し、それに伴う水素の中性粒子束の減衰時間から閉じ込めを評価する実験を行った。実験では、LHD の磁力線に対して垂直な方向に入射された NB を利用し、この入射粒子と同様のピッチ角を持つ粒子を中性粒子分析装置 (FNA) で観測し、入射粒子の LHD プラズマ内での閉じ込め特性を議論する。

図 3.3.4-1 に、その時の典型的な中性粒子フラックスの時間変化を示す。この図では Si 半導体型 FNA によって計測された 29keV 以上の中性粒子束の時間変化が示されている。SiFNA は受動的な中性粒子計測であるため、計測された信号は、検出器の視線を線積分したものとなっており、特にプラズマ周辺部の影響を強く受ける。そこで、中性粒子束の減衰時間 (τ_{decay}) を計測するには、NB オフ後一定の時間 (図 3.3.4-1 では 100ms) の経過後のデータを指数関数でフィッティングして観測視線上のコア部での高速イオンの閉じ込め情報を求める。プラズマ中の電子温度分布は周辺部で低く、中心部で高いので、高速イオンのエネルギー減速時間は中心部で長く、周辺部で短くなる。ビームオフ後一定の時間待つことで、観測視線上周辺部の高速イオンは計測の対象以下のエネルギーに減速してしまうので、それ以降の中性粒子束の信号には中心部に由来した信号のみが残され、結果としてこの時間帯の減衰時間にはプラズマ中心部の高速イオンの閉じ込めの情報が反映される。

このようにして求めた減衰時間と観測視線上のプラズマ中心部での高速イオンのエネルギー減速時間 ($\langle \tau^{E_{inj.} \rightarrow E_{thres.}} \rangle_{orbit}$) から次式を利用して、観測視線上のプラズマ中心部での高速イオンの閉じ込め時間 ($\tau_{lifetime}$) が求められる。

$$1/\tau_{lifetime} \equiv 1/\tau_{decay} - 1/\langle \tau^{E_{inj.} \rightarrow E_{thres.}} \rangle_{orbit} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 $E_{inj.}$ は blip 入射した NB の入射エネルギーであり、 $E_{thres.}$ は観測対象としている中性粒子束のエネルギー領域の下限を表す。また、 $\langle \rangle_{orbit}$ は FNA によって観測される高速イオンの軌道に沿った平均操作を表す。これは、FNA の観測視線上の各点から時間を遡る形で軌道計算を実施して求めた。図 3.3.4-2 に、(1)式を用いて求め

た閉じ込め時間 (τ_{lifetime}) を、更に 90 度ピッチ角散乱時間 ($\langle \tau_{\text{perp.}} \rangle_{\text{orbit}}$) で規格化したものを示す。このグラフでは同一のシンボルに対して、3 個の点が表示されているが、これは異なる 3 視線の FNA の計測結果を反映する。ここで示された規格化された閉じ込め時間は、高速イオンの速度空間上における FNA によって観測されるピッチ角領域内の粒子の数 (N_{inside}) とその領域外の粒子の数 (N_{outside}) の比を用いて、次式の様に表すことが可能である。

$$\tau_{\text{lifetime}} / \langle \tau_{\text{perp.}} \rangle_{\text{orbit}} = \frac{1}{b - a(N_{\text{outside}} / N_{\text{inside}})} \quad \text{--- (2)}$$

ここで、a, b は観測視線の立体角によって定まる定数である。高速イオンの閉じ込めが良い磁場配位では、NB によって入射された粒子はピッチ角散乱を受けた後も損失することなく LHD プラズマ内に閉じ込まり続け、閉じ込めが悪い配位ではピッチ角散乱後すぐに損失してしまう。つまり、 $N_{\text{outside}} / N_{\text{inside}}$ は閉じ込めの良い配位では大きな値をとり、閉じ込めの悪い配位では小さな値をとる。結果として、規格化閉じ込め時間は、プラズマ中での高速イオンの閉じ込め特性を示す定量的な指標となる。図 3.3.4-2 には、規格化閉じ込め時間の空間分布を示す。図 3.3.4-2(a) に磁気軸位置の磁場強度 2.5T の配位における規格化閉じ込め時間の磁場配位依存性を示し、(b) には磁気軸 3.6m の配位に対する磁場強度依存性を示す。図 3.3.4-2(a) には、内寄せ配位の高速イオン閉じ込めの優位性が定量的な値によって示されている。また、磁場強度が低下するにつれて、高速イオンの閉じ込めは劣化し、磁気軸 3.6m/1.5T 配位の高速イオン閉じ込め特性は、強磁場(2.5T)下の磁気軸 3.75m 配位より悪く、磁気軸 3.9m 配位よりも若干良い程度であることが示された。

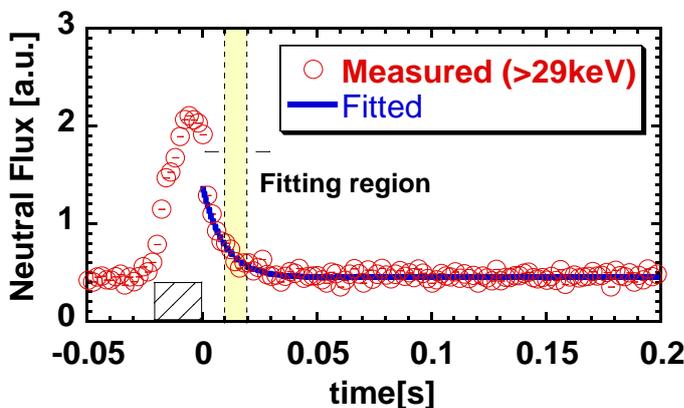


図 3.3.4-1 NB-blip 実験における中性粒子フラックスの時間変化 (○)。図中の斜線部は NB の入射時間を示す。

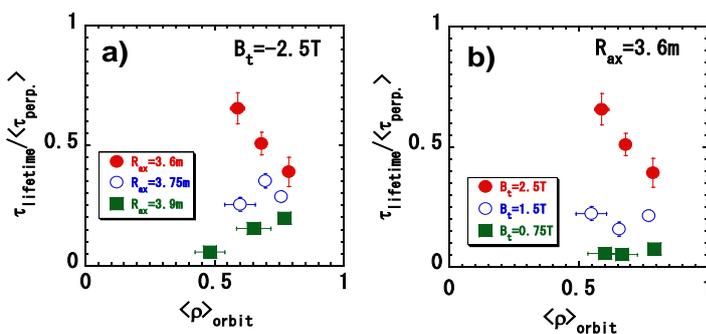


図 3.3.4-2 規格化閉じ込め時間の空間分布。(a) 磁場配位依存性、及び (b) 磁場強度依存性。

高エネルギー粒子によるポロイダル流速への影響

高エネルギー粒子による径方向電場及びポロイダル流速への影響について調べることを目的として、NBI を blip 入射し、密度揺動のポロイダル速度の変化を新しく設置した高時間応答のドップラー反射計で計測した。密度を一定維持したターゲットプラズマに、接線 NBI 及び垂直 NBI をそれぞれ 40, 20ms 間 blip 入射し、これによって生じるドップラー周波数 ($f_D = v_{\perp} k_{\perp} / 2\pi$) の変動を観測した。図 3.3.4-3 に垂直 NBI を 20ms 間 blip 入射した実験での計測例を示す。プラズマ周辺部において、垂直 NBI 入射に伴ってポロイダル流速が電子反磁性ドリフト方向(周波数が負で絶対値の大きい方向)へ変化することが、ドップラー反射計で観測された。この傾向は CXRS でも観測されている。これは高速粒子の直接損失によって電場が生じ、これが電子反磁性方向の流れを駆動したものと考えられ、この変動の特性時間は高エネルギービームの減速時間と同程度であった。

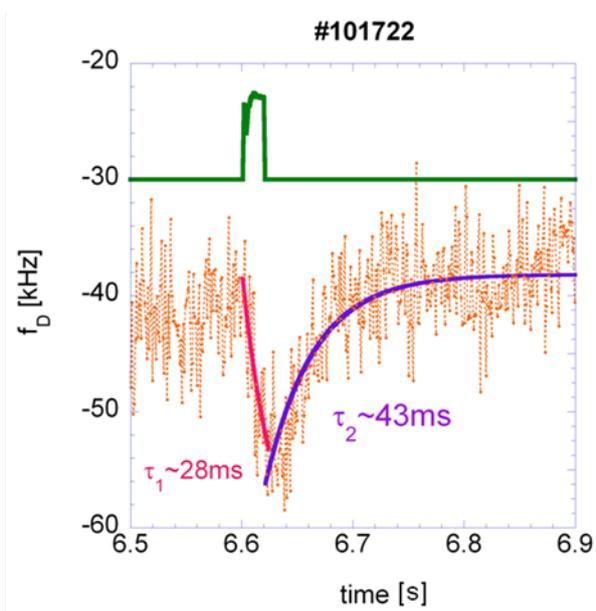


図 3.3.4-3 垂直 NBI の blip 入射時に観測されたドップラーシフトの時間変化。

トロイダルアルヴェン固有モードの空間分布測定および損失高速イオンの観測

将来の核融合プラズマにおいて主な加熱源となるアルファ粒子によって励起される可能性があり、アルファ粒子の輸送および損失を招くものとしてトロイダルアルヴェン固有モードが挙げられる。トロイダルアルヴェン固有モードに起因するアルファ粒子損失を防ぐためにはその損失機構の理解が肝要である。大型ヘリカル装置においては、特にトロイダル磁場が 1.0T 以下の比較的低磁場条件において高速水素イオン励起の強いトロイダルアルヴェン固有モードが励起されており、プラズマの主加熱源である高速イオンを損失させている事が観測された。この条件においては、高速イオンのラーマー半径が LHD 強磁場条件におけるアルファ粒子のラーマー半径と同程度であり、大型ヘリカル装置強磁場実験におけるアルファ粒子の挙動を模擬する事ができる。実験においては、高速 H α アレイを用いたトロイダルアルヴェン固有モード揺動の空間分布測定、磁気プローブを用いた揺動強度測定、及び損失高速イオンプローブを用いたトロイダルアルヴェン固有モードに起因する損失高速イオン束の測定を同時に行った。観測された揺動の空間分布は米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の Spong 博士によって開発されたアルヴェン固有モード固有計算コードである AE3D を用いて評価した揺動分布と一致し、その揺動がトロイダルアルヴェン固有モードである事を同定した。トロイダルアルヴェン固有モードに起因する損失高速イオン束測定

においては、シャフラノフシフトの増大によって磁場揺動強度に対する損失高速イオン束が上昇すると同時に両者の関係が急峻化するという結果を得た(図 3.3.4-4)。これは理論解析の予測から、高速イオンの損失過程が対流的から拡散的になったことを反映している可能性がある。図 3.3.4-4 右図に ORNL の Spong 博士によって開発された案内中心軌道計算コードである DELTA5D コードを用いてトロイダルアルヴェン固有モードの揺動強度に対する損失高速イオン束の関係を図示する。磁場揺動強度は観測値とは異なりプラズマ中での推定値ではあるが、シャフラノフシフトの増大によって損失束が増大すること、及び傾きが増加する傾向を再現できた。

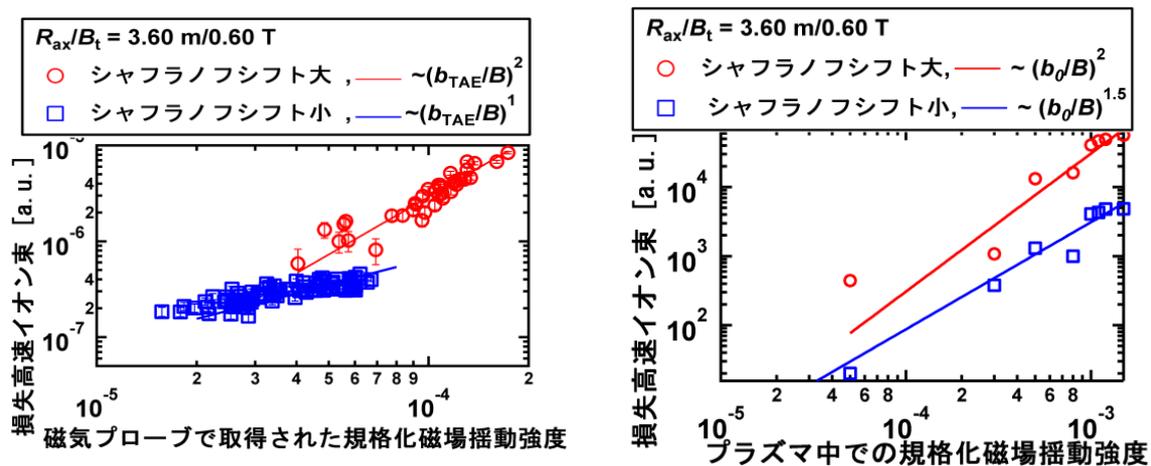


図 3.3.4-4 左図 実験で得られた損失高速イオン束の磁気プローブ位置での磁場揺動強度に対する依存性。右図 シミュレーションによって得られた損失高速イオン束のプラズマ内部での磁場揺動強度に対する依存性。

EGAM 及び RSAE 特性研究

反転磁気シア励起アルヴェン固有モード(RSAE)は回転変換分布が極値を持つ場合に高速イオンによって励起されるモードであり、特に反転磁気シア(RS)配位において閉じ込め改善が発現するトカマク配位においては RS 配位の形成の指標としての活用が期待される重要なモードである。本研究では LHD を用いて、トカマク配位と逆勾配の回転変換分布を持つ反転磁気シア配位においても RSAE が励起されることを初めて実証した(図 3.3.4-5(a)の $n=1/m \sim 2$, $n=1/m \sim 3$ モード)。また、その空間構造や周波数掃引のメカニズムを明らかにした。この結果は、環状プラズマにおける RSAE の理解を深め、核融合炉における回転変換分布の予測手法開発に寄与するものである。また、上記実験と同時に、高速イオン励起 Geodesic acoustic mode(GAM)も観測されている(図 3.3.4-5(a)の $n=0$ モード)。HIBP を用いてプラズマ内部における電位揺動を直接計測することにより、このモードがプラズマ中心領域に存在しており、電子温度の数 10%に達する電位揺動を伴っていることを初めて明らかにした。

さらに、図 3.3.4-5(b)に示されるような周波数が急激に上方掃引し、周期的に励起される GAM も観測されている。この周波数掃引は、定性的には高速イオンの速度空間での不均一性が関係する Hole-Clump モデルによって説明されると考えられ、高速イオン励起 GAM の駆動機構の解明に寄与すると考えられる。また、周波数掃引する GAM も前述の GAM と同様にプラズマ中心領域に存在しており、大きな電位揺動を伴ったモードであることが明らかになっている(図 3.3.4-6)。

高速イオン励起 GAM の特性に関する研究は、現在実験及び理論の両面から飛躍的に進んでいるが、磁気プローブをはじめとする基本的な計測器とともに、HIBP や反射計などの先進的な計測器を有する LHD における実験研究は、この分野に大きく貢献できると考えられる。

トロイダルアルヴェン固有モードに起因するイオンサイクロトロン放射の測定

トロイダルアルヴェン固有モード(TAE)のバーストに同期してイオンサイクロトロン放射(ICE)が励起されることが新規にLHDに設置された高周波磁気プローブを用いて明らかになった。トロイダル磁場強度が0.75Tの場合、ICE基本周波数はおよそ10MHzであった。図3.3.4-7(a)は基本周波数のICE強度を表し、図3.3.4-7(b)は同じ磁気プローブで計測されたTAE強度を表している。更に図3.3.4-7(c)はシンチレータ型損失高速イオンプローブ(SLIP)により計測された損失イオン束を表している。

ICE、TAEバースト、損失イオン束は時間のずれはあるものの同期していることから、ICEはTAEバーストにより、径方向に輸送された高速イオンにより励起されたものと

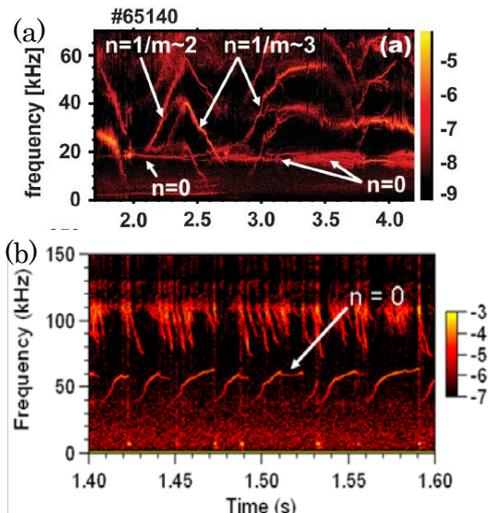


図 3.3.4-5 Mirnov コイルによる磁場揺動のスペクトログラム。

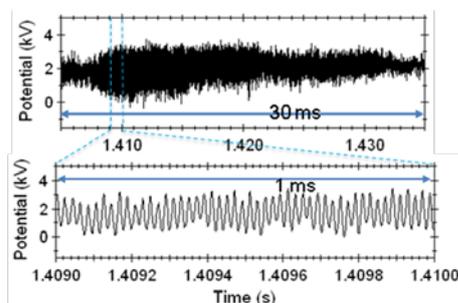


図 3.3.4-6

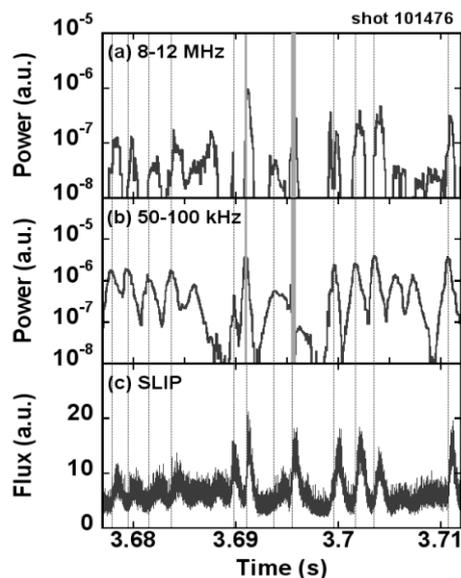


図 3.3.4-7 (a)ICE 基本波強度 (b)TAE($\sim 70\text{kHz}$)強度 (c)損失イオン束

考えられる。この種の ICE はこれまで 0.75T 以外にも 0.4T から 0.9T の磁場強度で確認されており、磁場強度と ICE 周波数は比例関係にあることも分った。ICE 計測は周波数がイオン質量にも依存するため、将来の核融合生成物の計測手段としても有効と考えられる。

高速電子の ECH 加熱効率に与える影響

大電力電子サイクロトロン加熱を行うことにより、電子密度 $0.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で中心電子温度 20keV を超えるプラズマの生成加熱に成功した。このような低衝突領域では、高エネルギー電子の発生が、閉じ込めおよび、加熱に大きく影響を与えることが考えられる。特に、低密度領域の ECH では、高エネルギー電子が発生することにより、相対論的な周波数ダウンシフトの効果が起こり、加熱領域が変化する。図 3.3.4-8 は、ECH 電力を階段状に増加させた場合のプラズマの振舞を示した。平均電子密度が $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合には、蓄積エネルギーが 200kJ に達している。電力を 2MW から 3MW に増加させても密度の減少のため、蓄積エネルギーの変化は少ない。 $0.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合には、蓄積エネルギー、中心電子温度ともに電力に応じた上昇が見られ、入射電力が 3MW になると、中心電子温度がほぼ 10keV に保たれる。ところが、さらに密度を下げ

て $0.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ まで下げると、蓄積エネルギーは、密度の減少にも関わらず、むしろ増加し、特に 3MW に電力が増加すると徐々に上昇を続けているのがわかる。ところが、中心電子温度はむしろ $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の場合と同程度にとどまっている。これらの結果は、低密度領域では、蓄積エネルギーのほとんどが高エネルギー電子によって担われていて、加熱電力の増加によって、さらに高エネルギー電子が増加しており、この高エネルギー電子の発生によって、中心部に吸収される電力が減少することを示唆している。実際に高エネルギー電子を含むレイトレースの計算によると、低磁場側から入射された電力の一部が中心部よりも低磁場側にある相対論的ダウンシフトした第二サイクロトロン高調波領域で吸収されることが示された。

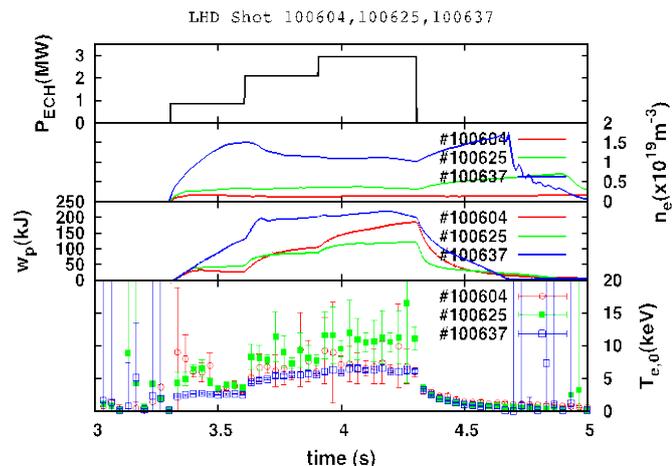


図 3.3.4-8 ECH 電力を階段状に増加させた場合のプラズマの振舞。1, 0.3, $0.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と平均電子密度を変化させた場合の様子を示す。上から、ECH 電力、平均電子密度、蓄積エネルギー、トムソン散乱計測による中心電子温度の時間変化を示す。

高速電子により励起された不安定性の研究

従来、高速粒子励起 MHD 不安定性研究において、NBI、或いは ICH により生成された高速イオンを用いた実験が精力的に行われてきた。ただし、この種の不安定性励起は、本質的には粒子の歳差ドリフト周波数(捕捉粒子の場合)にのみ依存し、質量、電荷など粒子種には依らないため、高速“イオン”で無くとも、この種の不安定性は励起されうる。実際、DIII-D、Compass-D の第二高調波 ECRH 時に高速電子に起因した不安定性が観測されている。また近年、他の幾つかのトカマク実験でも ECH、或いは低域混成波を使った追試実験が盛んに行われている。このことを背景に、LHD において、第 2 高調波 ECH によりヘリカルリップルに捕捉された高速電子を生成し、高速電子に起因する MHD 不安定性励起の有無を調査する実験を実施した。図 3.3.4-9 に、低密度第 2 高調波 ECRH 放電 ($R_{ax}=3.6m/B_t=1.51T$, $P_{ECRH_{77GHz}}=3MW$, $P_{ECRH_{84GHz}}=0.2MW$) において観測されたフィッシュボーン様の回帰的 MHD バースト、並びにその際 HIBP により観測されたプラズマコア部 ($r/a\sim 0.55$) でのポテンシャル変動を示す。この時、高速中性粒子ビームの入射は行っていないため、プラズマ中に高速イオンは存在しない。一方、硬 X 線波高分析器により 300keV を越えるエネルギーの高い X 線が放出されていることが確認されており、図 3.3.4-9 で示すプラズマにおいて非熱化電子は存在している。MHD バーストに伴い、ポテンシャルの正方向への増加が認められ、高速電子の径方向への輸送、或いは損失があることを示唆している。今後、硬 X 線波高分析器の他チャンネル化による非熱化電子の空間分布情報を取得し、揺動分布との対応関係の調査、並びに不安定性種の同定に向けた解析を行う予定である。

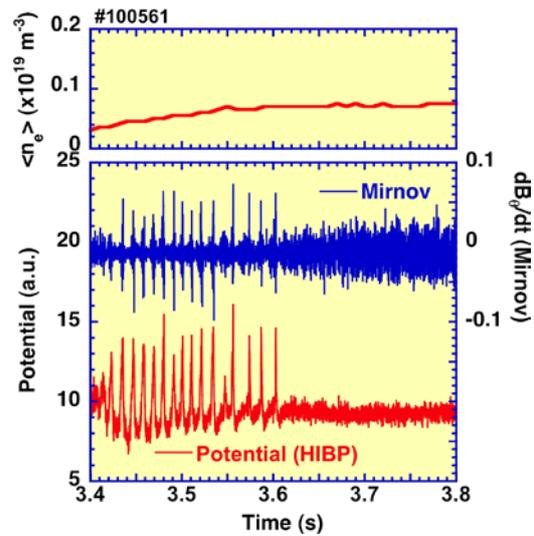


図 3.3.4-9 第 2 高調波 ECRH プラズマにおいて観測されたフィッシュボーン様の回帰的 MHD バーストとポテンシャル変動

接線視線高速イオン荷電交換分光計測 (FICXS) の開発

高速イオン荷電交換分光(FICXS)は、 $H\alpha$ 光 (656.3nm) のドップラーシフトを利用して高速イオンの速度分布関数とその空間分布が同時に得られる計測法である。垂直ビーム BL4 から LHD プラズマへ入射された計測ビームは高速イオンと荷電交換し、高速イオンを中性化するとともに $n=3\rightarrow 2$ 遷移によって $H\alpha$ 光を発する。この $H\alpha$ 光は中性化高速イオンの速度に応じてドップラーシフトするため、そのシフト量が高速イオンの速度の情報を与える。ただし、観測されるドップラーシフトは視線に依存するため、高速イオンの速度を高い分解能で得るためには、注目する速度成分の方向の視線を用意する必要がある。

本研究では、AEのような周回粒子と関係が深い揺動の高速イオン分布への影響を調べるため、LHDプラズマを接線方向から見る視線を新たに整備した(図3.3.4-10)。

これにより、目的とする周回粒子起因の高速イオン荷電交換(FICX)成分の観測に成功し、シミュレーションと比較することで速度分布関数およびその空間分布の同定に至った(図3.3.4-11)。また、本視線において、実験的に120keV/amu程度までのエネルギー帯のFICX成分を捉えることに世界で初めて成功した。一方、接線視線で計測される信号が磁力線と平行方向に進む高速イオンの情報を反映することを、ドップラ

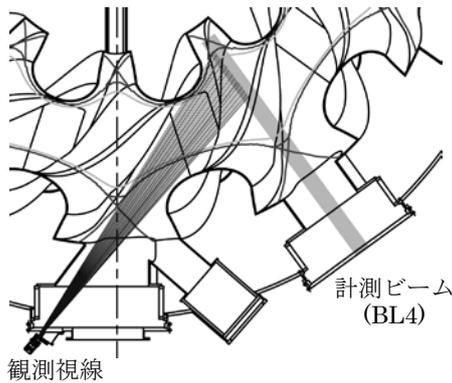


図3.3.4-10 FICXS計測における接線視線

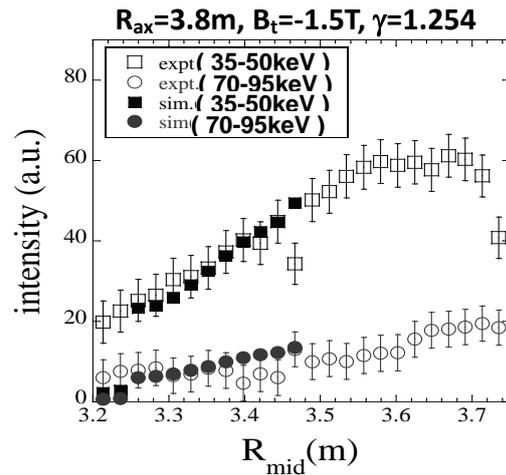


図3.3.4-11 実験および数値計算から得た各エネルギー帯のFICX信号強度の空間分布。

ーシフトスペクトルの波長と速度空間上の対応として示した。つまり、ある波長帯で積分した信号強度はその波長帯に対応するエネルギー領域の高速イオン密度を反映する。この速度空間上の特性を用いることで、波長帯で積分した信号の時間発展から25~70keV程度のエネルギー帯の高速イオンの減速過程を磁気軸3.53m磁場強度2.5Tの配位において観測することができた。その結果、コア領域における高速イオンのエネルギー緩和過程が古典的であることを確認した。

高速イオン速度分布関数のための協同トムソン散乱

プラズマ中の高速イオンの速度分布関数を計測するために、ここ数年LHDにおいて協同トムソン散乱計測(Collective Thomson Scattering diagnostics, CTS)の開発を行ってきた。具体的には77GHzジャイロトロンをプローブビームとした送受信系、微弱な散乱信号を検出するためのヘテロダイン受信機、及び散乱スペクトル計算コードの開発である。図3.3.4-12は、NB#3でプラズマを維持し、テスト粒子としてNB#4を間欠入射した場合に得られたCTS信号のスペクトログラムである。77GHzジャイロトロンを50Hzで振幅ON-OFF変調し、背景光の差引からCTS信号を得ている。この時、観測視線は磁場におよそ垂直方向に向いており、NB#4の v_{\perp} に感度が良い。NB#4によ

り発生した高速イオンは CTS 観測周波数±0.5~1.0GHz に相当する。CTS スペクトルは NB#4 が入り始めると-1.0GHz(+0.6GHz) まで強度が上昇し、NB#4 が切れると-0.6GHz(+0.4GHz) 付近までスペクトル広がり縮小が観測された。観測信号は視線方向へ投影されたイオンの速度分布関数となるため、次のステップとして高速イオン輸送をシミュレーションできる GNET の結果（一例は図 3.3.4-13）と比較し、計測結果の検証を進めている。

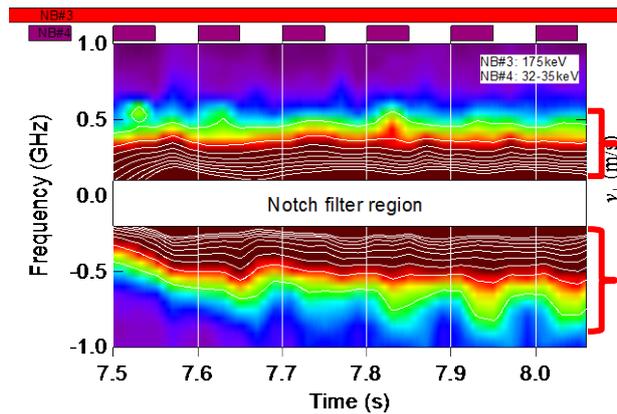


図 3.3.4-12 CTS により計測された散乱スペクトル(shot #101719)

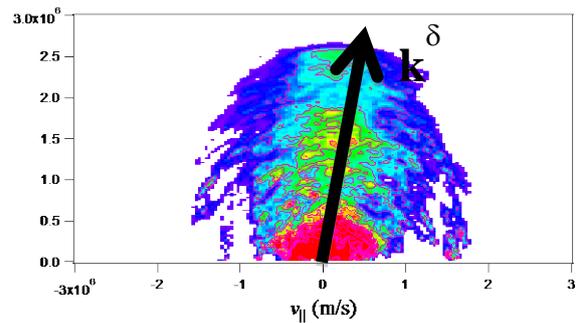


図 3.3.4-13 GNET を用いて計算されたイオンの速度空間分布の一例

2) 評価の観点に関連したまとめ

理論プロジェクト、炉エプロジェクトの連携について

FICXS と CTS の計測器開発と計測結果を解釈するために GNET 等理論プロジェクトと連携を図っている。AE 関連も理論高エネルギーと連携を図っている。

共同研究について

※一般共同研究 5 件

- LHD プラズマにおけるヘリシティ誘起アルヴェン固有モードの特性解明（山本、京大）
- LHD における NBI 粒子の軌道と速度分布関数の解析（松本、北大）
- FICXS 計測による高エネルギー粒子の空間分布の検証（村上、京大）
- 高速イオン荷電交換分光計測におけるバルクイオン起源のハロー中性粒子の影響（小林、京大）
- 高エネルギー粒子閉じ込めの物理機構解明と高性能化（山本、京大）

※双方向型共同研究 7 件

- LHD 実験を補完するために、Heliotron J、Quest、レーザー研との共同研究を実施している。
- 将来の燃焼プラズマ計測のために、東北大金研と光学材料などの耐放射線性の調査と材料開発を実施している。

海外との協力について

- オークリッジ国立研究所との共同研究により、LHD-AE 実験において AE3D や Delta5D コードを使った解析を進めることができた。
- KSTAR と HL-2A の損失イオンプローブに関して、技術支援を行った。
- CTS に関してデンマーク RISOE グループと共同研究を行い、相互交流を実施した。散乱スペクトル計算コードのベンチマーク、研究者を招聘して LHD 実験参加、ディスカッションを行った。

学生教育について

(LHD 関連 博士論文 1 名、在学 1 名)

LHD 実験に関連したテーマで博士課程学生 1 名が博士の学位を取得した。現在、1 名が博士課程に在学中である。その他、共同研究受け入れに関して、5 名が修士、もしくは博士を取得した。

内訳：

○小川国大 (名大院・工・エネ理) 博士論文 2011 年 3 月

「大型ヘリカルプラズマにおける巨視的不安定性による高速イオン損失過程の研究」

○小笠原慎也 (名大院・工・エネ理) 博士課程在学
共同研究受け入れ

なお EGAM 及び RSAE 特性研究の一部は学生教育のための課題にもなっており、1 名がこの研究を通じて名古屋大学より修士号を取得し、1 名が修士課程の研究課題として本研究に取り組んでおり、第 8 回アジアプラズマ核融合学会において Best Poster 賞 2 位を受賞するなどの成果を上げている。

その他、総研大夏の体験入学において、高エネルギー粒子計測、反射計、重イオンビームプローブ実験等を実施した。

3. 3. 5 波動加熱物理

第 14 サイクルに、トロイダルアレイアンテナ(Toroidal Array antenna、通称 HAS (Handshaked) アンテナとも呼ばれている)を一对設置した(図 3. 3. 5-1)。このアンテナは、最外殻磁気面の磁力線に沿って配置されている。高周波加熱電力は、高周波加熱源からそれぞれのアンテナへ給電されているので、高周波電力の位相を変える事により、一对のアンテナから放射される速波の合成により、磁力線方向の波数($k_{||}$)を可変することができる。

一般にイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱実験において、アンテナから放射される高周波電力は、アンテナの幾何学的構造あるいは高周波電流の磁力線方向の分布等から、フーリエ展開した波数毎にその波動を計算する。アンテナからプラズマを見た場合、比較的薄い密度のプラズマ端に右回り速波遮断(R-カットオフ)領域が存在する。この R-カットオフのプラズマ密度は、 $k_{||}^2 \approx \omega^2 \omega_{pi}^2 / c^2 / \omega_{ci} (\omega + \omega_{ci})$ の関係で決まる。ここで、 ω 、 ω_{pi} 、 ω_{ci} および c は、それぞれ用いた高周波電力の周波数、イオンプラズマ周波数、イオンサイクロトロン周波数と光速である。上式より $k_{||}$ が大きい程、R-カットオフのプラズマ密度が大きくなる。

このアンテナの $k_{||}$ に対する加熱特性を調べる実験が行われた。図 3. 3. 5-2 に示す様に、高周波電力を変調周波数(ω_{mod})で変調(δP_{RF})し、それに呼応するプラズマ蓄積エネルギー(W_p)の変動振幅(δW_p)およびその間の位相差(θ)とから、以下の計算式を用いて、加熱効率 η が算定出来る。

$$\eta = \omega_{mod} \left\{ 1 + \frac{1}{(\omega_{mod} \tau_E)^2} \right\}^{1/2} \frac{\delta W_p}{\delta P_{RF}}, \tau_E = \frac{\tan \delta}{\omega_{mod}}$$

上式において、エネルギー閉込め時間(τ_E)も同時に測定出来る。一連の実験において、アンテナ位相を(0, 0)、(0, $\pi/2$)、(0, π)および(0, $3\pi/2$)の4種類のケースにおいて、加熱効率を測定した(図 3. 3. 5-3)。(0, 0)の設定では、アンテナ間の位相が同相であるので、磁力線方向に波長の長い即ち $k_{||}$ の小さな速波が、一方(0, π)では $k_{||}$ の大きな速波が励起される。

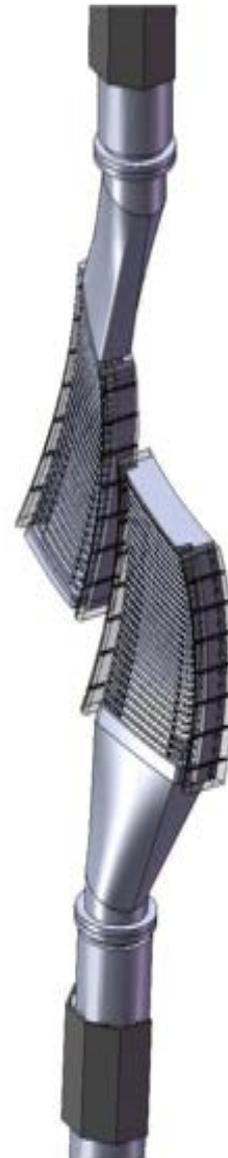


図 3. 3. 5-1 HAS アンテナ

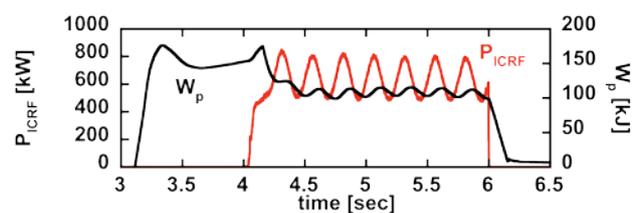


図 3. 3. 5-2 高周波電力変調を用いた加熱効率測定

また $(0, \pi/2)$ と $(0, 3\pi/2)$ では、その中間の k_{\parallel} であり、磁力線方向に方向性を持った速波が励起されている。図 3.3.5-3 に示す様に、 $(0, \pi)$ において、他の $(0, 0)$ 、 $(0, \pi/2)$ および $(0, 3\pi/2)$ に比べて、加熱効率が高いことが分かる。このことは前述した様に、 $(0, \pi)$ で励起される大きな k_{\parallel} の速波では、R カットオフ密度がプラズマの内側に移動するので、プラズマ内部の加熱が支配的になるからであると解釈出来る。一方他の $(0, 0)$ 、 $(0, \pi/2)$ および $(0, 3\pi/2)$ では、小さな k_{\parallel} の速波であるために、プラズマ端での伝播が可能であり、有効な加熱になり得ないと推測出来る。一方アンテナの結合も大電力高周波加熱の観点から重要である。R カットオフよりも密度の薄い領域では、アンテナから放射された高周波電力は、伝播不能である。簡単な計算から k_{\parallel} の大きな速波においては、磁力線に垂直方向の波数(k_{\perp})は大きな純虚数となり、アンテナから R カットオフまでに指数関数的に減衰する。この現象は、プラズマ加熱時に算定されるプラズマ負荷抵抗(R_p)の大小という形で観測される。

$(0, \pi)$ において、 R_p は小さく、アンテナ位置を最外殻磁気面に近づける必要がある。

3.2.3 の高温定常プラズマ保持のセクションでも述べた様に、有効な加熱を実施するために、従来のポロイダルアレイアンテナよりも最外殻磁気面に近づけた位置での長時間加熱が実施されたが、アンテナサイドリミターやファラデーシールド等の過加熱は観測されていない。

加熱効率のプラズマ特性の差異を図 3.3.5-4 に示す。 $(0, \pi)$ と $(0, 0)$ 位相で生成維持されたプラズマのパラメータの時間発展の図であり、アンテナから入射された高周波電力は両方とも 0.8MW 程度である。 $(0, \pi)$ においては、 $n_e \sim 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $W_p \sim 150 \text{ kJ}$ 、

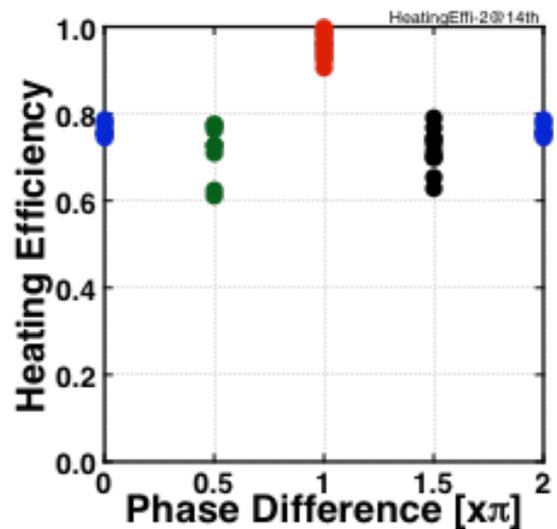


図 3.3.5-3 加熱効率の位相差依存性

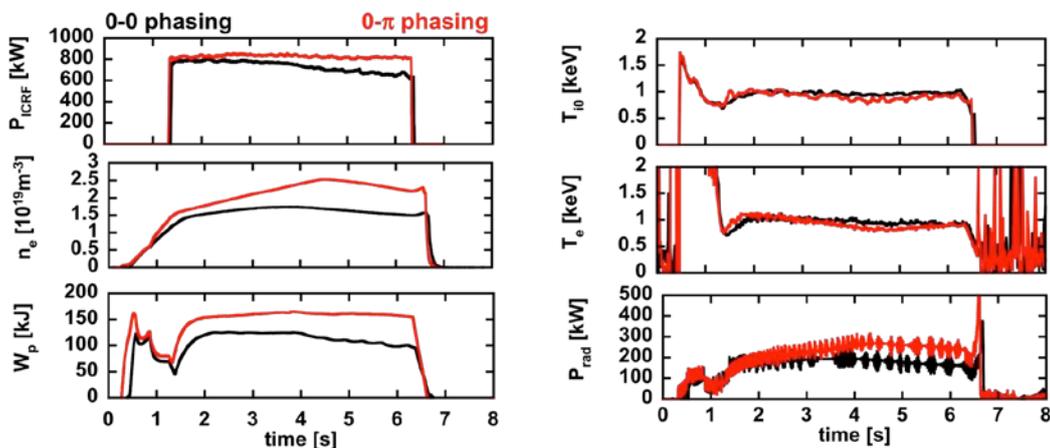


図 3.3.5-4 $(0, \pi)$ と $(0, 0)$ のプラズマパラメータの比較

$T_e \sim T_i \sim 1\text{keV}$ が5秒維持されている。一方(0, 0)では、 $n_e \sim 1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $W_p \sim 100\text{kJ}$ 、 $T_e \sim T_i \sim 1\text{keV}$ に留まっている。

今後の実験の進展として、ICRF 電流駆動の実験を実施することも提案される。しかしながら(0, 0)や(0, π)と比較して、(0, $\pi/2$)と(0, $3\pi/2$)ではアンテナ間の結合が大きいので、円滑な実験が出来難い懸念がある。即ち一方のアンテナの整合調整を行うと、アンテナ間の位相が変わったり、あるいは他方のアンテナの整合が劣化したりすることが起こる。

第15サイクルに、HAS アレイアンテナに追加して、これまでに用いられているポロイダルアレイアンテナ (PA antenna) を一対設置した(図 3.3.5-4)。合計2対、4本のアンテナでプラズマ生成維持実験を実施した。



図 3.3.5-4
ポロイダルアレイアンテナ

高周波加熱電力で生成維持したプラズマの蓄積エネルギー(W_p)は、ISS04 の閉じ込め則、 $\tau_E \propto n_e^{0.54} P^{-0.61}$ と仮定すれば、 $W_p/P_{RF}^{0.39} \propto n_e^{0.54}$ となる。電子密度、 $n_e = 0.6 \sim 3.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の広い範囲に亘って、縦軸に $W_p/P_{RF}^{0.39}$ 、横軸に電子密度 n_e としてプロットした(図 3.3.5-5)。図から分かる様に、プロット点の上部の包絡線は、 $n_e^{0.54}$ を示しているが、電子密度の小さな領域 $n_e = 0.6 \sim 1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ や大きな領域 $n_e > 2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において、その包絡線を下回る実験点が多数点在している。加熱効率の高い適切な水素イオン比 $H/(H+He)$ 比で、イオンサイクロトロン加熱が実施されていないのがその原因である推察される。ここに高周波加熱効率 η を導入する。3.2.3 の高温定常プラズマ保持のセクションにおいて、高電子密度達成のためには、高い高周波加熱効率 η が重要であると指摘している。一方 ISS04 のエネルギー閉じ込め時間の入射加熱項にも上記の高周波加熱効率 η を導入すると、

$\eta_{\text{a.u.}} \propto W_p^{2.56} P_{RF}^{-1} n_e^{-1.385}$ となる。図 3.3.5-5 の実験点から $\eta_{\text{a.u.}}$ を算出し、それぞれの $H/(H+He)$ 比に対してプロットした(図 3.3.5-6)。総てのデータ点ではないが、

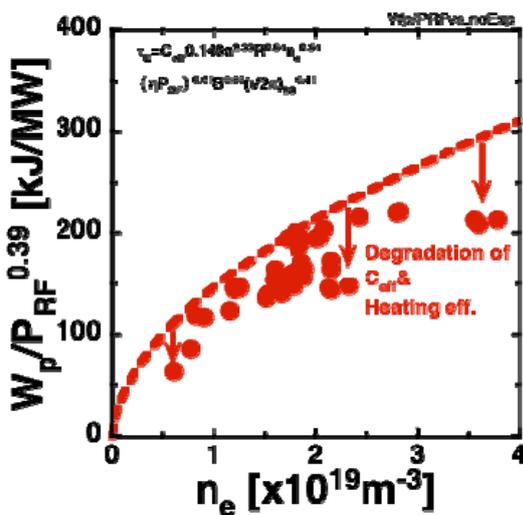


図 3.3.5-5 $W_p/P_{RF}^{0.39}$ vs. n_e の図

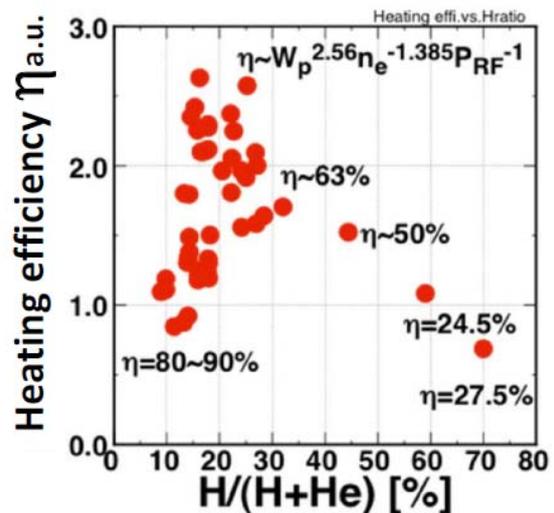


図 3.3.5-6 $\eta_{\text{a.u.}}$ vs. $H/(H+He)$ 比の図

H/(H+He)~10%では、高周波加熱効率 $\eta=80\sim90\%$ であり、H/(H+He)の増加とともに減少し、H/(H+He)=60~70%では $\eta\sim25\%$ である。高周波加熱効率 η の計測は、前述の高周波電力の変調や高周波電力遮断直後のプラズマ蓄積エネルギーの減衰(Break-in slope法)から算定されている。H/(H+He)=30~70%においては、高周波加熱効率 η の計測値とISS04のエネルギー閉じ込め時間を基にしたものとは定性的に一致している。しかしながらH/(H+He)=10~20%においては、計測されている加熱効率 η は減少しているにも拘らず、ISS04のエネルギー閉じ込め時間を基にした加熱効率 η は増大しており、大きな矛盾がある。

ここで、ISS04の閉じ込め則に補正係数、 C_{eff} を導入する。従って $\tau_E \propto C_{\text{eff}} n_e^{0.54} P^{-0.61}$ である。 C_{eff} はイオンサイクロトロン少数イオン加熱において、水素少数イオン比によって、閉じ込め性能が異なるという指標である。物理的には、水素少数イオン比の増大とともに、高エネルギー少数イオンの実効温度(T_{eff})が下がり、高エネルギーイオンからバルクの電子とイオンへの加熱分配比率が変化することにより、エネルギー閉じ込め時間に差異が生じるという仮定である。即ち実効温度(T_{eff})が下がれば、バルクイオンへのエネルギー流は増加することになる。以上のような仮定に基づくと、 $C_{\text{eff}} \eta^{0.39} \propto W_p n_e^{0.54} P_{\text{RF}}^{-0.39}$ であるので、再び図3.3.5-7にH/(H+He)比に対してプロットする。

図3.3.5-7に示す様に、 $C_{\text{eff}} \eta^{0.39}$ は、H/(H+He)=10~20%において増加している。図3.3.5-7においては、 $n_e=0.6\sim3.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の実験データであり、実験点はバラついている。

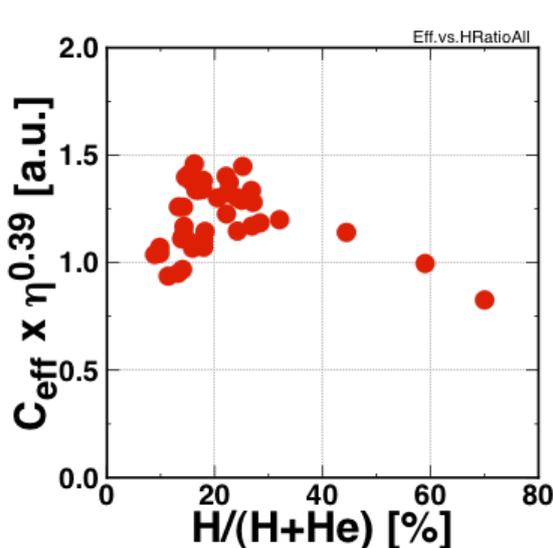


図 3.3.5-7 $C_{\text{eff}} \times \eta^{0.39}$ vs. H/(H+He)

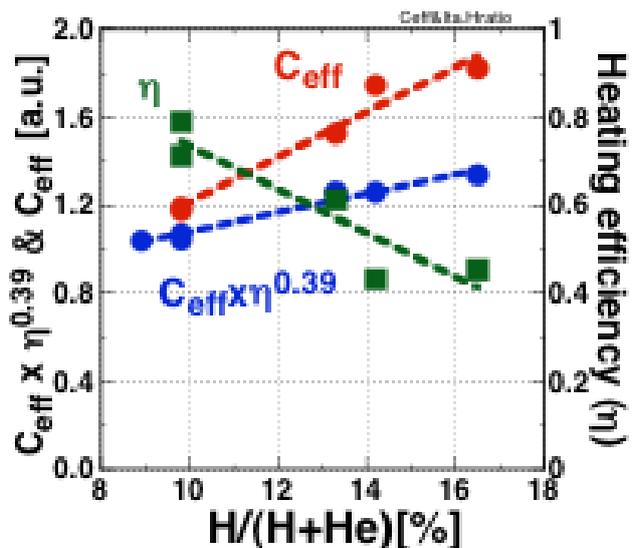


図 3.3.5-8 C_{eff}, η vs. H/(H+He)

図 3.3.5-8 は、 $n_e=2.0\sim 3.6\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ の範囲で整理したものである。この一連の実験では、プラズマ蓄積エネルギーの減衰 (Break-in slope 法) から、加熱効率が算定されている。 $H/(H+He)=9\sim 16.5\%$ の間で、 $C_{\text{eff}}\chi\eta^{0.39}$ は 1.03 から 1.35 へと増大している。一方加熱効率 η は、75%から 45%へと減少している。したがって C_{eff} は 1.2 から 1.8 へ 50%増加している。

以上のように、 $H/(H+He)$ 比が低い程加熱効率は向上するが、エネルギー閉じ込め時間およびプラズマ蓄積エネルギーの観点からは適切ではない。前述したようにプラズマ中の水素イオンは真空壁からの水素リサイクリングで決まる。通常はヘリウムガスパフにより高い電子密度になると $H/(H+He)$ 比は減少する。3.2.3 高温定常プラズマ保持のセクションで記述した様に、高電子密度プラズマの長時間保持において、プラズマ蓄積エネルギーを大きく保持するためには、水素イオンの供給が不可欠である。以下に示す様に 3 種類の方法を試みた。その 3 種類は、1) 水素とヘリウムの混合ガス入射、図 3.3.5-9、2) 連続水素ペレット入射、図 3.3.5-10、3) 超音速水素ガス入射法、図 3.3.5-11 である。

図 3.3.5-9 は、10%水素とヘリウムの混合ガス入射により $n_e=2.0\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ 、 $W_p\sim 200\text{kJ}$ 、 $T_e\sim 2\text{keV}$ 、 $T_i\sim 1.5\text{keV}$ のプラズマが、 $P_{\text{ICH}}\sim 1.5\text{MW}$ と $P_{\text{ECH}}\sim 0.35\text{MW}$ で約 10 秒間維持出来ている。この時 $H/(H+He)\sim 18\%$ であり、プラズマ蓄積エネルギーを最大にする適切な少数イオン比に近い。ヘリウムガス入射だけの場合には、 $H/(H+He)\sim 10\%$ となり、同じ電子密度を達成しても W_p が減少する。ヘリウムガス入射だけの場合には、電子密度の増加とともに $H/(H+He)$ 比が減少して行くが、電子密度の広い範囲に亘って

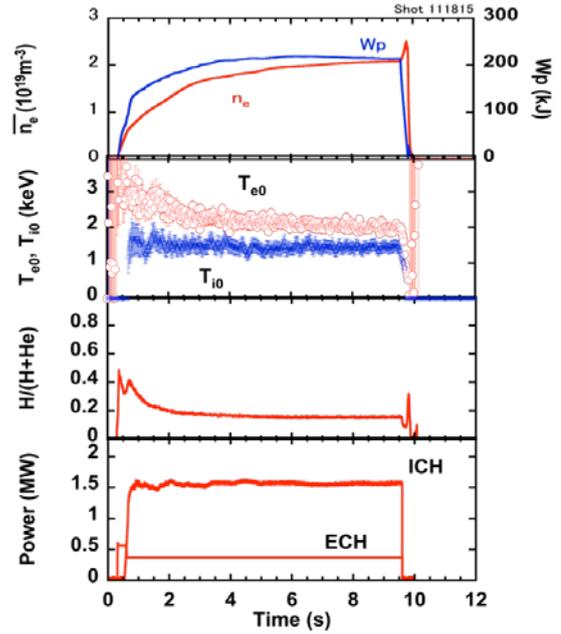


図 3.3.5-9 10%水素混合ヘリウムパフでのプラズマ生成のプラズマパラメータ

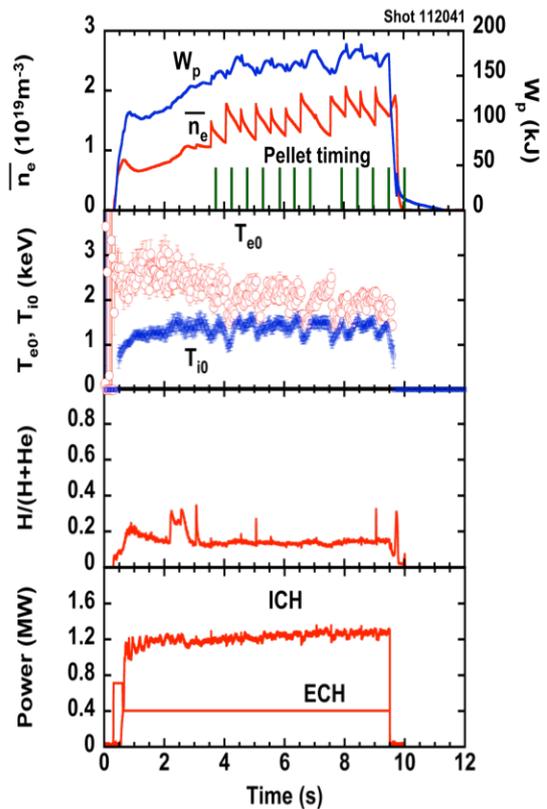


図 3.3.5-10 連続水素ペレット入射でのプラズマ生成のプラズマパラメータ

H/(H+He)~20%を保持出来る適切な水素混合率を実験的に確認するのが次サイクルの重要な研究テーマの一つである。図 3.3.5-10 は、連続水素ペレット入射により、 $n_e=1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $W_p \sim 175 \text{kJ}$ 、 $T_e \sim 2 \text{keV}$ 、 $T_i \sim 1.3 \text{keV}$ のプラズマが、 $P_{\text{ICH}} \sim 1.2 \text{MW}$ と $P_{\text{ECH}} \sim 0.4 \text{MW}$ で約 10 秒間維持出来ている。この時の平均的な H/(H+He) は 15% である。これまでの入射実験において、最小ペレット (10^{20} 個、 0.2Pam^3) であれば、高周波生成維持されたプラズマを崩壊させる事無く、入射できることが確認されている。しかしながら、最初の打ち出しペレットはペレットサイズが大きく、プラズマ崩壊に至る。そのため、最初のペレット入射時には、ゲート弁を閉じて入射し、数発目以降のペレットを入射した。図 3.3.5-11 は、超音速水素ガスパフ連続入射により、 $n_e=1.5 \sim 2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $W_p \sim 150 \sim 175 \text{kJ}$ 、 $T_e \sim 1.3 \text{keV}$ 、 $T_i \sim 1.2 \text{keV}$ のプラズマが、 $P_{\text{ICH}} \sim 1.2 \text{MW}$ と $P_{\text{ECH}} \sim 0.1 \text{MW}$ で約 10 秒間維持出来ている。このプラズマでは、 $3 \text{Hz}/1 \text{ms}$ (0.5Pam^3) で入射している。約 10 秒のプラズマに 7~8 秒間、 $1 \sim 5 \text{Hz}/1 \text{ms}$ で入射したが、 5Hz の水素入射においては、密度が上昇しプラズマ崩壊した。入射開始、入射中断、入射再開が容易であることが、連続水素ペレットよりも有利である。

ISS04 閉じ込め則の係数 C_{eff} が、H/(H+He) 比の 10% から 20% の範囲で、それに比例して増加することに関して定性的に説明する。少数イオン ICRF 加熱においては、少数イオンがそのイオンサイクロトロン共鳴磁場近傍で磁力線に垂直な方向に加速される。そのエネルギーはマクスウェル分布し、実効イオン温度 T_{eff} となる。高周波加熱電力と高エネルギーイオンの緩和過程である電子との衝突による減衰時間との積が、高エネルギーイオンの総エネルギーである。したがってこの総エネルギーを少数イオン密度で割算すれば、この T_{eff} が求められる。H/(H+He) 比が小さい程 T_{eff} が大きい。高エネルギーイオンからバルクの電子あるいはイオンへのエネルギー分配は、 T_{eff} と電子温度の比で決まる。 T_{eff} が大きい程、電子へのエネルギー流が増える。言い換えれば H/(H+He) 比が小さい程電子加熱となり、H/(H+He) 比が大きい程イオン加熱となる。係数 C_{eff} の大小は、電子加熱かイオン加熱

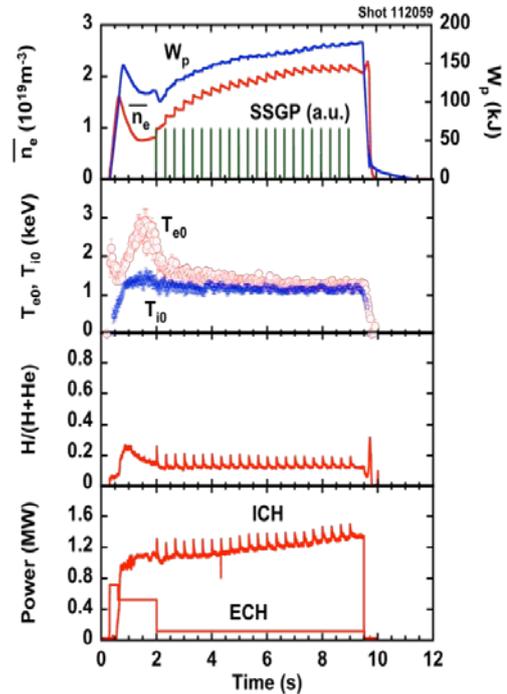


図 3.3.5-11 超音速 H ガスパフ入射でのプラズマ生成のプラズマパラメータ

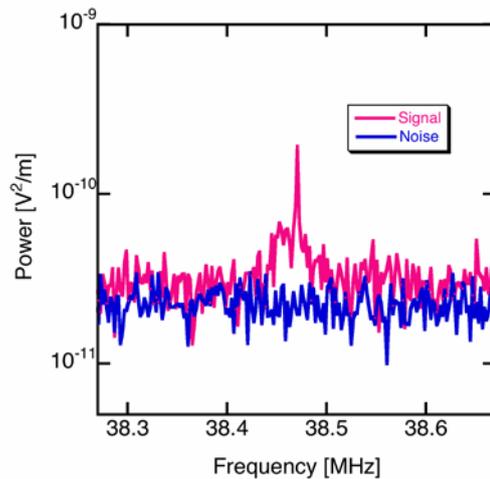


図 3.3.5-12 マイクロ波反射計で測定された高周波電磁場によって励起された電子密度揺動のスペクトラム

かで変ることを示唆している。ここで注意すべき事は、あくまでも少数イオン ICRF 加熱に限定している。H/(H+He) 比がさらに大きくなると、モード変換加熱へと加熱モードが移行して、イオンバーシュティン波から純粋な電子加熱となるが、その加熱領域はここでの議論の対象ではない。

東京大学(高瀬・江尻研究室)との共同研究で、マイクロ波反射計を用いて高周波電磁場計測を実施した。電子の運動方程式と連続の式から高周波電磁場で励起される電子密度の揺動が以下の様に導出される。

$$\frac{\tilde{n}_e}{n_e} = \frac{1}{B_0} \left\{ -ik_{\parallel} E_{\parallel} \frac{\Omega_e}{\omega_{RF}^2} + \left(k_r - i \frac{1}{L_n} \right) \left(i \frac{E_r}{\Omega_e} + \frac{E_p}{\omega_{RF}} \right) \right\}$$

ここで、 B_0 、 k_{\parallel} 、 E_{\parallel} 、 Ω_e 、 ω_{RF} 、 k_r 、 L_n 、 E_r および E_p はそれぞれ、磁場強度、磁力線に平行な速波の波数、磁力線に平行な高周波電場、電子サイクロトロン周波数、速波の周波数、半径方向の速波の波数、電子密度勾配長、半径方向の高周波電場およびポロイダル方向の高周波電場である。このうち E_p で励起される電子密度の揺動が支配的である。高周波入射電力 1 MW (周波数 38.47 MHz) で生成維持された $n_e \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $W_p \sim 130 \text{ kJ}$ のプラズマの電子密度揺動のスペクトラムを図 3.3.5-12 に示す。ここで採用しているマイクロ波の周波数は 29 GHz であるので、 $n_e = 1.04 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の電子密度における高周波電磁場の計測である。図 3.3.5-13 に示すように、 $E_p \sim 3 \text{ kV/m}$ 程度である。この計算においては k_r に推測値を用いているが、異なった周波数のマイクロ波を用いて、2ヶ所の半径位置での同時測定を行えば、 k_r が確定出来る。また今後 TASK/WM コードから算定される高周波電磁場との比較が待たれる。

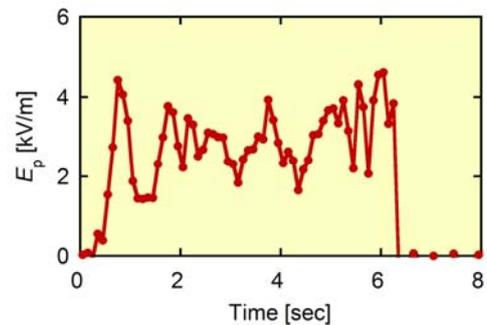


図 3.3.5-13 マイクロ波反射計で測定された高周波電磁場 E_p の時間発展。

電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) に関係した波動加熱物理テーマ実験の主な成果として以下の項目を挙げる。

高密度プラズマにおける ECRH 研究

- Slow X-B 法による超高密度コアプラズマの電子バーンシュタイン波加熱の実証
- 0-X-B 法による高密度プラズマの電子バーンシュタイン波加熱の実証
- 高次高調波による高 β プラズマへの ECRH 適用

ECRH を用いたプラズマ波動相互作用研究

- 大電力長パルス ECRH によるプラズマ制御実験の進展
 - ECCD 駆動電流 45kA を達成
 - 電子系内部輸送障壁の時間発展の観測
- 協同トムソン散乱計測によるプラズマ中の高周波波動伝播の検出

高密度プラズマにおける ECRH 研究

将来の核融合炉においてプラズマを高密度の状態から自己点火に至らしめるような運転を採用するには、高密度領域でのプラズマ加熱手法が確立されている必要がある。電子バーンシュタイン波、第二高調波周波数帯正常波、第三高調波周波数帯異常波は従来の基本共鳴周波数帯正常波、第二高調波周波数帯異常波よりも適用密度領域が高くこれらのモードによる加熱手法の確立は波動加熱物理研究の重要な課題である。

Slow X-B 法による超高密度コアプラズマの電子バーンシュタイン波加熱の実証

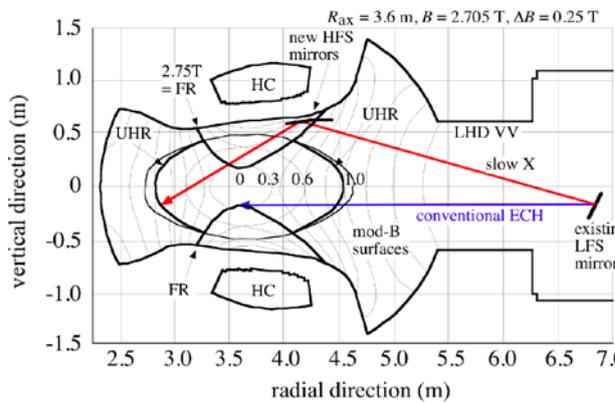


図 3.3.5-14 * 真空容器内壁ミラーを用いた強磁場側入射(赤線)の概念図

横長断面位置の真空容器天井に反射鏡を設置し、水平ポートアンテナからこの反射鏡を介して 77GHz ミリ波を基本電子サイクロトロン共鳴層より強磁場側から入射(図 3.3.5-14 参照)したところ、中心部の密度が $3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ と異常波モードの左手サイクロトロン遮断密度を越えている超高密度コアプラズマ(図 3.3.5-15 参照)の形成中に、ミリ波入射に伴う蓄積エネルギーの増加が観測された(図 3.3.5-16)。高域混成共鳴層で強磁場側を伝播する異常波(Slow X-mode)からの電子バーンシュタイン

波へのモード変換過程を介して励起された電子バーンシュタイン波による ECRH(Slow X-B 法による電子バーンシュタイン波加熱)の可能性が高い。

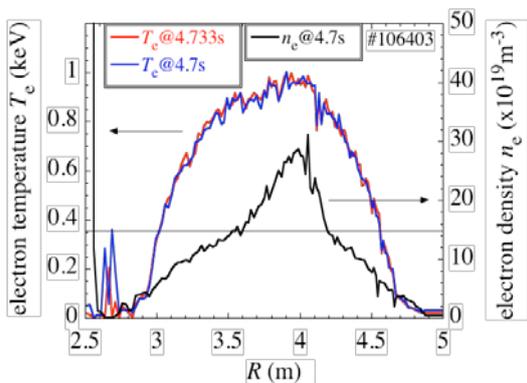


図 3.3.5-15 : 強磁場側入射を行った放電の密度と温度の分布。超高密度コアプラズマが形成されている。

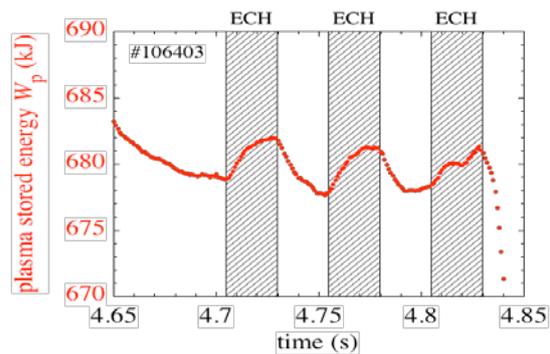


図 3.3.5-16 蓄積エネルギーが EC(R)H の時間変化。ミリ波入射のタイミングで蓄積エネルギーが増加している。

0-X-B 法による高密度プラズマの電子バーンシュタイン波加熱の実証

プラズマ遮断密度を越える密度のプラズマでは、弱磁場側からの正常波(入射により励起された電子バーンシュタイン波による ECRH が可能となる。そのためにはプラズマ遮断の位置と異常波モードの左手サイクロトロン遮断の位置が一致する「モード変換窓」に向かったの正確な入射が必要である。正常波(0モード)は図 3.3.5-17 に示すようにモード変換窓近傍で異常波(Xモード)に変換され、さらに高域混成共鳴(UHR)

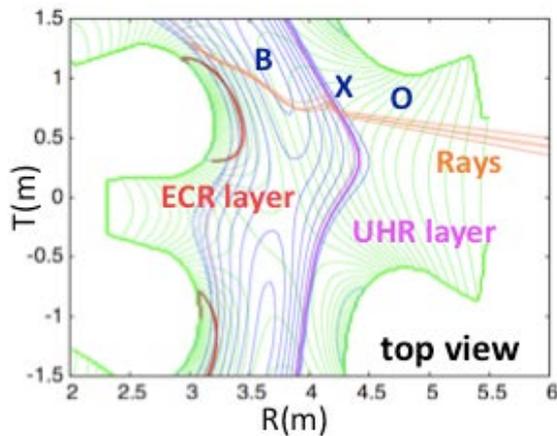


図 3.3.5-17 : 高密度プラズマでの正常斜め入射の場合の光線軌道。0-X-B モード変換により EBW となり、電子サイクロトロン共鳴吸収される。

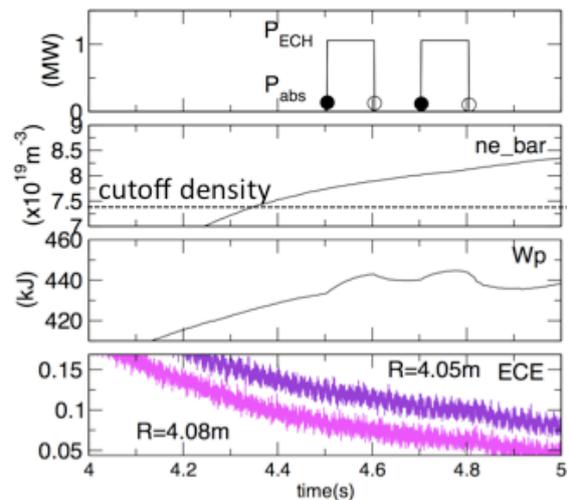


図 3.3.5-18 : ミリ波入射に伴い、蓄積エネルギー(W_p)と第二高調波帯の電子サイクロトロン放射(ECE)信号が増加した。

層で電子バーンシュタイン波(EBW:Bモード)に変換される(0-X-B法)。磁気軸 3.75m, 中心磁場強度 2.2T, 2.4T の磁場配位を選択し高密度プラズマへの弱磁場側からのミリ波入射実験を行った。図 3.3.5-18 に示すように、線平均密度がプラズマ遮断密度を越えた放電で、77GHz ミリ波入射に伴う蓄積エネルギーと第二高調波周波数帯の電子サイクロトロン放射信号の増加が観測された。電子バーンシュタイン波による加熱と考えられる。

蓄積エネルギー変化が観測された入射方向は、光線追跡計算により示された「モード変換窓」方向の近くではあるが、完全には一致していない。今後数値計算に使用する密度分布を実験で得られた分布と良く一致させるための改良を行って計算精度を上げ、より効果的な電子バーンシュタイン波加熱のための入射条件を検討する。また加熱の逆過程としての EBW 由来の放射電磁波計測を、ECRH 伝送系を用いて第二高調波帯で開始した。これを援用して第二高調波 EBW 加熱のための最適入射条件を調べていく予定である。

高次高調波による高 β プラズマへの ECRH 適用

プラズマ中を伝播する電磁波モードである正常波と異常波は、それぞれの遮断密度以上の領域では伝播できない。周波数を上げれば遮断密度も上がるので高次高調波を用いた ECRH は高密度プラズマ加熱の手法として有用である。

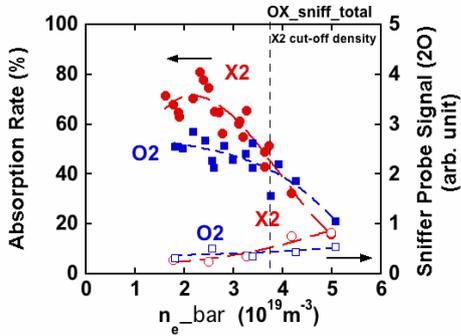


図 3.3.5-19 : 第二高調波加熱の加熱効率とアンテナ付近の漏洩波強度の密度依存性

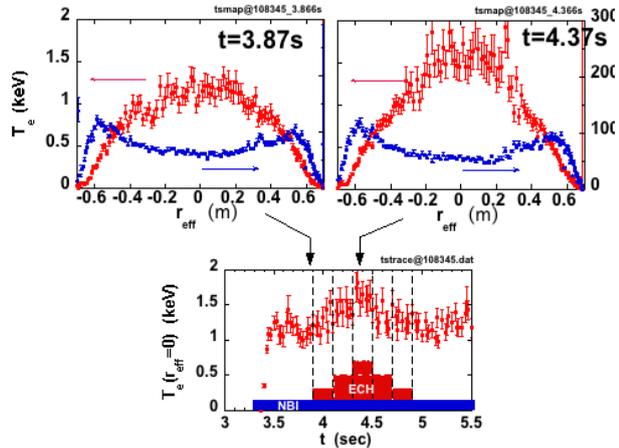


図 3.3.5-20 : 第三高調波加熱のために 77GHz ミリ波を約 1MW ずつ階段状に入射した放電での温度の時間変化

77GHz が第二高調波となる磁気軸 3.6m、中心磁場強度 1.43T の磁場配位において異常波と正常波を入射し、加熱効率の密度に対する依存性を取得した(図 3.3.5-19 参照)。密度が異常波の右手サイクロトロン遮断密度を越えると正常波入射の場合の加熱効率が異常波入射の場合の加熱効率を上回る。また入射アンテナの近くで計測した漏洩波強度は異常波入射に関しては密度が高くなる程増加し、一過吸収の割合が小さくなっていくことを示唆している。遮断密度以上でも異常波入射の場合の加熱効率がゼロにならないのは遮断で反射された波が真空容器壁に達して反射されプラズマに再入射することを繰り返す、その過程で正常波に偏波が変わって吸収されたと考えられる。

77GHz が第三高調波となる磁気軸 3.6m、中心磁場強度 0.95T の磁場配位において 77GHz 入射系統 3 系統を用いて異常波を階段状に入射した。最大の 2.9MW を入射した時間帯はミリ波入射前より約 0.5keV プラズマコア部での電子温度の上昇が観測された。(図 3.3.5-20 参照)

ECRH を用いたプラズマ波動相互作用研究

大電力長パルス ECRH によるプラズマ制御実験の進展

ECRH は反射鏡を用いた強収束準光学アンテナからのミリ波入射により高電力密度での局所的加熱及び電流駆動が可能である。77GHz ジャイロトロン管の導入により 1 系統あたり 0.75-1 MW 程度の電力で数秒にわたる ECRH が可能となり、長い時間スケールでのプラズマの変化を観測できるようになった。図 3.3.5-21 に 77GHz ジャイロ

トロンの発振パワーとパルス幅の積である入射電力量の発展を年度ごとに示す。1系統あたり 0.75MW で9秒間のパワー入射が可能になっている。また、長パルス運転中にジャイロトロンの磁場コイル電流を挿引することで発振パワーを時間変化させる運転モードが適用可能となった。電子系輸送障壁形成のパワー閾値を調べる実験に適用されている。

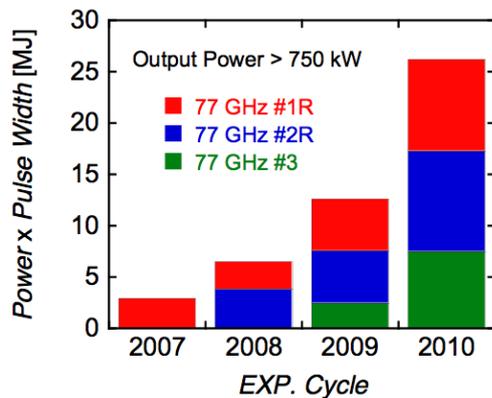


図 3.3.5-21 : 入射電力量の発展。長パルス入射が可能になり増大した。

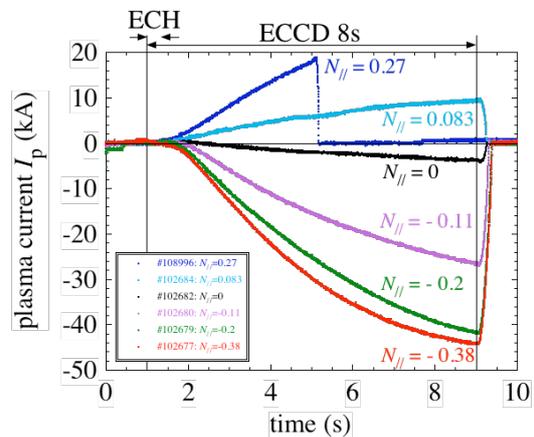


図 3.3.5-22 : 電子サイクロトロン電流駆動時のプラズマ電流の時間変化

ECCD による駆動電流 45kA を達成

大電力長パルス入射が可能となったため、プラズマ電流の変化による電流駆動効果が明らかに確認できるようになった。図 3.3.5.-22 に水平ポートからミリ波を斜め入射した場合のプラズマ電流の時間変化を示す。加熱源はミリ波のみである。屈折率の磁場に平行な成分 N_{\parallel} の最適化により 0.75MW/8 秒間入射の放電で最大 45kA のプラズマ電流の駆動が確認された。また N_{\parallel} の符号を変えることで駆動電流の方向も逆転することが確認された。明らかな電流駆動効果が確認されたことで、MHD 制御、電子系内部輸送障壁形成時のプラズマコア部の磁気シア制御に用いられるようになった。

電子系内部輸送障壁の時間発展の観測

数秒にわたる大電力ミリ波入射が可能になり、ECRH のプラズマコア部への印加により形成される電子系内部熱輸送障壁 (e-ITB) の時間発展を調べることができるようになった。接線中性粒子入射 (NBI) を Co ドミナントから Ctr. ドミナントに切り替えると電子温度分布は $0.1 < r_{\text{eff}} (\text{m}) < 0.3$ の領域で局所的に平坦化する (図 3.3.5-23)。このときプラズマコア部の磁気シアは減少している (図 3.3.5-24)。

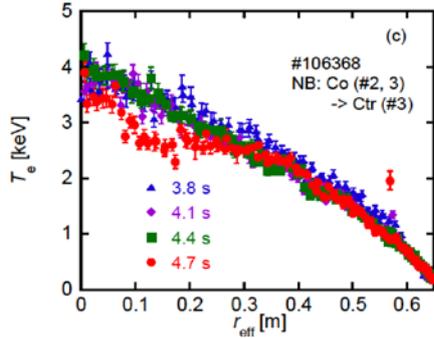


図 3.3.5-23 : NB Co->Ctr.切り替え前後の電子温度分布変化

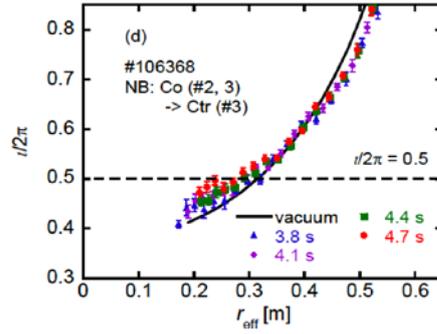


図 3.3.5-24 NB Co->Ctr.切り替え前後の回転変換分布変化

別の放電では、電子温度分布の局所的平坦化領域が現れた時間帯(図 3.3.5-25)に重イオンビームプローブ(HIBP)計測によりプラズマの電位計測を行った。温度分布の平坦化領域では電位分布も平坦であり、電位分布から実験的に求めた電場分布と理論計算により得られた電場分布は定性的に良く一致した(図 3.3.5-26)。

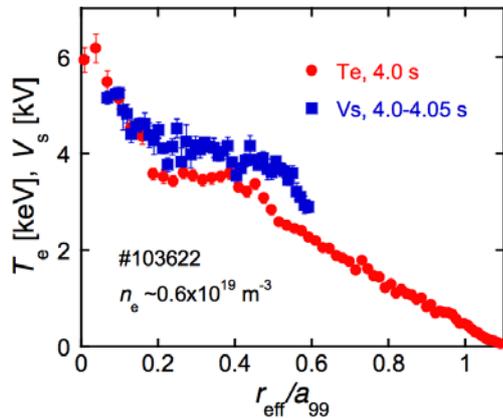


図 3.3.5-25 : 局所的平坦化が観測された電子温度分布とその時間帯の電位分布

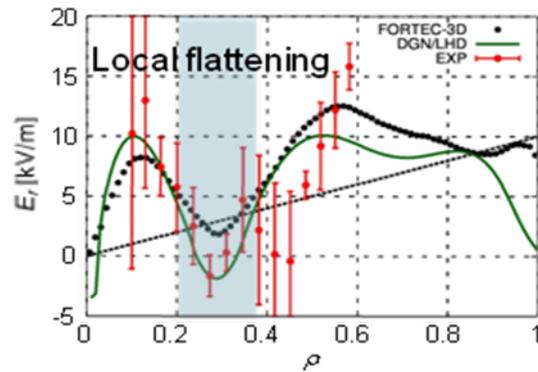


図 3.3.5-26 : 実験で得られた電場分布と理論計算で求めた電場分布との比較

高周波波動とプラズマの相互作用の物理

協同トムソン散乱計測による波動検出

図 3.3.5-27 に示すように協同トムソン散乱計測により、NB14 号機入射中に 0.5GHz 付近の帯域の波動が検出された。励起された周波数は低域混成波周波数よりわずかに低く、イオンサイクロトロン共鳴と低域混成共鳴のダブルレゾナンス効果で励起されたと考えられる。

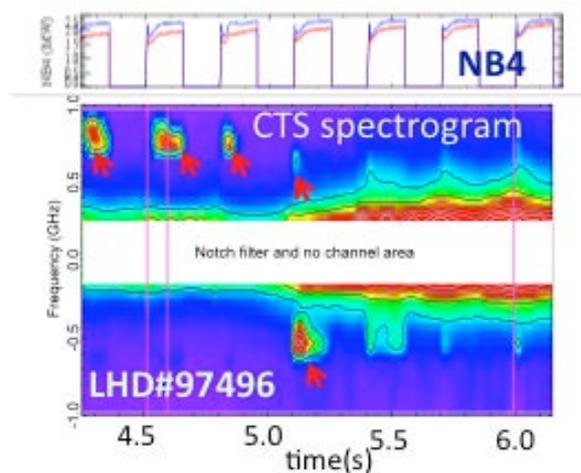


図: 3.3.5-27 : NB14 号機 blip 入射時の CTS スペクトルの時間変化

3. 3. 6 LHD を用いた原子・分子過程研究

LHD プラズマと計測装置を利用して、プラズマ物理や天体物理、原子分子物理学といった基礎研究や、極端紫外光源開発などの応用研究など、さまざまな分野の研究発展への貢献を目指した共同研究課題を中心にした、物理研究テーマグループが 2010 年度に設置された。LHD 実験の特長として、安定性・定常性・再現性に極めて優れたプラズマを生成でき、充実した計測器によってプラズマの基礎パラメータの空間分布を精度よく計測できること、1 eV 以下のダイバータプラズマから 10keV のコアプラズマまで、広い電子温度領域が得られ、分子から多価イオンまで、多種多様の発光線が観測できること、プラズマ中心の電子密度として、 10^{18}m^{-3} 以下の低電子密度放電から、 10^{21}m^{-3} を超えるような高密度放電まで可能なこと、不純物許容量が高く、高 Z 元素不純物入射も可能なことを利用した研究を行った。特に、分光計測装置を活用し、高 Z 元素、多価イオンの波長など原子データの測定による原子構造における相対論効果や量子電磁気学効果の検証、分光モデルの検証、プラズマ中の衝突素過程の断面積など原子データの検証といった基礎研究、新しいプラズマ診断法の検証、分光データや検証した分光モデルを必要とする他の研究分野への展開、高分解高速分光計測によるプラズマダイナミクス研究への応用などを目指して、様々な研究課題を推進した。

このテーマグループの特徴として、共同研究課題が主体となっていること、プラズマ・核融合研究以外の分野の研究と直結している課題も実施したことが挙げられる。2010 年度 (14 サイクル) に実施した 13 課題のうち 11 課題、2011 年度 (15 サイクル) 14 課題のうち 9 課題が一般共同研究課題として提案された。この中には、原子物理学、天体物理学、光源開発を目的とした研究課題が含まれる。プラズマを光源として異なる分野の基礎研究を実施し、共同利用研究所としての役割を十分に果たしている。

2010~2011 年度の主な成果をまとめると、以下のようになる。

(1) 高 Z 元素不純物を TESPEL やペレットでプラズマへ入射し、プラズマパラメータをコントロールすることにより、安定なプラズマを形成することができた。このプラズマで高 Z 元素の分光計測を実施し、以下の結果を得た。

(1a) タングステンイオンの空間分布の計測を行い、 $\text{W}^{41+}\sim\text{W}^{44+}$ のイオンが中心に向かって多く分布している構造を得た。

(1b) 電子温度の変化に伴う極端紫外 (EUV) スペクトルでのタングステンの UTA (Unresolved Transition Array) 形状の変化や、タングステンからの可視スペクトルなど、様々な分光データを計測し、イオン価数分布の変化など分光モデルと原子データの検証に有用なデータや、タングステンイオン可視禁制線を計測した。

(1c) リソグラフィのための次世代の EUV 光源の候補となっている希土類元素の Nd (Z=60) と Gd (Z=64) について EUV スペクトルを計測し、UTA および高価数イオンスペクトル線を計測した。

(1d) 太陽表面の高温活動領域の指標となる Fe XVII スペクトル線 204.6 Å, 254.8

Åを実験室プラズマで初めて計測し、太陽分光計測と理論計算値で食い違っていた強度比問題の解決に向けたデータを取得できた。

(2) 多視線で高分解偏光分光計測を行い、水素、ヘリウム、水素分子の周辺プラズマでの分布を調べることができ、水素やヘリウムの輸送やリサイクリングの理解に向けた情報の取得法を確立した。

(3) 水素バルマーα線形状を高速で計測し、プラズマコア由来の水素と、周辺プラズマ由来の水素では挙動が異なり、プラズマ揺動によると考えられる変動のレスポンスにずれがあることを発見した。プラズマダイナミクスの理解につながる新しい手法を開発した。

(4) 水素分子と中性ヘリウムに対する新しい分光モデルを開発し、周辺プラズマでの水素分子振動温度や電子温度、電子密度などのプラズマパラメータの評価を可能にし、プラズマ分光診断のためのモデルを確立した。

(5) イオン温度やプラズマ回転計測に使われている荷電交換分光計測法で用いられている荷電交換断面積の精度の検証を行い、計測値と理論計算のずれを発見した。原子データの精度の再検討が必要であることが明らかになった。

これらの研究によって、プラズマ物理、核融合研究のみにとどまらず、原子物理学、天体物理学、光源開発など幅広い研究分野の発展につながると同時に、プラズマ計測の新しい方法、新しいモデルの検証など、ヘリカルプラズマを理解するためのプラズマ診断法の検証を行った。

特に、タングステン分光計測では、ITERや原型炉でダイバータのプラズマ対向材料候補であるタングステンのプラズマ中での挙動研究を行うために不可欠な分光データの取得ができた。このデータはタングステンの原子データや分光モデル検証に用いることができ、ヘリカル型核融合炉設計を進めている炉工学プロジェクトとも連携した研究を行うことができた。

また、この中の研究課題によって、京都大学の学部4年生3人、修士課程大学院生2人、博士課程大学院生1名の学位取得が行われ、学生の教育にも貢献した。

以下、主な研究課題の成果を示す。

1) タングステン研究

(a) タングステン空間分布計測

炭素ペレットの内部にタングステンを封入したものをプラズマに入射して、50-210 Å領域のEUV分光計測を多視線に対して行った。ペレット入射後、多数のタングステン発光輝線が観測された(図3.3.6-1)。

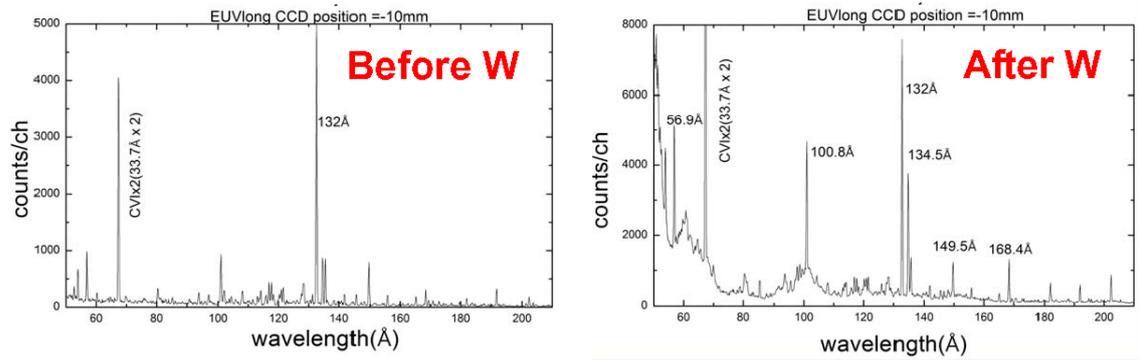


図 3.3.6-1 タングステンペレット入射前（左）と入射後（右）の EUV スペクトル。入射後にタン
グステンからの発光線が多数見られる。

61 Å 付近に見られる $W^{41+} \sim W^{44+}$ イオン発光線を用いて、これらのイオンの空間分布
を調べると、 C^{5+} イオンとは異なり、中心に集中している結果が得られた (図 3.3.6-2)。
電子温度分布も考慮してタングステンイオンの空間分布について解析を行なっている。
更に解析を進めることにより、タングステンイオン分布が明らかになり、高 Z 不
純物輸送過程研究のための重要な情報取得が期待できる。

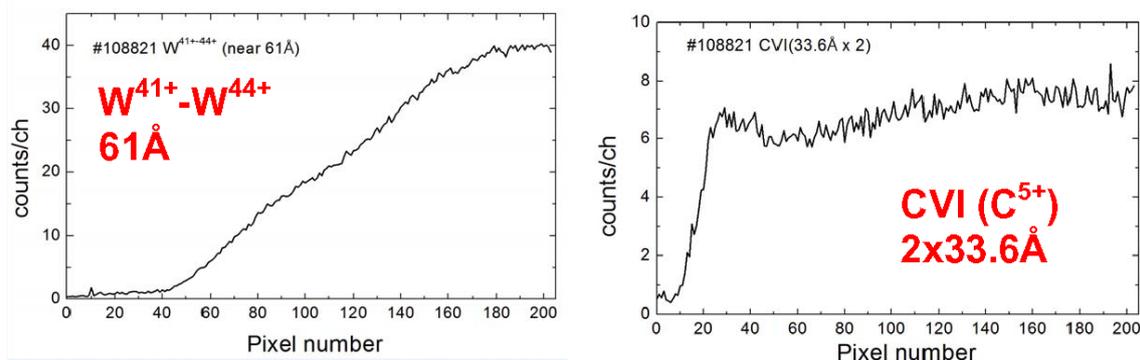


図 3.3.6-2 $W^{41+} \sim W^{44+}$ イオンからの 61 Å 発光線の空間分布 (左) と、 C^{5+} イオンの空間分布 (右)。
コアプラズマから均等に発光分布している C^{5+} とは異なり、タングステンイオンは中心からより
多く発光しており、中心集中している事を示している。

(b) タングステン分光データの蓄積

プラズマ中のタングステン輸送過程研究や放射損失量評価のためには、幅広い価数
に対するタングステンの分光データの取得及び、原子データ、原子モデルの検証が重
要である。特に低価数のタングステンイオンは原子データも分光データも過去にほと
んど報告がないため、これらイオンのデータを取得、蓄積すること自体にも意味があ
る。

LHD プラズマにタングステンを TESPEL や炭素ペレットに封入してプラズマに入射し、EUV スペクトル及び可視スペクトルを測定した。EUV スペクトルでは、プラズマの中心電子温度が 3 keV 以上の時、 W^{45+} イオンまで計測することが出来た（図 3.3.6-3）。5 nm を中心とする UTA のほか、プラズマ中心電子温度が 1 keV 以下のときに 17-18nm 近傍に低価数からの発光によると予想される擬似連続光も測定できた。これらのデータは今後解析を進め、分光モデルとの比較によりモデルや原子データの検証を行っていく。

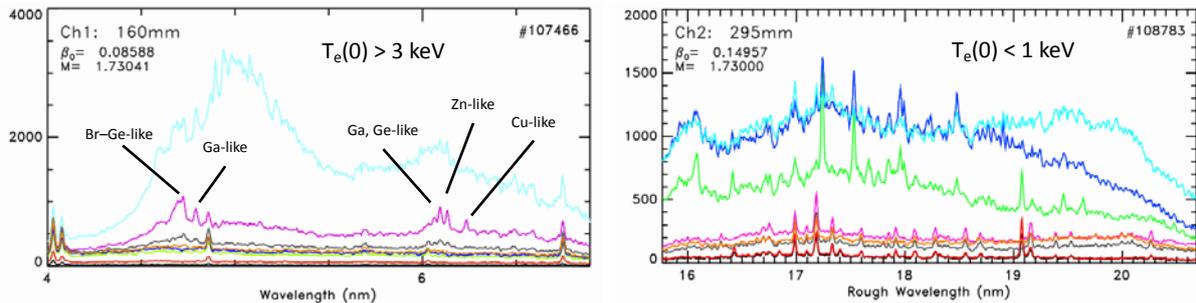


図 3.3.6-3 タングステン TESPEL 入射後に測定された EUV スペクトル。中心電子温度が 3 keV 以上のとき、 W^{45+} までの高価数イオンからの発光線が認められた（左）。中心電子温度が 1 keV 以下のときは、低価数イオンからの擬似連続光が見られた（右）。

(c) タングステン可視分光計測

高 Z 元素可視禁制線は、原子構造に見られる相対論効果や QED 効果の検証に用いることができ、特に Ti 様イオン可視禁制線はその効果が顕著に報告されている。LHD にタングステン封入炭素ペレットやタングステン TESPEL を入射し、可視分光計測を行い、多数のタングステン可視発光線を計測した。低価数イオンのデータのほか、高価数タングステンイオンからと予想される発光線を測定した（図 3.3.6-4）。同時計測した EUV スペクトルを調べると、ペレット入射後に $W^{21+} \sim W^{30+}$ イオンからと予想される発光線が観測されていることから、今回計測した 3,894 Å の可視発光線は、 W^{26+} イオンの可視禁制線である可能性が非常に高いことが分かった。この波長は、コンパクト電子ビームイオントラップ装置 (CoBIT) による計測、及び理論計算により予測されたもの (Ding et al., J. Phys. B, 44 (2011) 145004) と一致する。LHD で初めて高価数タングステンイオンからの可視禁制線を同定した。今後、他の可視発光線の同定など、タングステンイオンの波長データ表作成を進めていく。

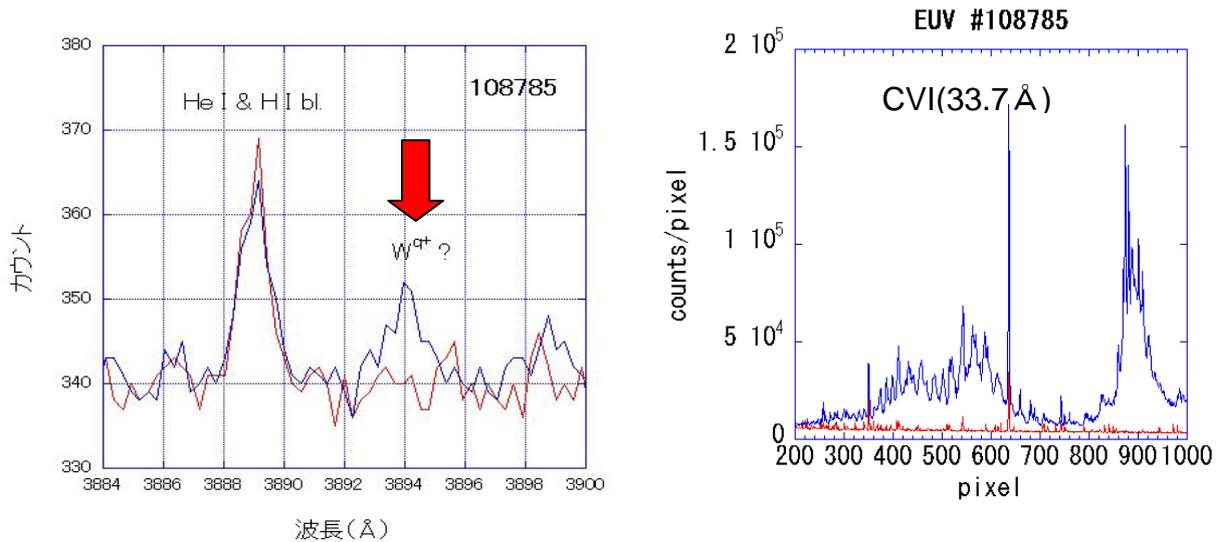


図 3.3.6-4 タングステンペレット入射前（赤線）と入射後（青線）の可視スペクトル（左）と EUV スペクトル（右）。

2) 希土類元素の分光計測

半導体基板製作のためのリソグラフィの光源は、年々短波長化が進み、現在スズ (Z=50) を用いた 13.5nm の発光線による光源の実用化が進められているが、更に短波長の 6.8nm の光源開発が最近注目されている。その発光源として、希土類元素イオンが有力候補になっている。スズの 13.5nm の発光線は、スズ多価イオンの 4d-4f 遷移により起こる UTA で、6.8nm も、Gd (Z=64) など希土類元素の多価イオンの 4d-4f 遷移発光線として期待されているが、分光データや原子構造などに関する研究がまだ進んでいない。一方、タングステン多価イオンの 5~6nm 付近の UTA も同様の 4d-4f 遷移によるため、タングステン多価イオンのスペクトルを理解するうえでも、希土類元素イオンのスペクトルは重要な位置を占め、Z=50 から 74 までの系統的な 4d-4f 遷移の性質の研究には欠かせない。

EUV 分光計測により、 $Gd^{33+} \sim Gd^{36+}$ イオンからの発光線を同定し (図 3.3.6-5, 表 3.3.6-1)、このうち 3 本はこれまでに報告のない新しく計測された発光線であることが分かった。また、電子温度の変化に伴う EUV スペクトル形状の変化が Gd, Nd (Z=60) とも得られ (図 3.3.6-6)、イオン価数分布が変化していることが期待でき、広い価数範囲のイオンの分光データが得られた。理論構造計算を行い、スペクトル形状に似た遷移確率分布が得られた (図 3.3.6-7)。今後理論による原子構造計算との比較を詳細に行い、原子構造やスペクトル形状の性質などを調べ、光源開発への基礎研究を進める。

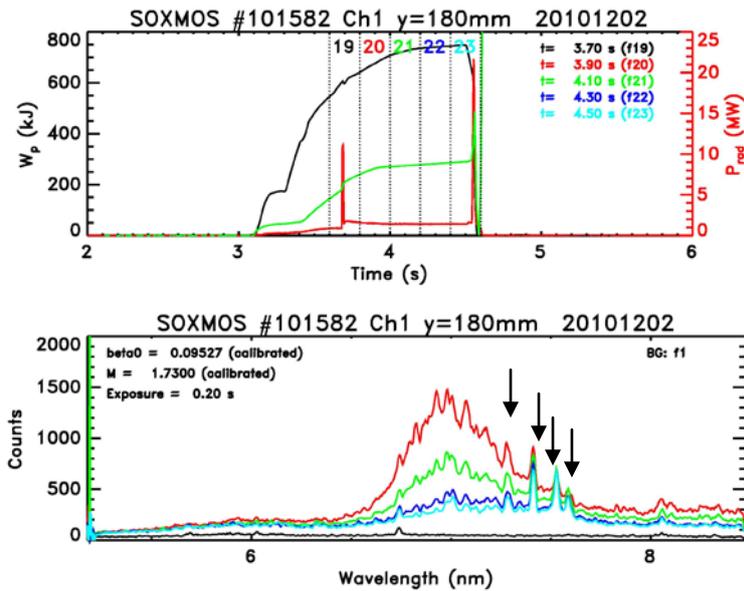


図 3.3.6-5 SOXMOS で計測した EUV スペクトルの時間変化(下)。黒線(3.7秒)は TESPEL 入射前、赤線(3.9秒)、緑線(4.1秒)、青線(4.3秒)、水色線(4.5秒)は Gd のスペクトルが見えている。4本の Gd 発光線を計測した(矢印)。上パネルは、蓄積エネルギー(黒線)、視線平均電子密度(緑線)、放射パワー(赤線)の時間変化を表す。

表 3.3.6-1 計測と原子構造計算による Gd イオン発光線の波長同定。

Newly Observed Lines and Calculated Lines of Gd Ions						
Ionic Charge	Wavelength (nm)			Values in the literature	Transition	
	Present Experiment	Hullac Calculation	GRASP Calculation		Upper State	Lower State
28+			6.834		$3d^{10}4s^24p-4p^44d- J=1$	$3d^{10}4s^24p-^24p4 J=0$
29+			6.875		$3d^{10}4s^24p-4p^34d- J=5/2$	$3d^{10}4s^24p-^24p^3 J=3/2$
30+			6.976		$3d^{10}4s^24p-4p^24d- J=3$	$3d^{10}4s^24p-^24p^2 J=2$
31+			7.097		$3d^{10}4s^24p-4p4d- J=1/2$	$3d^{10}4s^24p-^24p J=3/2$
31+			7.103		$3d^{10}4s^24p^24d- J=7/2$	$3d^{10}4s^24p-4p^2 J=5/2$
32+			7.168		$3d^{10}4s^24p-4d- J=1$	$3d^{10}4s^24p-^2 J=0$
33+	7.279	7.279	7.288		$3d^{10}4s^24d^3D_{3/2}$	$3d^{10}4s^24p^2P_{1/2}$
34+	7.406	7.406	7.411		$3d^{10}4s4d^3D_2$	$3d^{10}4s4p^3P_1$
35+	7.527	7.522	7.528	7.532	$3d^{10}4d^2D_{3/2}$	$3d^{10}4p^2P_{1/2}$
36+	7.586		7.586		$3d^94d^3F_4$	$3d^94p^3D_3$
37+			7.650		$3d-^23d^64d- J=1/2$	$3d-^23d^64p- J=3/2$

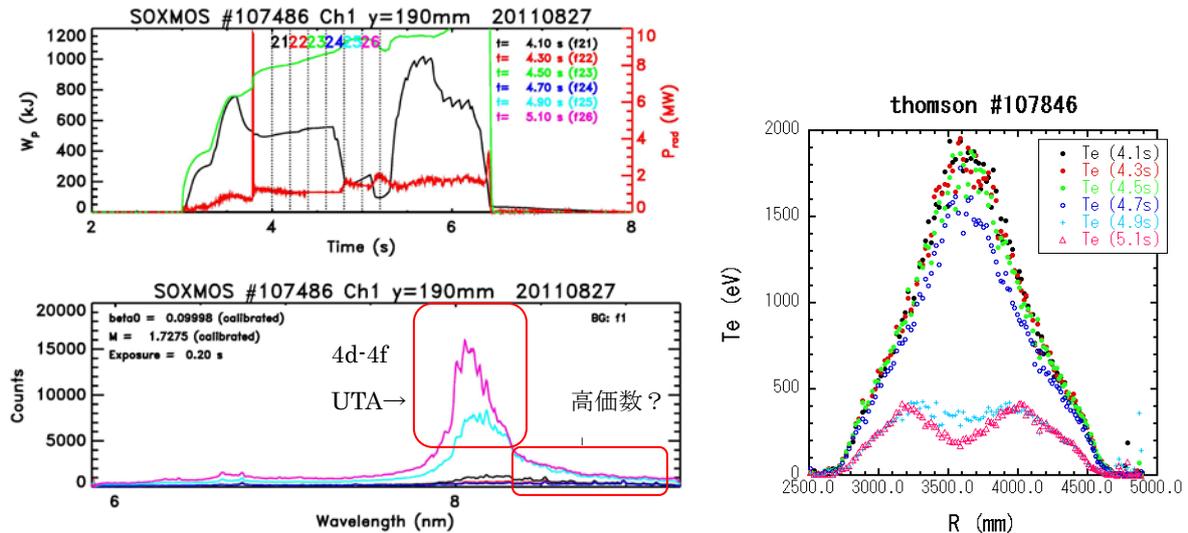


図 3.3.6-6 SOXMOS で計測した Nd の EUV スペクトル (左下) の 4 ~ 5.2 秒 ($\Delta t = 200\text{ms}$) の時間変化。左上パネルは、プラズマの蓄積エネルギー W_p (黒線)、視線平均電子密度 (緑線)、放射パワー (赤線) の時間変化を示す。右は電子温度分布の時間変化。電子温度が低い時 (4.9 秒、5.1 秒) に強い 4d-4f 遷移 UTA が測定された。

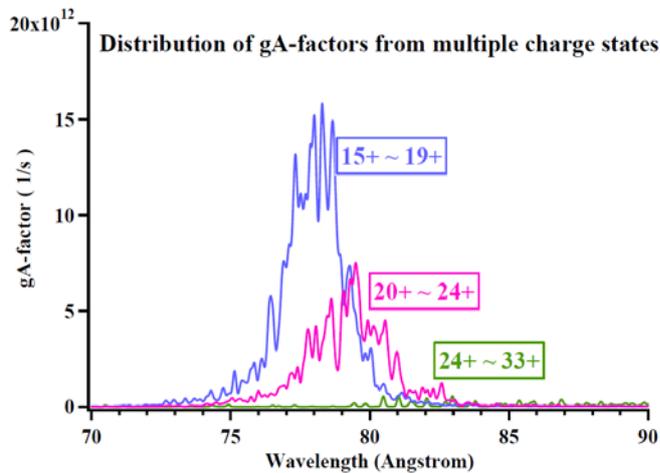


図 3.3.6-7 原子構造計算で得られた Nd イオンの放射遷移確率の分布。価数が比較的低いイオンからの 4d-4f 遷移による UTA (青線及び紫線) と、高価数イオンからの発光線 (緑線) が見られ、計測されたスペクトルに似た分布が得られた。

3) 太陽プラズマ研究のための鉄イオン発光線計測

太陽表面の高温活動領域中心部のプラズマ診断に用いるために、太陽観測衛星ひので搭載の極端紫外撮像分光装置 (EIS) で Ne 様鉄イオンの発光線 Fe XVII を計測したところ、Fe XVII 204.6 Å/254.8 Å 強度比が、原子物理学による理論計算値と大きく異なった結果が得られた。この 2 本の発光線は上準位が同じため、強度比は分岐比で決まり、理論原子物理の観点からは、測定との違いが説明できなかった。そのため、実験室プラズマで強度比の計測を行い、検証する必要があるが出てきた。この 2 本の発光線は弱く、電子ビームイオントラップ装置ではまだ測定できていない。

LHD プラズマに鉄 TESPEL を入射し、EUV 分光計測を行った。その際、分光器に Al

フィルターを導入して2次光をカットした。また NBI 入射パターンなどプラズマパラメータをコントロールし、中心電子温度 $\sim 600\text{eV}$ の安定したプラズマを実現し、Fe XVII 発光線の検出に成功した (図 3.3.6-8)。今後絶対感度補正を行い、正確な強度比を算出し、ひのでの計測データの検証を行う。

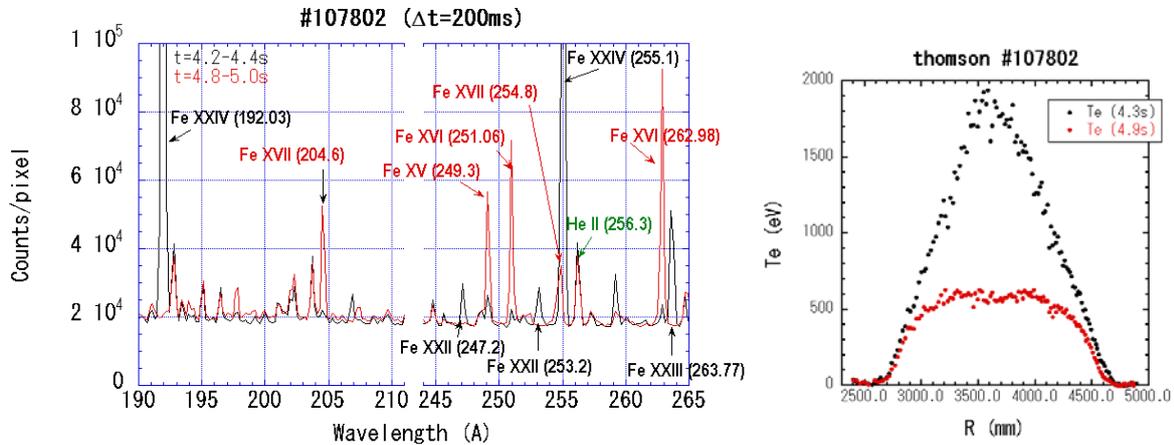


図 3.3.6-8 EUV 分光器で測定したスペクトル (左) と電子温度の空間分布 (右)。Fe XVII 204.6 Å と 254.8 Å 発光線が検出できた ($t=4.8-5.0\text{s}$)。そのときプラズマ中心の電子温度は約 600eV になっており、高価数の Fe XXIV 発光線 192.03 Å, 255.1 Å は見えていない。

4) 多視線高分解偏光分光による水素、ヘリウム発光線の計測

高分解偏光分光計測を多視線で行い、水素バルマー線、水素分子 Fulcher α 線、ヘリウム発光線を計測した (図 3.3.6-9)。スペクトル形状の解析を行ない、偏光を引き起こす磁場強度を評価することにより、発光場所とその強度の分布特定を行なった (図 3.3.6-10)。この診断方法を用いて、LHD プラズマにおける水素やヘリウムの輸送過程やリサイクリングの研究の進展に貢献できる。

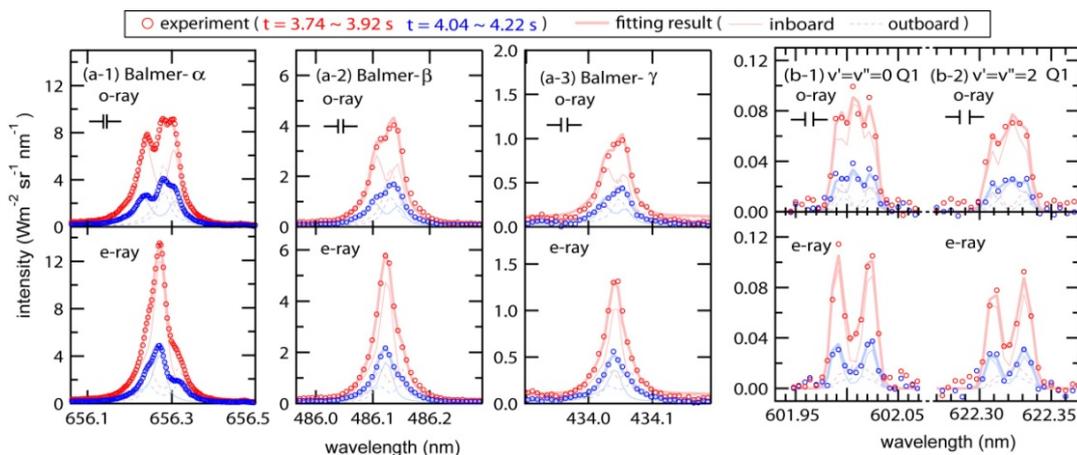


図 3.3.6-9 水素のバルマー線及び水素分子の Fulcher α 線の偏光分光により得られたスペクトル形状。丸印が計測、線はフィッティングを示す。

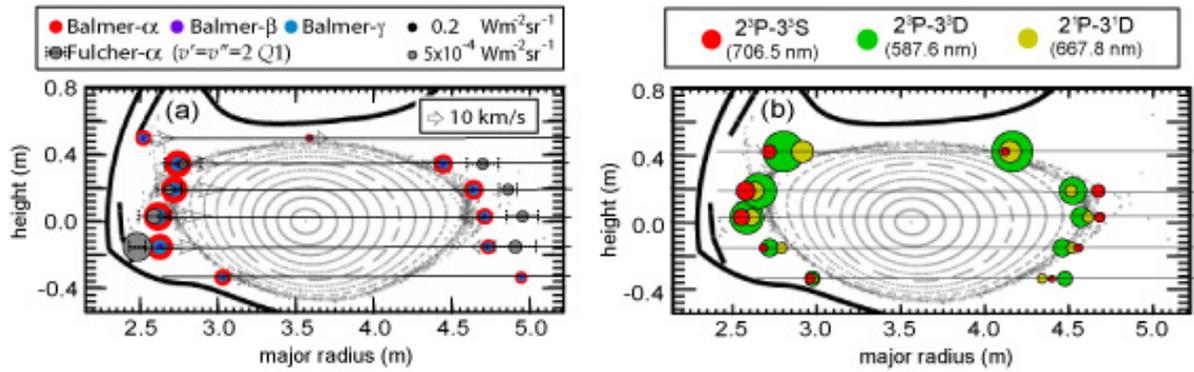


図 3.3.6-10 偏光分光計測により特定した発光場所とその強度の分布。左が水素原子及び水素分子、左がヘリウム原子を示す。

5) 水素バルマー α 線スペクトル形状の高速計測

水素バルマー線スペクトル形状の解析から、水素原子には、周辺プラズマの水素分子からの解離由来の冷たい水素原子と、プラズマ中心部のプロトンとの荷電交換により生成された熱い水素原子があることが分かっている。この性質を利用し、水素のリサイクリングや周辺部での原子分子素過程の解明を目指し、光電子増倍管リニアアレイによりバルマー α 線スペクトル形状の高速計測システムを開発した。水素ペレット入射実験 (図 3.3.6-11)、高ベータ放電、外寄せ磁場配位での放電 (図 3.3.6-12) での、各速度成分 (チャンネル) ごとの強度の時間変動を調べたところ、スペクトルの中心部 (冷たい水素) と裾部 (熱い水素) では変動の位相がずれていることが見つかった。プラズマ揺動への応答が速度成分によって異なることが分かり、プラズマダイナミクスを調べる新しい診断方法としても期待できる。

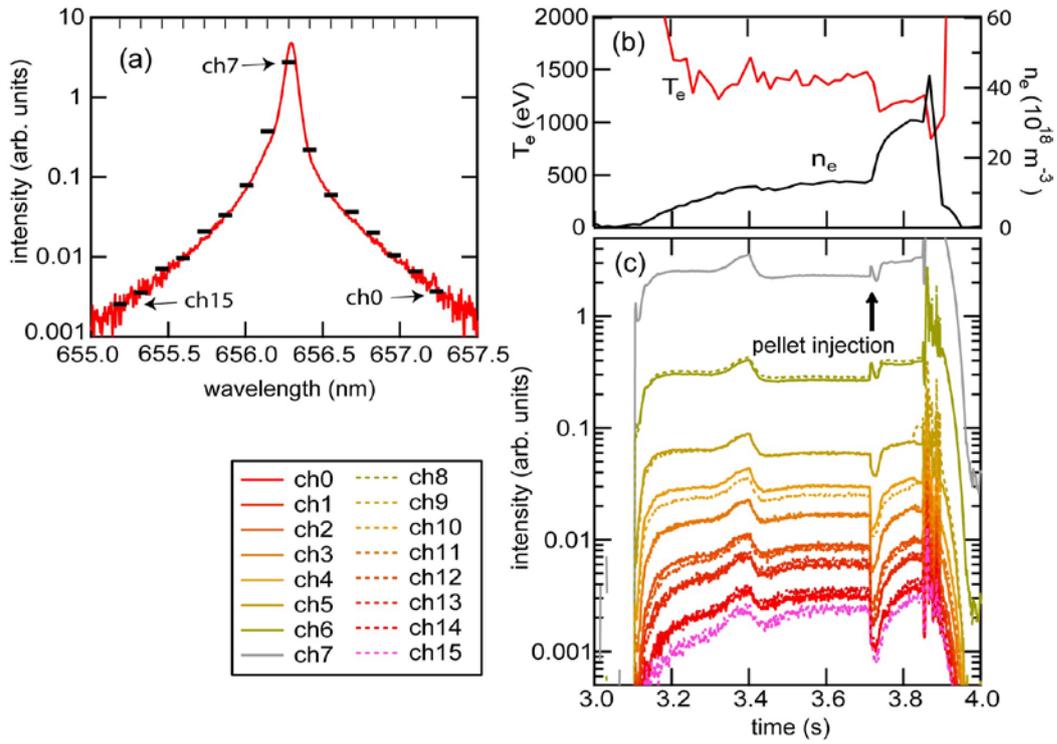


図 3.3.6-11 (a)水素バルマー α スペクトル形状とチャンネル。(b) 水素ペレット入射放電の中心電子温度・密度の時間変化。(c) 各チャンネルの強度の時間変化。

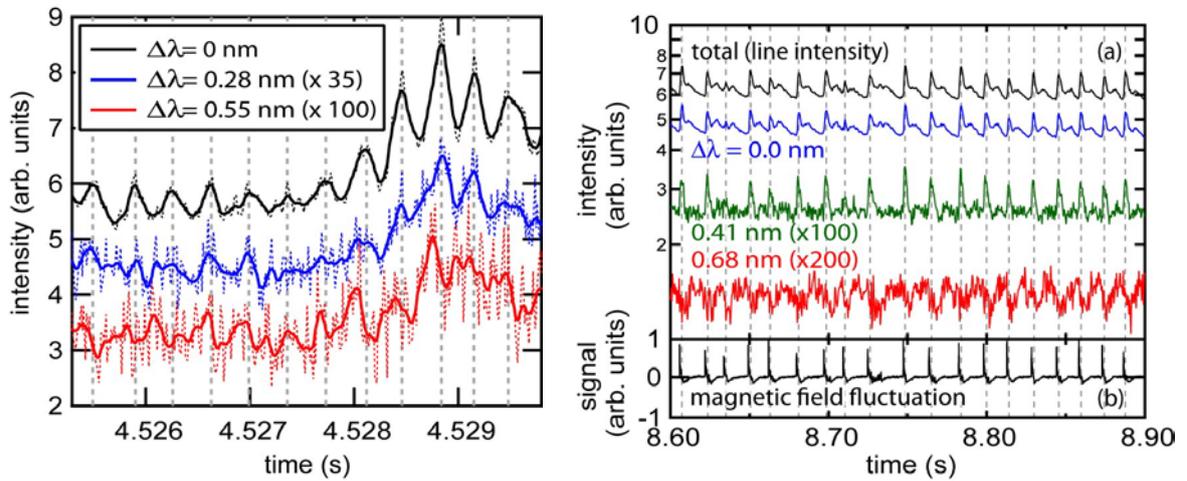


図 3.3.6-12 (左)：高ベータ放電のときのチャンネル7 (黒線；中心部)、5 (青線)、3 (赤線) (裾部) の強度の時間変動。(右)：外寄せ磁場配位の際のトータル強度 (黒線)、チャンネル7 (青線；中心部)、チャンネル4 (緑線)、チャンネル2 (赤線；裾部) の時間変動 (a)と、磁場変動 (b)。

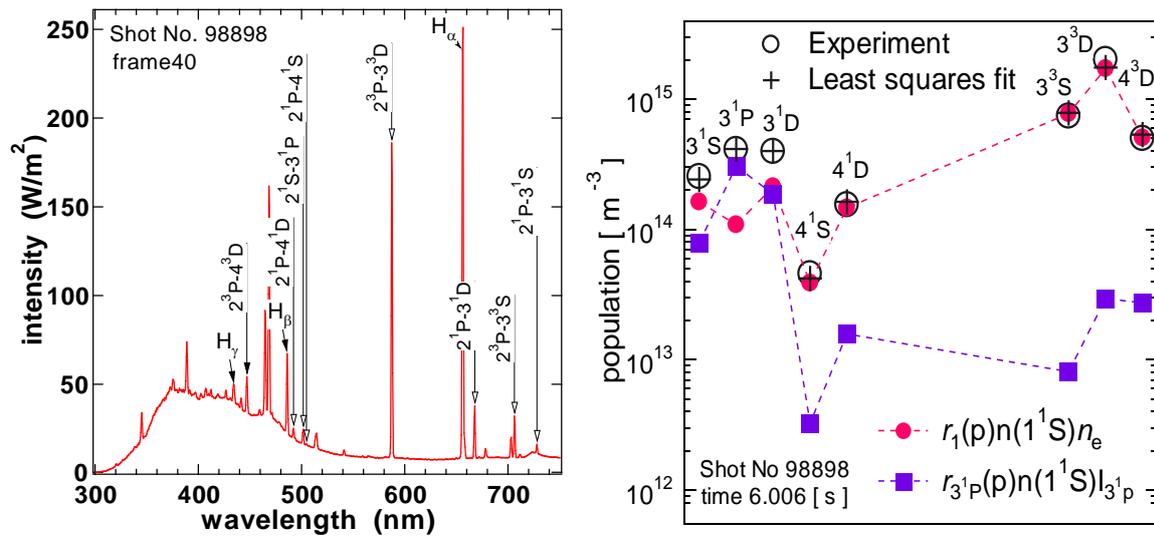


図 3.3.6-13 (左) 水素放電にヘリウムガスパフを行い計測した可視スペクトル。水素とヘリウム原子の発光線が計測できた。(右) 発光線強度から評価した励起状態のポピュレーション密度 (○) と、衝突輻射モデルによって計算したポピュレーション。基底状態からの励起を主成分とする電離進行プラズマ成分 (●) と、基底状態からの光吸収励起成分 (■)、トータル (+) と比較し、良く実験結果が再現できた。

6) 輻射輸送を考慮したヘリウム原子発光線解析

周辺プラズマにおける輸送過程や水素原子・分子の素過程反応の解明には、電子温度・電子密度の情報が不可欠であり、これらを正確に計測する診断法の開発が重要である。そのため、ヘリウム原子発光線強度を利用して電子温度・密度を決定するため、ヘリウム原子の衝突輻射モデルに輻射輸送の効果を単純化して取り入れ、水素放電にヘリウムガスパフを行なって可視分光計測を行い、ヘリウム原子発光線を解析した (図 3.3.6-13)。発光線強度からヘリウム原子の励起状態のポピュレーション密度を評価し、モデル計算と比較して電子温度・密度などを決定した。モデルでは、輻射輸送に由来する生成項を導入し、光吸収励起係数をパラメータとして扱った。このとき得られたプラズマパラメータは、電子温度 12.7eV、電子密度 $5.01 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、ヘリウム原子基底状態密度 $6.68 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、などが得られた。

7) 荷電交換断面積エネルギー依存性

荷電交換再結合分光法は、プラズマのイオン温度や回転速度を測定する方法としてよく用いられている。最近、荷電交換断面積のエネルギー依存性が原因で生じる見かけ上のトロイダル回転速度やポロイダル回転速度がイオン温度の上昇に伴い無視で

きないレベルになってきた。そのため、この荷電交換断面積のエネルギー依存性を LHD プラズマ計測により計測し、原子データの信頼性を調べる必要がでてきた。

中性水素ビーム (NBI) の入射エネルギーを変化させて、炭素イオン C^{6+} と中性水素 H の荷電交換反応によって生成された C^{5+} イオンからの発光線 ($529.06\text{nm}: n=8 \rightarrow 7$) を計測し、見かけの回転速度とイオン温度の比を求め、理論計算値との比較を行なった (図 3.3.6-14)。イオン温度と見かけの速度との相関の傾きで表される「断面積エネルギー依存性によるドップラー速度」とイオン温度の比は、規格化された荷電交換輻射断面積の速度依存性の傾き ($1/\sigma$) ($d\sigma/dV$) に比例する。理論計算には、ADAS データベースの原子データと計算コードを用いた。その結果、入射エネルギー (衝突エネルギー) に対する振る舞いに有意な違いがあることがわかった。この結果は、プラズマ回転速度の補正に使われている理論値 (ADAS の断面積データを用いた計算値) を見直す必要があることがある事を示している。

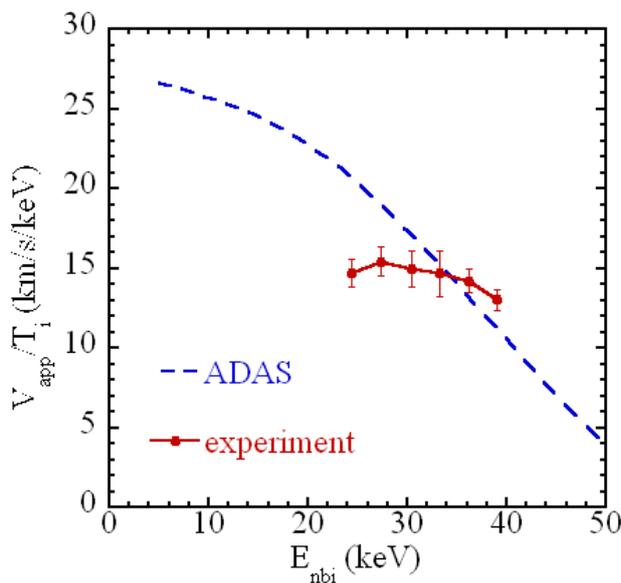


図 3.3.6-14 イオン温度で規格化した見かけ上の速度のエネルギー依存性の実験値 (赤丸) と理論値 (青破線)。

3.4 装置工学実験

1) 磁界の動的制御による LHD 構造体に流れる誘導電流の評価

はじめに

LHD を用いたプラズマ実験において、超伝導コイル電源に増設したパルス電源を用いて、動的な磁界制御下でのプラズマ実験が行われている。この実験では、LHD 本体を貫く磁束が時間的に急速に変化するため本体の金属構造体に誘導電流が生じる。この誘導電流は、構造体の発熱および誤差磁界の元となる。そこで、パルス電源による通電に伴い生じる誘導電流の大きさおよび経路をコイル電流の精密測定結果から評価した。

評価方法

LHD の本体構造に流れる誘導電流は、本体構造物を抵抗性の二次回路とみなした等価回路で表すと、コイルから見た誘導電流はコイル電流中の印加電圧に比例した抵抗性電流と見ることができる。また、誘導電流を線電流と仮定すれば、みかけの誘導電流は線電流の位置により決まるコイルとの相互インダクタンスと線電流で大きさが決まる。そこで、電流掃引時の抵抗性電流を抽出し、コイル間で比をとり、その比に相互インダクタンスの比が一致する位置を捜し出せば、誘導電流の中心を推定できる。

評価結果

上記方法により IV コイルに 200V 矩形波電圧を印加したときには電流中心が装置中心から 2.3m、赤道面から上下 1.1m の位置にそれぞれ 4.5kA の誘導電流が、IS コイルに 180V を印加したときには装置中心から 3.4m、上下 0.95m の位置に 4.0kA の誘導電流が流れると推定できた。実際のプラズマ実験時の誘導電流は、構造体が電氣的に線形なことから、本結果の重ね合わせとして評価できる。

2) LHD ポロイダルコイルの結合損失と時定数

大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導ポロイダルコイルは、NbTi ケーブル・イン・コンジット導体を使用した大型超伝導コイルである。ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置である LHD は、定常運転を基本とし、これまで磁場を急速に変化させることはなかった。しかし、2008 年度から、プラズマの位置を実時間で制御し、プラズマ閉じ込め性能を向上させる実験が開始された。そのために用意されたのが、2種類のポロイダルコイル(IV コイルおよび IS コイル)用の新規パルス電源である。この増強により、ポロイダルコイルの掃引速度を約 6 倍(コイル上での最大磁場変化速度を 0.06T/s)にすることが可能となった。本研究では、この新規パルス電源を活用し、IVコイル単独(上側, 下側の一対)の交流損失を熱的な方法で測定した。

図 3.4-1 は、最大通電電流が 2 kA、4 kA、5 kA の 3 通りの場合の、1 回の台形波通電（立ち上げ/立ち下げ時間が τ_0 ）当たりの交流損失の $1/\tau_0$ 依存性である。損失の $1/\tau_0$ 依存性は直線近似が可能であり（実線が IV-L、破線が IV-U）、 $1/\tau_0$ がゼロの極限をヒステリシス損失として見積もることができる。そして測定した損失からヒステリシス損失を差し引いた損失を結合損失と見積もった。通電波形、コイル内部の磁場分布を考慮し、測定した結合損失 Q_c を次の表式で規格化した。 Q^* を規格化損失と呼ぶ。

$$Q^* = (\mu_0 / A^* B_m^2 V_m) Q_c \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 A^* は導体形状と磁場方向に関する因子、 B_m は最大印加磁場、 V_m は素線の体積である。図 3.4-1 のすべてのデータから結合損失を抽出し、式(1)を用いて、導体全長にわたり規格化した結果を図 3.4-2 に示す。規格化したことにより、最大通電電流の依存性がなくなった。これにより、コイル内に磁場分布があっても、最大電流について規格化できることが確認された。ここで結合損失時定数、つまり結合電流の減衰時定数を τ_c とすると、 τ_c / τ_0 が 1 より十分小さい (0.1 以下) の場合は次の関係が近似的に与えられる。

$$Q^* = 2\tau_c / \tau_0 \quad (2)$$

この式は、図 3.4-2 における直線近似の傾きから τ_c を求めることができることを示している。評価した 2 個の IV コイルの結合損失時定数は、IV-L コイルが 85ms、IV-U コイルが 200ms であった。2 個のコイルは全く同じ設計で作られたにもかかわらず時定数で 2.4 倍の差が現れた。コイルに使用されている素線の表面はいずれもコーティングを施していない銅の裸面であり、自然酸化被膜が素線間接触抵抗に影響を与えた可能性がある。

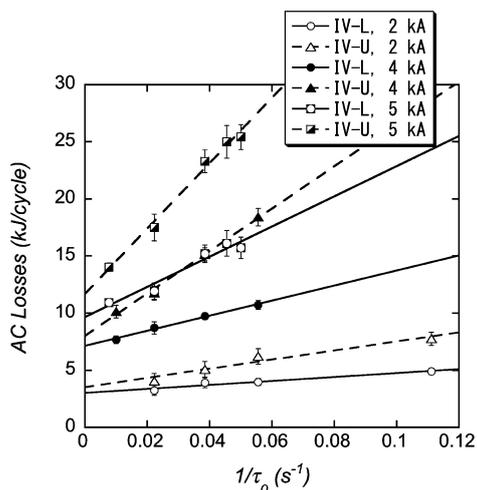


図 3.4-1 測定された全交流損失

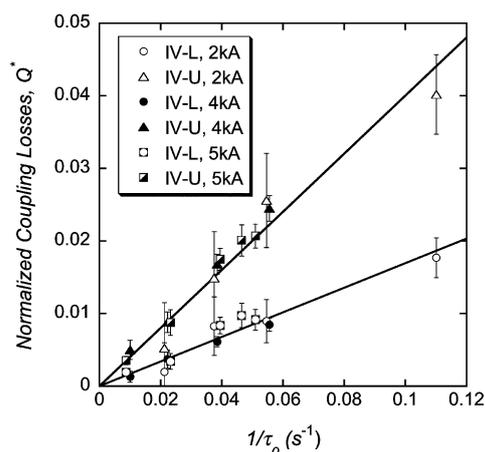


図 3.4-2 規格化された結合損失

3) ピックアップコイルによる LHD ヘリカルコイルの常伝導伝播位置の同定

大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイルには、図 3.4-3 に示すように、常伝導伝播の位置を検出するためにコイル長手方向に約 0.6m ピッチでピックアップコイルが設置されている。ヘリカルコイル導体は、超伝導燃線と高純度アルミニウム安定化材が並置されているため、常伝導転移時に電流重心が移動する。この際の僅かな磁場変化を検知することが位置測定の原理である。ヘリカルコイルの外側から常伝導伝播位置を観測することが可能で、さらに各ピックアップコイルの検知時間の差から伝播速度を求めることもできるため、コイルの特性理解に大いに役立っている。ピックアップコイルは、ヘリカルコイル外側の左右の角にポロイダル角の 30 度ピッチで左右交互に設置されており、左側と右側のピックアップコイルの信号レベルの差からヘリカルコイル断面内のどの位置を伝播したのかを推測することが可能である。コイル電流の作る磁場の影響を打ち消すためにトーラス対角位置のピックアップコイル同士の差電圧を計測しており、常伝導転移に伴う僅かな磁場変化の検出に成功している。測定の 1 例を図 3.4-4 に示す。

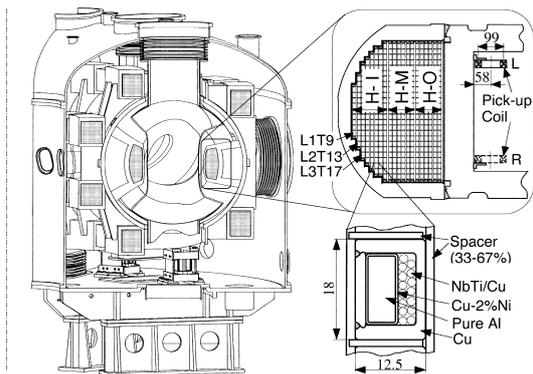


図 3.4-3 Cross-section of the LHD cryostat and the helical coils, which consist of H-I, H-M, and H-O blocks from the inner side. The numbers of the H-I, H-M, and H-O blocks from the inner side. The figures mean the sector and the poloidal turn number of each block is 150.

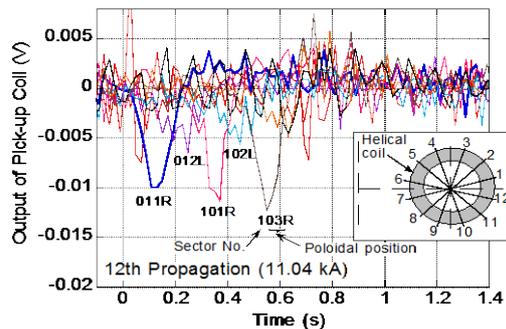


図 3.4-4 Outputs of pick-up coils for the 12th propagation of a normal-zone. Numbers of the figures mean the sector and the poloidal position of the coils.

ヘリカルコイルにおいて 11.0-11.3kA の電流値で常伝導伝播が生じる場合には、片側方向だけに伝播することがこの検出システムで確認されている。同様の現象は、導体試験やモデルコイル試験でも確認されており、常伝導部の先端部分では、アルミニウム安定化材への電流拡散遅れにより、実効抵抗が高くなっており、長手方向に一樣ではないことが分かっている。モデルコイルにおける電位分布計測より、図 3.4-5 に示すように、アルミニウム安定化材への電流拡散時の抵抗値の減衰時定数は約 50ms で、逆に超伝導線への電流転流時にはその 8 倍の約 400ms である。発熱は電流密度の二乗に比例することから、電流重心変化

の時定数は抵抗値(電流一定なので発熱量)の減衰時定数の2倍となる。このことを考慮し、実測された抵抗値変化より電流重心変化を求めて、常伝導伝播時のピックアップコイル信号を解析した結果を図3.4-6に示す。常伝導伝播位置を最下層から3層目まで変化させて解析したピックアップコイル出力と実測値を比較すると、このケースでは最下層で伝播したことが示唆される。

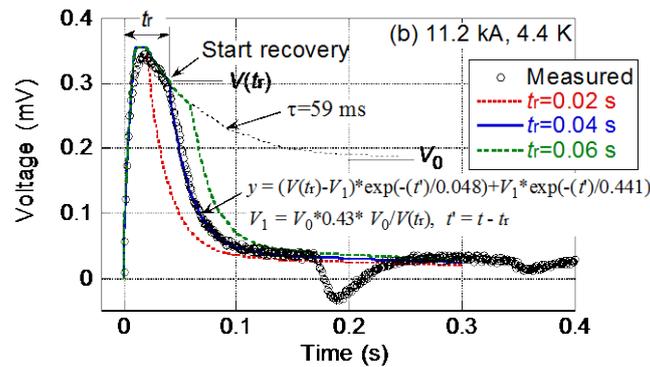


図 3.4-5 Voltage of the LHD-HC conductor during propagation of a normal zone and recovery at (a) 12.0 kA and (b) 11.2 kA. A normal zone propagated to both sides at 12.0 kA and to one side at 11.2 kA

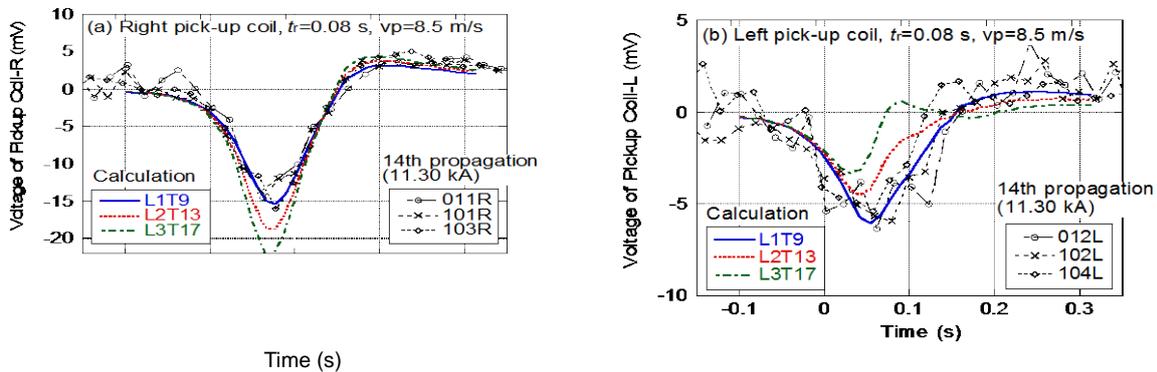


図 3.4-6 Calculated voltages of pick-up coils in comparison with the measured data. The time of each measured data is shifted to adjust the peak voltage. "L1T9", "L2T13", and "L3T17" are the last turns in the 1st, 2nd, and 3rd layers, respectively, in which the shifted currents are set.

4) LHD ヘリカルコイル用サブクールシステムの運転制御の最適化

2006 年度に LHD ヘリカルコイル (以下、HC) の運転温度を下げる目的で、サブクールシステム (以下、SS) が LHD 低温システムに導入された。SS は、LHD 低温システムの定常運転時の冷凍能力の余力 2 kW で HC 温度を 3.6K まで下げることが可能となるように設計された。SS では、2 台直列の低温排気圧縮機 (以下、CC) を用いて減圧された約 3.0K の飽和ヘリウムと供給ヘリウムとを熱交換することで、サブクールヘリウ

ムを生成している。SS 導入後、HC の供給ヘリウム温度は HC 入口で設計値の 3.2K まで低下し、結果として HC 温度は 3.6K (準一次元計算による見積) となり、最大通電電流値が HC 全体の平均で 11.833kA まで増大した。SS は、これまで 10,000 時間を超えるサブクール運転を行い、プラズマ実験を中断するような大きな問題は発生していない。

サブクール運転制御方法

図 3.4-7 に SS の概略を示す。サブクール運転中、出口弁 (OV) を全開、バイパス弁 (BV) を微開とし、入口弁 (IV) により飽和ヘリウム槽の液面は一定値 (70%) に自動制御される。CC は、約 1,500rps の回転数を保持して運転され、CC 流量は飽和ヘリウム槽中のヒーターで 16g/s となるように自動制御される。また、HC 供給流量は供給バルブ (SV) により 50g/s に手動調整される。本制御方法により、飽和ヘリウム槽温度は $\pm 0.01\text{K}$ の範囲内でほぼ一定に制御され (図 3.4-8)、安定した温度のサブクールヘリウムが HC に供給される。

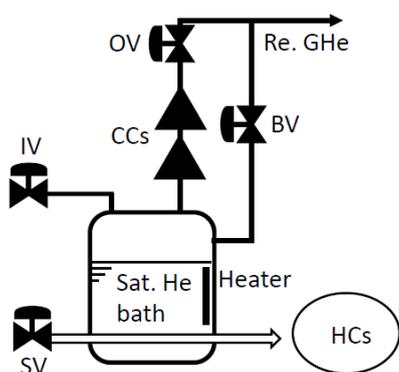


図 3.4-7 Schematics of the subcool system for the LHD helical coils.

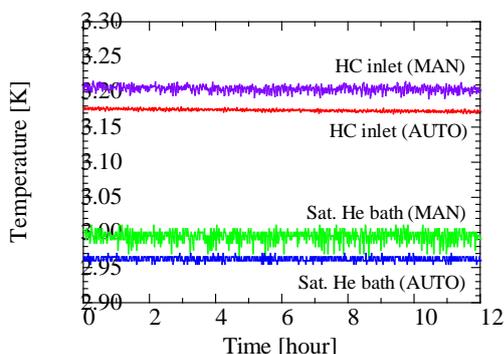


図 3.4-8 Temperature stabilization by the heater in the saturated helium bath.

急速減磁におけるサブクールシステムの動的挙動

上述の運転状態において、HC 通電電流値約 11kA (蓄積エネルギー約 670MJ) から急速減磁 (時定数 30 秒) が行われた場合の SS の挙動を図 3.4-9 に示す。HC 流量の低下と CC 出口圧力の上昇による CC 流量の急激な低下がみられる。これは、AC ロスによる発熱で、HC 周りのサブクールヘリウムが膨張、蒸発し、HC 系統の圧力が上昇したことの影響と考えられる。このときの CC 流量と飽和ヘリウム槽ヒーター発熱量の推移を図 3.4-10 に示す。CC 流量の変動に対し、飽和ヘリウム槽ヒーター発熱量も大きく変動した。一般的に、遠心式の CC は、適切な CC 流量、および圧力比の範囲内で安定に動作するが、その範囲外ではサージやチョーク現象が発生し、不安定となる。本 CC は、CC 流量 12g/s~20g/s で安定に動作することが以前の実験で確認されている。HC 急速減磁における CC 流量は飽和ヘリウム槽ヒーターによ

って12.0g/s~18.4g/sの範囲内で制御され、CCが不安定な状態となることを防いだことがわかる。

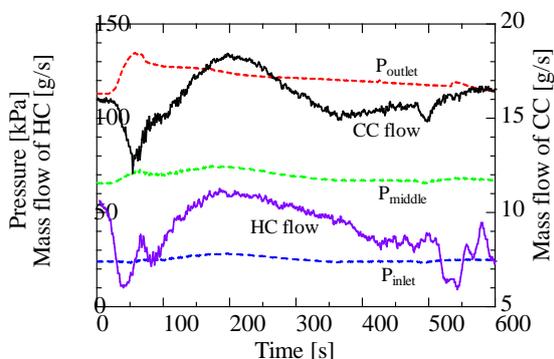


図 3.4-9 Pressure and mass flow variations after the quick discharge occurred.

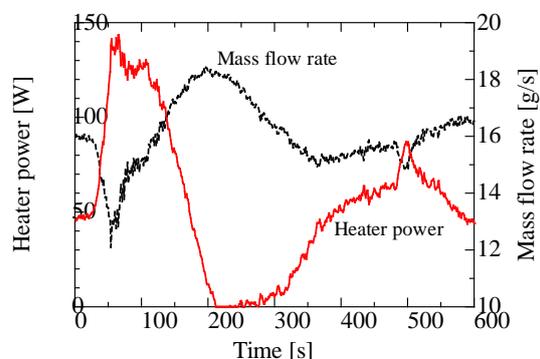


図 3.4-10 Automatic CC flow control by the heater in the saturated helium bath.

低温排気圧縮機の定格運転までの立上げ方法

CC は回転数を変化させるとき、CC 流量等が大きく変動し、不安定な状態となりやすい。そこで、CC 定格運転までの立上げ方法の最適化を行った。CC の回転数を上げる際、SS ではBVを閉じる必要がある。CCの運転状態を不安定とせず、短時間で立ち上げるためにBVの開度がCC流量に与える影響(図3.4-11)を考慮した。図3.4-12にCC定格運転までの自動立上げ方法を示す。これにより30分以内でスムーズにCCを定格運転にすることができるようになり、立上げ時間の節約、省力化、CCが不安定となるリスクが回避できた。

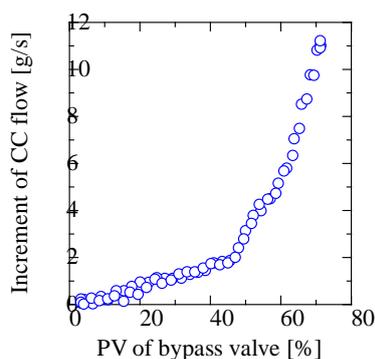


図 3.4-11 Influence of the bypass valve on the CC flow.

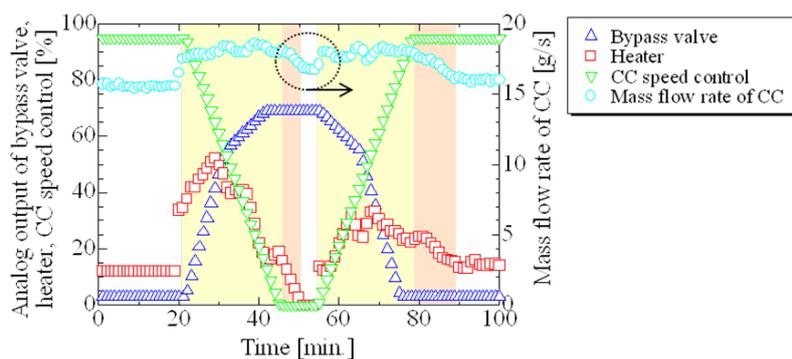


図 3.4-12 Automatic operational mode shift.

サブクールシステムの運転実績

表 3. 4-1 に SS の運転実績を示す。SS が導入された 2006 年度から 2011 年度まで 6 年間の総 CC 運転時間は 19, 625 時間、総サブクール運転時間は 11, 868 時間である。2008 年度には、2, 184 時間の連続サブクール運転を達成した。また、インバータの交換、UPS の追加、不純物対策等により、CC の不具合の発生は年々減少しており、2010-2011 年度の不具合の発生はなかった。これらの対策と運転制御方法の最適化により、安定な運転を継続している。

表 3. 4-1 サブクールシステムの運転履歴

サイクル / 年度	CC 運転時間 (h)	サブクール運転時間 (h)	不具合発生回数
10/2006	4,128	793	3
11/2007	4,074	3,024	2
12/2008	2,879	2,184	2
13/2009	2,649	1,671	1
14/2010	3,111	2,216	0
15/2011	2,784	1,980	0
Total	19,625	11,868	8

4. 実験環境の整備と拡充

大型ヘリカル装置（LHD）計画は、制御核融合の実現に向けたヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解を目的としており、その達成に向けて、ヘリカル方式による核融合炉を見通すことができる高性能プラズマの実現を目指している。LHD の性能を最大限に発揮させて高性能プラズマを実現させるためには、本体及び加熱関連機器の整備・増強並びに装置の改良を適切に進めることが必要であり、また、環状プラズマの総合的理解のためには、精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充が求められる。

一方、LHD プロジェクトでは、プラズマ性能のさらなる向上を目指して、重水素実験を柱とした LHD 最高性能化を計画しており、それに向けた加熱装置の増強と閉構造ダイバータの設置を着実に実施する必要がある。また、重水素実験は関係する地元自治体との協定書等の締結が実施の前提となるが、平成 19 年 12 月に確定し、公開された重水素実験計画及び安全管理計画に従って、検討を進める必要がある。

以上の観点から、LHD 計画の目的達成に向けて、LHD が国際的に高い水準の研究成果をあげるために遂行してきた実験環境の整備と拡充について、LHD 最高性能化計画に向けた増強・整備及び検討を含めて、以下に報告する。なお、報告の内容は以下に要約される。

○LHD の性能を最大限に発揮させるための本体・加熱機器の整備・増強・改良

1. 超伝導コイルシステムの 99% という高い稼働率は、LHD プラズマ実験の効率的な実施に貢献した。
2. 超伝導コイルの直流電源の増強は、プラズマ放電中の磁気軸シフトを可能とした。
3. 閉構造ダイバータの設計・研究開発が装置内排気ポンプも含めて完了し、真空容器内への据え付けを開始した。
4. ガスパフ装置の増強及びペレット入射装置の改良は、プラズマ密度の制御性を高めた。
5. NBI 加熱電力を 29MW に増強し、LHD プラズマ性能の向上、特に 7 keV の高イオン温度の達成に大きく貢献した。
6. ECRH の加熱性能が大きく向上し、3.7MW の高電力加熱の実現及び長パルス加熱性能の増強が、高電子温度プラズマ領域を大幅に拡大させた。
7. ICRF 加熱の増強に際して、新たに波数制御（HAS）アンテナを設置し、定常プラズマのパラメータ領域をより高密度及び高 RF 電力に拡大した。
8. NBI、ECRH 及び ICRF の各加熱装置は、重水素実験へ向けた増強の検討を着実に進めている。

○環状プラズマの総合的理解のための精度の高い計測及び理論・解析モデルの拡充

1. 既存の計測の性能向上が着実に進められ、LHD プラズマの総合的かつ精度の高い理解が進んだ。特に以下の計測器の性能向上が図られた。
 - ・ トムソン散乱計測システムのデータの質の向上
 - ・ 重イオンビームプローブ (HIBP) の測定範囲の拡大
 - ・ 高エネルギー粒子計測の性能拡大
 - ・ データ処理システムの増強と進展
2. 重水素実験に向けた計測機器の検討が進んだ。特に以下の項目が進んだ。
 - ・ 重水素実験環境における既存の計測器の対応検討
 - ・ 共同研究を基盤とした中性子測定システムの開発と設計検討
 - ・ プラズマの閉じ込めと輸送の研究に向けた協同トムソン散乱システムの開発
 - ・ H/D 比計測に向けた計測手法の開発と概念設計の検討
3. LHD プラズマに対する理論とデータ解析の手法が、実験グループとの緊密な連携により大きく進んだし、精密な議論による LHD プラズマの解析が促進され、環状プラズマの総合的理解への展開をはかっている。
4. 重水素実験に向けて、同位体効果に関する理論的な解析が進んだ。

以下、個別の課題について、具体的に記述する。

4. 1 本体・加熱機器の整備・増強

LHD 本体及び加熱関連機器の整備・増強は、LHD プラズマの性能拡大に直接的に貢献すると共に、超伝導コイルを用いた定常装置に代表される LHD の特長を生かした技術的試験及び開発実験は、ヘリカル型核融合炉に向けた工学研究にも寄与する。ここでは、LHD の性能を最大限に発揮させるために実施された本体関連機器及び加熱機器の整備・増強を中心に報告する。併せて、LHD 最高性能化計画に向けた本体・加熱機器の改造の検討及び実施状況を述べる

4. 1. 1 本体関連機器

LHD は世界最大の超伝導核融合プラズマ実験装置であり、そこで生成されるプラズマ性能は超伝導システムの機能と運転信頼性に大きく依存する。一方、プラズマ制御の観点では、ダイバータによる粒子制御と不純物制御は、LHD プラズマの高性能化とその定常化に向けた重要課題であり、ダイバータの閉構造化は LHD 最高性能化計画における重点整備項目の 1 つである。また、プラズマへの燃料供給はプラズマを制御する重要な手段であると共に、ガスパフ装置とペレット入射装置の高機能化は、将来のヘリカル型核融合炉における燃料供給手法の確立にも寄与する。

本節では、LHD プラズマ実験の高度化へ寄与する超伝導コイルシステムの整備及び改造計画、LHD 最高性能化計画へ向けた閉構造ダイバータの検討・整備、及び LHD プラズマの制御性の向上へ向けた燃料供給システムについて報告する。

4. 1. 1. 1 超伝導コイルシステム

(1) LHD 超伝導システムの高信頼化運転

LHD 超伝導システムは磁場閉じ込めの超伝導コイル及びコイルに大電流を供給する超伝導バスライン、並びに超伝導システム全体を低温に維持する低温システム等で構成されている。1998 年 3 月のファーストプラズマ生成から 13 年余を経過した。この間に 14 回の安定な長期連続運転を実施し、高性能な LHD プラズマの実験環境を提供している。稼働率 99%を超える高い信頼性の運転実績は、実験サイクル期間中のプラズマ実験の高い遂行率の実現に大きく寄与し、共同研究をはじめとする多くの実験テーマの実施を可能とした。

LHD の超伝導システムは、構成をできるだけ単純化し、運転を容易にすると共に、信頼性の向上を目的として設計・製作されている。LHD 超伝導システムの運転履歴と稼働率を表 4. 1. 1. 1-1 に示す。LHD は毎年度 1 サイクルの長期連続運転を実施している。低温システムのヘリウム液化冷凍装置用圧縮機の運転時間を基準とし、ヘリウム系内の精製運転、超伝導システムの予冷運転、定常運転、加温運転を含む全運転時間と超伝導状態を維持した定常運転の時間を積算している。2010 年度の第 14 サイクル終了時点で、全運転時間は 63,751 時間、定常運転時間は 42,629 時間に達している。その間、低温システムの故障等により、冷却が停止した件数は 25 回発生したが、停止時間の合計は 588 時間であり、99.1%の高い稼働率を達成している。表 4. 1. 1. 1-2 に 25 回のシステム停止に至った原因となる故障箇所と停止時間の関係を示す。最も回数が多く(11 回)、積算した停止時間が長い(317.1 時間)のは制御系に関する故障である。一方、圧縮機故障は回数 4 回にもかかわらず、復旧に時間がかかるため、平均故障時間が 61.1 時間と長くなっている。第 14 サイクルの運転では、精製運転開始直後にスクリュウ圧縮機のスラストベアリ

表 4. 1. 1. 1-1 LHD 超伝導システムの運転履歴と稼働率

サイクル /年度	運転時間(h)		停止 件数 ⁽²⁾	停止 時間 (h)	稼働 率 (%)
	全運転 ⁽¹⁾	定常状態			
1/1997-8	2,895	1,350	4 (2)	138.0	95.2
2/1998	3,522	2,359	2 (0)	5.3	99.8
3/1999	5,361	3,965	5 (3)	12.4	99.7
4/2000	5,016	3,538	1 (0)	13.8	99.2
5/2001	5,294	3,791	1 (1)	38.2	99.9
6/2002	4,920	3,366	1 (0)	0.1	100.0
7/2003	5,001	3,446	2 (1)	64.5	98.7
8/2004	4,814	3,216	1 (0)	54.1	98.9
9/2005	5,035	3,470	1 (1)	2.3	100.0
10/2006	5,037	3,436	0 (0)	0.0	100.0
11/2007	5,184	3,607	2 (1)	23.4	99.5
12/2008	3,856	2,272	1 (0)	0.2	100.0
13/2009	3,688	2,152	2 (2)	7.0	99.8
14/2010	4,128	2,591	2 (1)	228.7	94.8
全体	63,751	42,629	25 (12)	588.0	99.1

(1) 精製、予冷、定常、加温を含む全運転時間

(2) () 内の数値は定常運転中の停止件数

ングが故障し、その修理復旧に 228.4 時間を要したため、結果として稼働率が低下したが、コイルの冷却等のスケジュールを調整するなどの対応により、プラズマ実験に対しては全く影響を与えなかった。

(2) LHD 低温システムの高信頼化改造
 運転開始から高い稼働率と運転信頼

性を達成して、11 万ショットを超える LHD プラズマ実験に大きな寄与をしているが、さらなる運転信頼性の向上を目指して、低温システムの高信頼化改造を計画している。対象としているのは、故障時の復旧に時間のかかる圧縮機系統とシステム構築開始から 17 年以上を経過して老朽化が進んでいる低温制御システムである。これにより、重水素実験を柱とする LHD 最高性能化計画に対しても、高い運転信頼性を確保することができる。

ヘリウム液化冷凍装置のスクリー圧縮機は、吸入圧力 0.1013MPa の A 系圧縮機 6 台と吸入圧力 0.203MPa の B 系圧縮機 2 台の合計 8 台で構成されている。A 系は 4 台の低段圧縮機と 2 台の高段圧縮機で構成され、B 系は低段、高段、それぞれ 1 台の圧縮機で構成されており、吐出圧力は A 系、B 系共に 1.935MPa である。現在、8 台の圧縮機は冗長化されておらず、どの 1 台が故障してもヘリウム液化冷凍装置の運転を継続することができない。圧縮機で故障が発生するとベアリングの交換やスクリーの点検修理に長時間を要するため、システムの稼働率を著しく低下させる。この問題を解消し、システムの信頼性を更に向上させるため、平成 23 年度に低段用および高段用の冗長化圧縮機を 1 台ずつ追加す

ることを計画している(図 4.1.1.1-1 参照)。冗長化圧縮機は、A 系及び B 系の低段、高段のどの圧縮機が故障してもバックアップできるように接続箇所を弁で切り替えられる仕様となっており、表 4.1.1.1-3 に示すように、代用する圧縮機に応じて容量調節弁のロードを調整することにより、運転条件に対応可能となっている。

表 4.1.1.1-2 システムの停止原因

故障箇所	件数	全停止時間 (h)	平均停止時間 (h)
制御系	11	317.1	28.8
停電	5	10.0	2.0
冷却水	4	7.5	1.9
圧縮機	4	244.4	61.1
操作ミス	1	0.1	0.1
合計	25	579.1	23.2

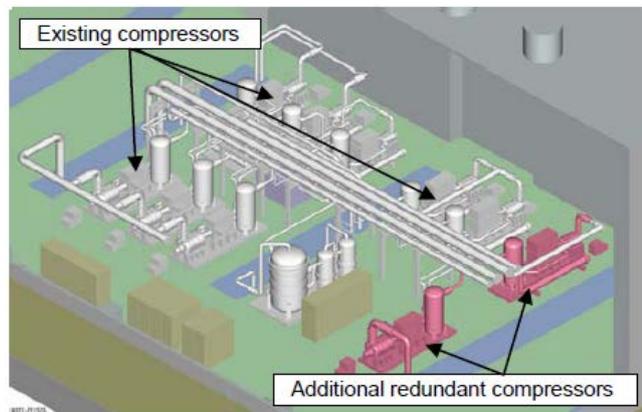


図 4.1.1.1-1 冗長化圧縮機の設置

LHD 低温制御システムは、超伝導システムの安定な長期連続運転に必要な不可欠な装置であり、システムの予冷、定常運転、加温までの各運転モードの変更、超伝導コイルが通電可能状態にあることの判定、停電や機器故障時の非常処理対応など、様々な操作を自動化すると共に、システムの状態及び異常の有無を常時監視している。一例として、超伝導コイルに通電を開始するために、ヘリウム液面や各点の温度、流量等が基準値を満たしていることを判断する通電可能条件、及び通電を継続できる通電継続条件の監視点数を表 4. 1. 1. 1-4 に示す。

表 4. 1. 1. 1-3 圧縮機冗長化

(低段冗長機の運転条件)

代用する圧縮機	ロード (%)	風量 (g/s)	吸入/吐出 圧力 (MPa)	軸動力 (kW)
A系低段1-3号機	100	215	0.1013/0.412	368
A系低段4号機	50	105	0.1013/0.412	230
B系低段機	55	210	0.203/0.534	300

(高段冗長機の運転条件)

代用する圧縮機	ロード (%)	風量 (g/s)	吸入/吐出 圧力 (MPa)	軸動力 (kW)
A系高段1-2号機	100	375	0.397/1.935	720
B系高段機	50	210	0.520/1.935	475

表 4. 1. 1. 1-4 超伝導コイルの通電条件

判定条件数	ヘリカルコイル	ポロイダルコイル	バスライン	支持構造物	合計
通電可能条件	46	54	112	26	238
通電継続条件	34	34	67	3	138

現在の低温制御システムの構成を図 4. 1. 1. 1-2 に示す。システムは VME コントローラと操作端末、プログラム構築用 PC、それらを接続するネットワーク (LAN) 等で構成されている。制御を担当する VME コントローラは、ヘリウム液化冷凍機用、ヘリカルコイル用、ポロイダルコイル用、超伝導バスライン用、全体統括用、運転操作用に分散されており、制御点数は、アナログ入力 1,045 点、アナログ出力 216 点、デジタル入力 896 点、デジタル出力 768 点に達する。更にそれぞれの VME は常用系と待機系で冗長化されており、合計 12 台の VME コントローラがデータを共有するためのリフレクティブメモリで接続されている。システムは汎用の制御機器を用いたオープンシステムとして開発され、ハードウェアの進展に伴って機器の更新が容易に行えることを特徴とした。しかし、制御機器のダウンサイジングの流れから、VME コントローラのオープンシス

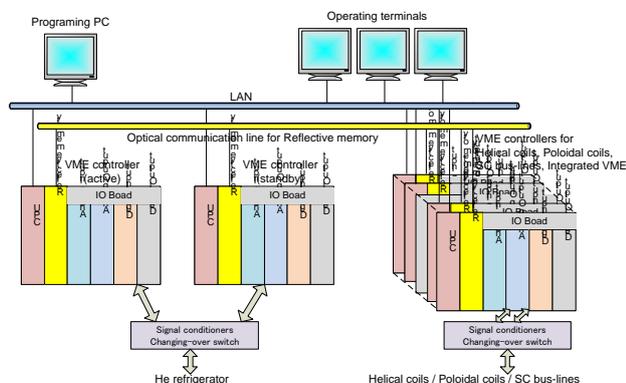


図 4. 1. 1. 1-2 現状の低温制御システム

テムとしての優位性が失われてきている。特に常用系と待機系とのVMEコントローラを故障時に自動で切り替えるためのデータ共有として導入したリフレクティブメモリが、システムの信頼性を左右するキーパーツとなっており、その世代交代が進まないことが信頼性向上のネックとなっている。

改造後の新制御システムの構成を図4.1.1.1-3に示す。制御機器部分はVMEコントローラからコンパクトPCI（CPCI）コントローラに変更し、複雑になりすぎたシステムを単純化すると共に、機器の世代交代に迅速に対応できるようにした。CPU性能の向上に伴い各冷却負荷毎に分散していたコントローラを集中して一つのコントローラで全ての制御を行う方式とし、リフレクティブメモリによるデータ共有を不要とした。多数の入出力点を取り扱うため、入出力カードをCPCIラックに直接設置するのではなく、リモートI/Oを用いて各冷却負荷毎に分散して設置し、リモートI/OとCPCIコントローラとは産業用イーサネットのオープン規格であるEtherNet/IPで接続した。システムの冗長化は、CPCIのCPU部、LAN部、リモートI/O部をそれぞれ二重化することで対応している。ソフトウェアは、これまでのソフトウェア開発環境及び構築した各種の自動化プログラムを継承し、移植ができるように互換性を保っている。新制御システムの開発は平成23年度に実施し、平成24年度からのフィールドテスト、平成25年度に新制御システムへの完全移行を予定している。

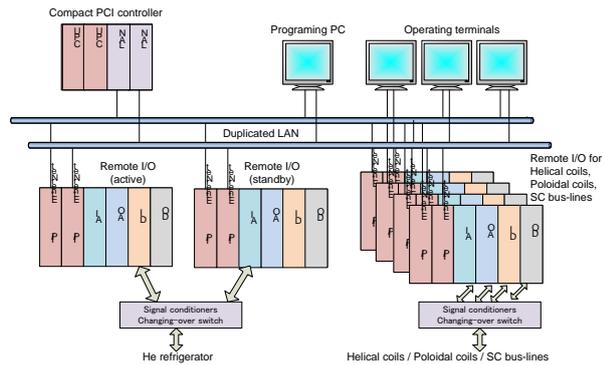


図 4. 1. 1. 1-3 改造後の新低温制御システム

(3) LHD 超伝導コイル電源の 増強

LHDの超伝導コイル励磁電源においては、以下の2点の増強作業を行った。

1. パルス電源の追加

6台あるコイル電源のうち、図4.1.1.1-4に示すように、IS及びIVの電源装置に直列に電圧180V、電流6.2kA（連続通電時間120秒）の短時間電源を追加した。

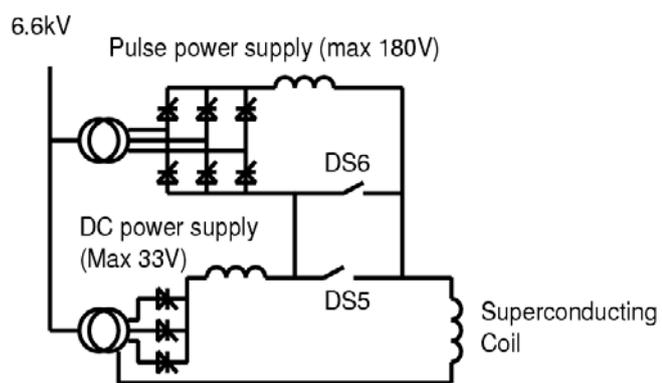


図 4. 1. 1. 1-4 定常電源と直列に増設した短時間電源。

追加した短時間電源とこれまで使用してきた定常電源の主な仕様を表 4.1.1.1-5 に示す。この定常電源と短時間電源を使用することにより、中心磁場 1.5T 以下の実験において、コイル端子に最大 210V を印可することができる。一例として、図 4.1.1.1-5 に磁気軸掃引時の電圧および電流波形を示す。図に示すとおり、3 秒以内での磁気軸掃引が実現でき、従来では不可能であったプラズマ生成中での磁気軸掃引が可能となった。これにより、磁気軸変化時のプラズマの動的な挙動を観測することができるなど、動的な磁場環境下でのプラズマ実験に寄与している。

表 4.1.1.1-5 電源の主要な仕様。

定常電源			短時間電源	
コイル	IS	IV	IS	IV
電圧	33V	33V	180 V	180V
電流	16.2 kA	15.6kA	6.2 kA	6.2 kA

図 4.1.1.1-5 に磁気軸掃引時の電圧および電流波形を示す。図に示すとおり、3 秒以内での磁気軸掃引が実現でき、従来では不可能であったプラズマ生成中での磁気軸掃引が可能となった。これにより、磁気軸変化時のプラズマの動的な挙動を観測することができるなど、動的な磁場環境下でのプラズマ実験に寄与している。

2. 極性切替え装置の追加

従来は、プラズマ実験に使用する磁場を反転するためには、電源とコイル端を結ぶ接続導体を人の手でつなぎ変える作業を必要としていた。ここに遠隔操作可能な電動の極性切替え装置を設置することにより、従来は現場にて 1 時間以上かかっていた作業を制御室からの遠隔操作により 1 分以下で切替えることができるようになった。これにより、磁場反転実験の要望に柔軟に対応できるようになり、実験条件設定の自由度が大きく改善された。

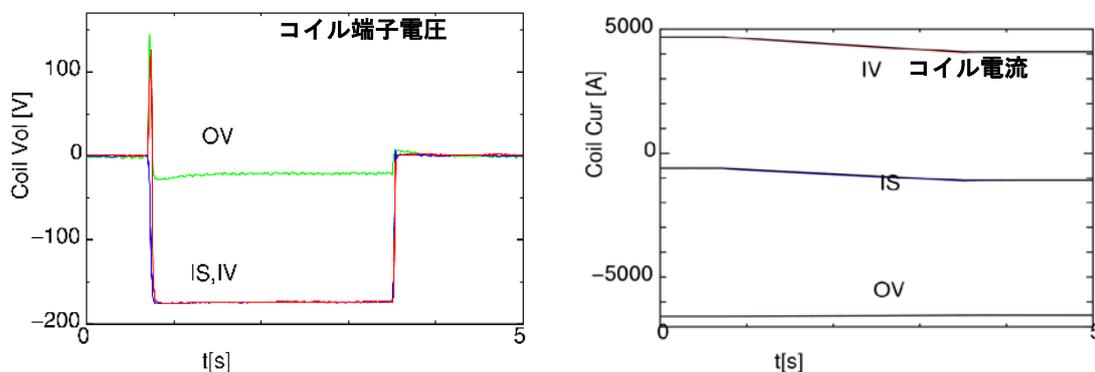


図 4.1.1.1-5 磁気軸変化時のコイル端子電圧 (左) とコイル電流 (右) の波形

(4) 重水素実験に向けた設備更新計画

超伝導コイルおよびベルジャー内部のケーブル類は、重水素実験による放射線が設計条件として規定されており、例えば、超伝導コイルの絶縁物にはガラスクロスとエポキシ絶縁、ベルジャー内のケーブル被覆には耐放射線性に優れたテフロンである FEP が採用されている。よって、これらのベルジャー内機器においては、改造は不要であるが、周辺設備には、放射線対策のために遠隔操作化や遮蔽の強化等が必要である。必要な改造項目を以下に挙げる。

- (1) 本体室への入室制限が厳しくなるため、本体室内の安全弁等の凍付き対策が必要。安全弁よりも低圧で動作する放出弁を管理区域外に追加する改造を計画している。
- (2) 高圧ガス設備として毎日の目視点検が必要であり、また、異常時復旧後の再起動でも目視点検が必須であるため、圧力計や安全弁等に対する監視カメラの増設を計画している。
- (3) 現状は、クエンチ検出器のリセットのためには本体地下室に入る必要があるため、遠隔リセットの追加、あるいは、クエンチ検出器の移動を計画している。
- (4) ヘリカルコイルは開閉共に空気圧操作の放出弁を備えており、圧空を喪失すると閉を維持できないため、閉操作をバネ式に変更する等の対策を計画している。現状は、本体室での手動操作により空気ボンベで圧空のバックアップを可能としている。
- (5) ヘリカルコイルバルブボックスとポロイダルコイルバルブボックスは、個別の真空排気装置を備えており、現状ではターボ分子ポンプと油回転ポンプを使用している。放射化物の物量を削減するため、油回転ポンプはオイルフリー化を検討している。
- (6) 本体室内の計器については、誤動作防止のため、本体地下室への移設または遮蔽追加等の処置を計画している。
- (7) 多層断熱材に採用されているポリエステルは強度低下が懸念されるため、断熱性能の監視とテストピースによる強度試験を計画している。
- (8) 超伝導システムについては完成後 15 年以上を経過しており、低温弁および制御機器等の耐久部品の更新時期となっているため、重水素実験開始前までに順次更新することを計画している。

4. 1. 1. 2 閉構造ダイバータ

不純物及びリサイクリング粒子制御を可能とするダイバータの閉構造化は、LHD 最高性能化計画における重点整備項目であり、その設計検討を平成 20 年より進めた。その結果に基づいて、平成 22 年の第 14 サイクル実験前に、閉構造化したダイバータを試験的に部分設置し、その性能を確認した。並行して、ダイバータ部の排気ポンプの設計検討を行い、平成 23 年の第 15 サイクル実験後に、粒子排気機能を備えた本格的なヘリカルダイバータの閉構造化整備を開始した。

(1) 閉構造ダイバータの設計検討

現状のヘリカルダイバータは開構造であり、電子密度が $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ と非常に高いプラズマ放電の運転でも、ダイバータ部における中性粒子圧力は高々 10^{-2} Pa 程度である。したがって、トカマク装置などで用いられている真空容器内クライオポンプ（排気速度 $\sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を設置しても、現状の 2 倍程度の排気粒子束にしかならない。ヘリカルダイバータ配位において有効な粒子排気を行うためには、ダイバータ部に中性粒子を有効に圧縮できるような構造を設ける必要がある。

ダイバータ部を含めたプラズマ周辺の中性粒子密度分布は、中性粒子輸送コード EIRENE を用いた計算により評価した。計算は、3 次元構造をもつ LHD に適用させるため、3 次元フルトラスメッシュを作成して行っている。また、EIRENE コードによる中性粒子挙動計算の妥当性は、分光計測等を用いた実験との比較等により確認した。図 4. 1. 1. 2-1 に示すように、内寄せ配位ではダイバータへの粒子負荷がトラス内側で特に大きいことが予想されるため、閉構造化の検討はトラス内側を対象に行った。

検討にあたり、目標とする排気粒子束を、単位時間当たりペレットで供給する粒子数を基準にして定めた。定常運転が可能な現有の連続入射ペレット（10Hz、ペレット 1 個当たり $1 \times 10^{21} \text{ atoms}$ ）では、 $1 \times 10^{22} \text{ atoms/s}$ が単位時間当たりの最大入射粒子数なので、必要な排気粒子束としては約 $20 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。閉構造化した際、ダイバータ室内の中性粒子圧力を開いたダイバータ部より一桁程度高い $1 \sim 10 \text{ Pa}$ のオーダーまで上げることができれば、目標とする排気粒子束を達成するのに必要なダイバータ部排気系の現実的な設計をすることができる。その結果、ダイバータの閉

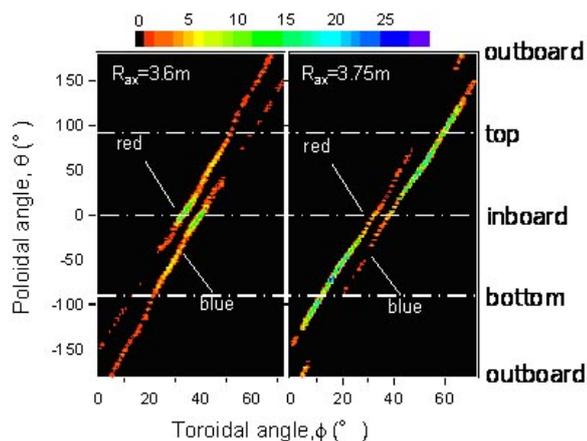


図 4. 1. 1. 2-1 ランダムウォーク過程を取り入れた KMAG コードを用いた磁力線追跡計算による、ダイバータ上の粒子負荷分布予測 ($\lambda=0.2\text{m}$, $\delta=0.6\text{mm}$)。磁力線追跡の出発点は最外殻磁気面近傍に設定。

構造化により、効率的なリサイクリング及び不純物制御、並びに長時間放電における粒子制御が可能となる。リサイクリング粒子をダイバータ部に閉じ込めることができれば、主プラズマ周辺部の中性粒子密度が低下するため、ヘリカルダイバータ配位で IDB (Internal Diffusion Barrier) 形成を伴う超高密度プラズマを再現性よく得ることが期待される。また、ダイバータ部の高い中性粒子圧力は、ダイバータデタッチメントの安定維持に寄与する可能性がある。

プラズマ閉じ込め性能が高い内寄せ配位を対象に、粒子負荷の大きいトラス内側部のダイバータを閉構造化することを設計指針として、ダイバータの閉構造化の検討を、EIRENE コードを用いて行った。図 4.1.1.2-2 に、トラス内側部に配置した種々のダイバータ構造における中性粒子密度を、現状の開いたダイバータ構造における中性粒子密度と併せて示す。同図 (d) に示すように、現状のダイバータ板を撤去して新たにバッフル構造のダイバータ板を配置し、さらにプライベート部ドーム構造を設置することにより、現状の開ダイバータの配位よりも桁高いダイバータ部圧力が得られることが分かった。

現状のダイバータ板の場合、プラズマが当たる面が主プラズマ側を向いているのに対して、閉構造ダイバータでは、ダイバータ板のプラズマが当たる面はプライベート部を見込むような配置になっている。これにより、ドーム構造下部に中性粒子を圧縮することができる。また、ダイバータプラズマ中で中性粒子が電離されて再度ダイバータ板へ戻ってくるプラズマプラギングの効果もあり、高い中性粒子圧力が得られている。この結果、ドーム構造下部の領域に排気装置を設置することにより、目標の排気粒子束を得る見通しが得られたため、本構造を採用して、閉構造ダイバータの設計を進めることとした。そして、トロイダル角 1 度毎のポロイダル断面でダイバータ板及びドーム構造の設置位置を決めて、図 4.1.1.2-3 に示す機器設置の基準図を作成した。

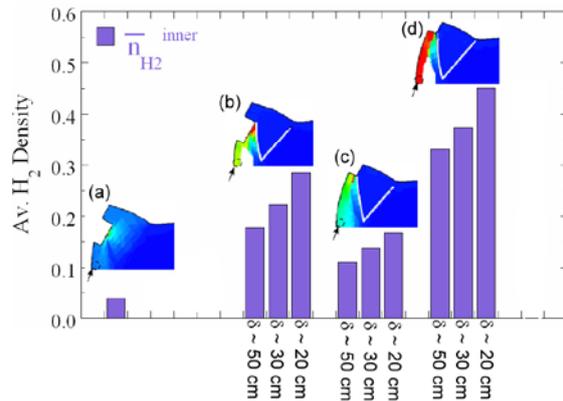


図 4.1.1.2-2 トーラス内側部ダイバータ構造検討。縦軸は真空容器赤道面（矢印で示す○の位置）における平均水素密度。(a) 現状の開ダイバータ、(b) 現状ダイバータにバッフル構造を追加、(c) ダイバータ板配置を変更し、バッフル構造を追加、(d) ダイバータ板配置を変更し、バッフル構造とドーム構造を追加。(d) の構造では、現状の開いたダイバータ配位 (a) に比べて、10 倍程度高い水素分子密度が得られている。

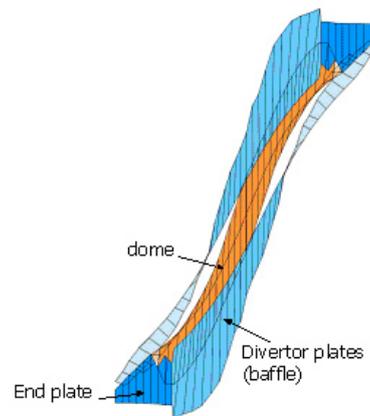


図 4.1.1.2-3 トーラス内側部に設置する閉構造ヘリカルダイバータの機器配置基準図

(2) ダイバータ板の構造検討

ダイバータ板構造については、LHD の実験目標の一つである加熱入力 3 MW での 1 時間放電に加え、30MW 入力の短パルス放電時の熱負荷にも耐えうるよう、現状のダイバータ板に比べて熱除去性能の高い構造を開発する必要がある。受熱面と冷却管が冶金的に接続された構造は大きなコストがかかるため、現状のダイバータ板と同様のボルトを用いた機械的な接続による構造で、上記の条件を満足するよう検討を行った。その結果、図 4. 1. 1. 2-4 に示すように、材料は等方性黒鉛とし、ステンレス製の冷却管を間に挟みこみ、ボルトを用いて固定する二分割型の構造とした。

現状のダイバータ板の場合、銅製のヒートシンクをステンレス製冷却管にボルトで固定し、その上に等方性黒鉛製ダイバータ板をボルトで固定しているが、銅ヒートシンクの温度が 250°C を超えると、ヒートシンクが変形してダイバータ板との熱接触が劣化することが問題となっていた。二分割型のダイバータ板構造ではダイバータ板とヒートシンクが等方性黒鉛で一体構造となっているため、このような問題はなく、より高い熱負荷に耐えることができる。電子ビーム照射装置 ACT を用いた熱負荷印加試験と、有限要素法コード ANSYS を用いた実験結果の再現検討により、具体的な材料及び構造を決定した。図 4. 1. 1. 2-5 に、ACT における熱負荷印加試験において得られた、熱負荷に対する試験体各部の温度を示す。温度は熱負荷印加後の定常状態での値である。同図には、ANSYS コードによる計算結果も示している。ANSYS の結果は実験時の各部温度をよく再現しており、ANSYS により熱負荷印加時のダイバータ板温度などを予測できることが確認された。なお、閉構造ダイバータ設置に先立ち、二分割構造のダイバータ板は、ICRF を用いた長パルス放電時に特に熱負荷

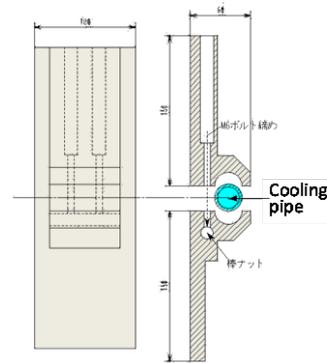


図 4. 1. 1. 2-4 二分割機械接続水冷ダイバータ板

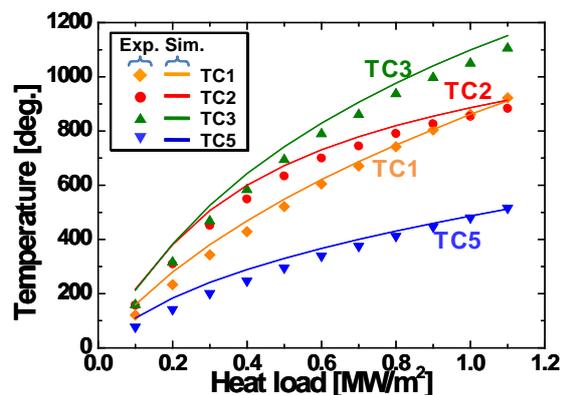
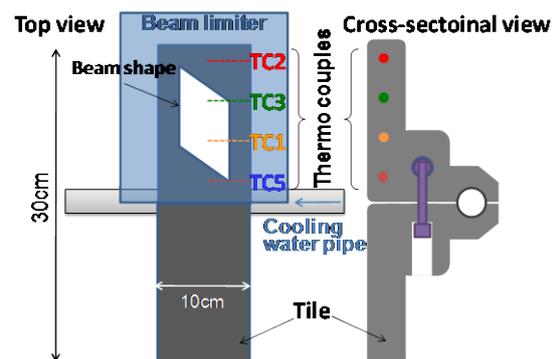


図 4. 1. 1. 2-5 (上) ACT におけるダイバータ板試験体の電子ビーム照射範囲 (白抜き部) と熱電対位置。(下) 熱負荷に対するダイバータ板試験体各部温度。シンボルは計測、実線は計算結果を示す。

の大きい一部のダイバータ板に適用して、その有効性を確認した。その結果も踏まえて、ドーム構造についてもダイバータ板と同様に、ステンレス製冷却管を等方性黒鉛製の二分割した板でドーム状に挟み込んでボルトで固定する構造とした。

図 4.1.1.2-3 に示す機器配置基準を基に、冷却管、ダイバータ板、ドーム構造を図 4.1.1.2-6 に示すように配置した。図には、現状の開ダイバータにおけるダイバータ板配置も比較のため示している。

(3) ダイバータ・クライオポンプの設計

ドームの下に設置するクライオポンプの設計は、中性粒子輸送コード EIRENE と有限要素法コード ANSYS を用いて進めた。図 4.1.1.2-7 にクライオポンプの構造を示す。液体ヘリウムを用いないクライオ・ソープション型を採用した。活性炭を接着したパネルに低温のヘリウムガスを流して冷却し、水素等の粒子をパネルに吸着して排気する。ドーム下に設置するポンプを見込むダイバータ板の温度が高くなるため、二重のシールド構造により、ダイバータ板からポンプへの熱輻射を遮へいする構造とした。ソープションパネルを取り囲むように液体窒素温度シールドのシェブロンを置き、その外側に水冷シールドのルーバを配置している。図 4.1.1.2-8 に EIRENE コードにより得られたポンプ内及びポンプ周りにおける中性粒子の軌跡を示す。こうした計算を基に検討して、高い排気効率の得られるシールド構造等を決めた。また ANSYS コードにより、クライオポンプに対するダイバータ板からの輻射及び中性粒子衝突による熱の影響を検討した。それにより、ソープションパネルへの熱侵入が問題にならないような水冷ルーバと液体窒素温度シェブロン構造を決定した。

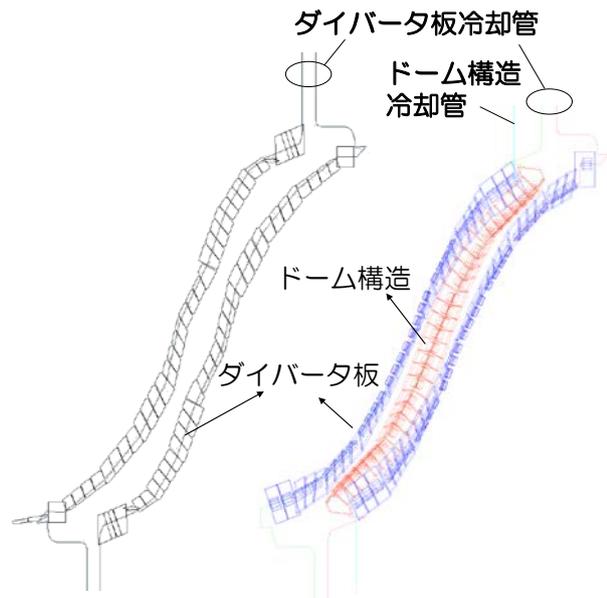


図 4.1.1.2-6 トーラス内側部におけるヘリカルダイバータの機器配置図。(右) 新型の閉構造ダイバータ。(左) 現状の開構造ダイバータ。

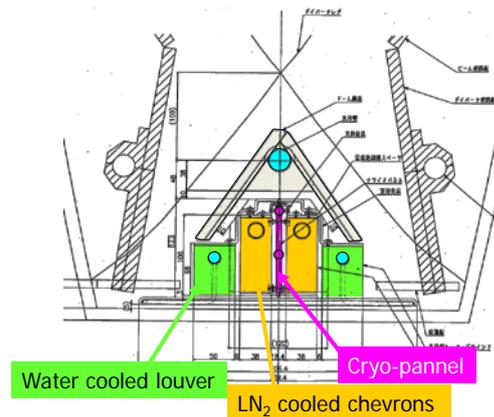


図 4.1.1.2-7 ドーム下に設置するクライオポンプの構造。

(4) 先行部分試験

平成 22 年度の第 14 サイクル実験開始前に、トロイダル 10 セクションの内 2 セクションに、新しいダイバータ板とドーム構造を試験的に設置した。排気装置はまだ設置せず、計画通りドーム下に中性粒子が圧縮されることの確認を目的とした。1ヶ所は 10.5-U-1-I-1.5-L (1-I ダイバータ) に、もう一ヶ所は 8.5-U-9-I-9.5-L (9-I ダイバータ) に設置した。前者は NBI 対向面の役割も兼ね、熱負荷の高い NB の照射

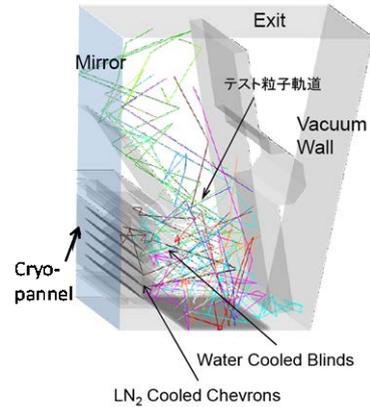


図 4.1.1.2-8 EIRENE コードで得られたクライオポンプ近傍の中性粒子の軌跡。

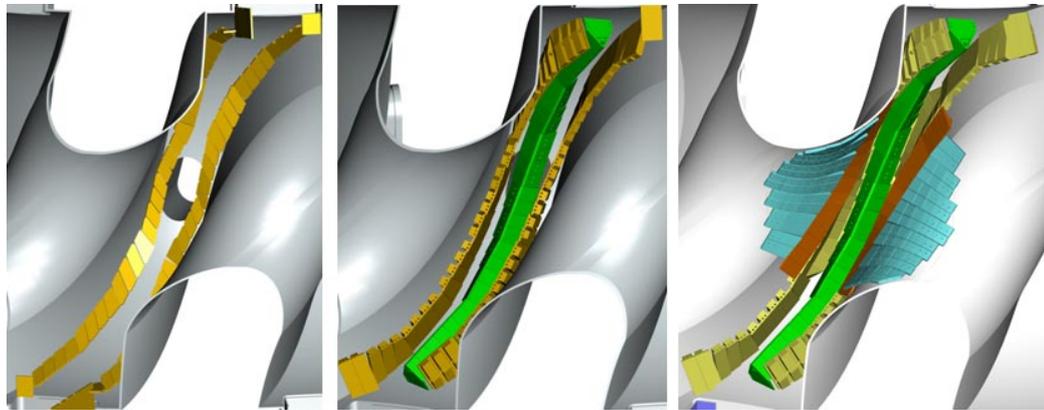


図 4.1.1.2-9 (左) 従来のダイバータ。(中) 9-I ダイバータ。(右) 1-I ダイバータ。1-I ダイバータは NBI 対向面を兼ねており、ビーム照射範囲はダイバータ板 (黄) とドーム (緑) だけでなく、図中赤及び青で着色した板を設置している。

面には、等方性黒鉛ではなく炭素繊維強化炭素材 (CFC 材) を用いている。図 4.1.1.2-9 に、トーラス内側部における従来の開いたダイバータと 1-I, 9-I ダイバータを示す。

また、図 4.1.1.2-10 に 9-I ダイバータの写真を示す。9-I ダイバータには、ダイバータ板に静電プローブ、ドーム下に高速イオンゲージを設置して、ダイバータ粒子束及び中性粒子圧力を計測した。図 4.1.1.2-11 に、比較的密度の高い放電におけるトーラス内側ダイバータ部赤道面近傍の中性粒子圧力を示す。開いたダイバータ部に比べて 9-I ダイバータでは、中性粒子圧力は概ね一桁高く、1 Pa 程度まで達しており、新しいダイバータ構造



図 4.1.1.2-10 9-I ダイバータの写真。

が、予測通り中性粒子をダイバータ部に圧縮できていることを示している。

以上の先行部分試験の結果とダイバータ・クライオポンプの設計を受け、平成23年度の第15サイクル実験終了後から、本格的なダイバータの閉構造化を開始した。まずは、トロイダル6セクション(2-I, 4-I, 6-I, 7-I, 8-I, 10-I)に、ドーム下のクライオポンプも含めて設置する。プラズマ実験による性能確認を行いながら、以降、ダイバータの閉構造化を順次進める計画である。これにより、LHD 最高性能化計画へ向けた重点整備項目である閉構造ダイバータの整備を完了させる予定である。

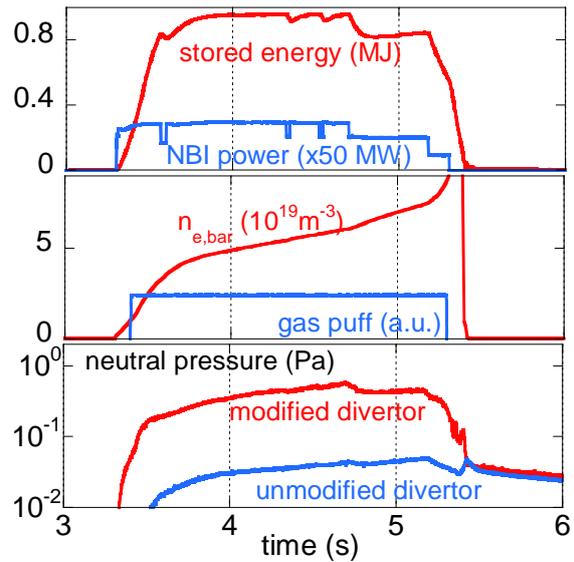


図 4.1.1.2-11 密度ランプアップ放電における、新しいダイバータ部と現状のダイバータ部の中性粒子圧力。

4. 1. 1. 3 燃料供給装置

LHD における燃料供給装置には、ガスを入射するガスパフ装置と固体水素ペレットをその場生成して入射する固体水素ペレット入射装置の 2 種類がある。この両者を組み合わせて用いることで、プラズマ実験において柔軟かつ適切にプラズマ密度を制御することが可能となっている。

ガスパフ装置はトーラスの複数個所に設置されており、多様なガス種を任意の流量でプラズマへ供給できる。LHD 実験開始より現在まで、ほぼ全てのプラズマ実験で多様な密度制御の要求に対応し、それらの効率的遂行に寄与してきた。それに加えて、グロー放電洗浄や真空容器内圧力を高めて行う計測装置の較正などでも活用されている。平成 22 年度の第 14 サイクル実験より新たに、超音速ガスパフ (SuperSonic Gas Puff, 以下 SSGP) 装置を導入した。従来のガスパフ装置ではピエゾ素子を用いたバルブが使用されてきたが、SSGP 装置ではより高ガス圧で高速動作が可能な電磁ソレノイドバルブを採用し、これに超音速ガス流を発生するためのラバールノズルを装着して、収束したガス流が発生できるよう工夫がなされている。SSGP 装置の導入によって、プラズマ生成における制御性が高まり、低密度から高密度まで多様かつ精密な密度制御を可能にした。ここでは、新たに導入された SSGP 装置について報告する。

LHD の固体水素ペレット入射装置には、射出バレル内に生成した比較的大きなペレットを高圧ヘリウムガスによって高速射出するその場生成パイプガン方式、連続的にロッド状固体水素を生成し、これを切断したペレットを高圧ヘリウムガスで射出するスクリュウ押し出し生成パイプガン方式、及び射出バレル内に生成したペレットをソレノイド駆動するピストンで機械的に打ち出すメカニカルパンチ方式の 3 種類がある。ガスパフがプラズマ周辺部への粒子供給を行うのに対し、固体水素ペレット入射ではよりプラズマ中心部に直接粒子を供給できるため、粒子供給効率が高い。この特徴を生かして、超高密度 (Super Dense Core, SDC) プラズマを生成することが見出されており、これまでに $1 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ を超える中心電子密度が達成されている。第 14 サイクル実験からはパイプガン方式のバレル数がそれまでの 10 から 20 に増強され、より高密度のプラズマ生成や高密度プラズマの準定常保持を可能とするなど、LHD プラズマ実験に貢献した。また、将来のヘリカル型核融合炉における燃料供給手法の確立を視野に、ペレットの溶発に関する理論的検討も進めている。

(1) 超音速ガスパフ (SSGP) 装置

SSGP ではラバールノズルを装着したソレノイドバルブから高圧ガスを噴出し、収束したガス流をプラズマに吹き付けることで粒子供給を行う。第 14 サイクル実験ではスロート部の直径が 0.1mm、0.3mm、及び 0.6mm (以下、 $\phi 0.1$ 、 $\phi 0.3$ 、及び $\phi 0.6$ と呼ぶ) の 3 種類のラバールノズルを用いた。これらは全てマッハ数 8 (ラバールノズル内部ガス流路変曲点の角度は 12 度) で設計され、断面形状は相似形である (図 4. 1. 1. 3-1 参照)。第 15 サイクル実験ではこれらのうち、 $\phi 0.1$ を $\phi 0.6$ でマッハ数 11.5 (変曲点角度は 4 度、全長約 40cm) のものへと変更した。テストスタンドにおける基

礎実験の結果、ラバーノズルを装着することでガス流の拡散半角を 22.5 度から約 10 度以下に抑えられることが確認されている（図 4.1.1.3-2 参照）。

SSGP で使用しているソレノイドバルブは、最大 80 気圧までの高い一次ガス圧で動作可能であることを最大の長所としている。最小開閉時間も 1 ms 以下であり、高速のオンオフ動作が可能である。テストスタンドにおける試験では、最大で 500Hz の繰り返しオンオフ動作が確認できている（図 4.1.1.3-3 参照）。なお、通常的气体パフ装置で用いられているピエゾバルブの動作可能最大一次ガス圧は 4 気圧程度、最小開閉時間は 1 ～数 ms 程度である。LHD において SSGP の繰り返し入射を試みたところ、最高で 200Hz の密度変調を励起できた（図 4.1.1.3-4 参照）。

SSGP でも通常的气体パフと同様に、ガス種を水素／ヘリウム／メタン／窒素／ネオン／アルゴン等から任意に選べる。使用するラバーノズルとガス種、一次ガス圧の組み合わせによって、ガス流量は約 $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ から約 $800 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ の範囲で設定できる。このような長所を有する SSGP は、低密度から高密度までの精密な密度制御を可能にするツールとして、既に多くの実験で用いられている。不純物ガス入射実験におけるインパルスの不純物ガス導入、あるいは ICRF マイノリティ加熱実験における水素－ヘリウム比制御などにも用いられ、これら実験の効率的な遂行に寄与している。

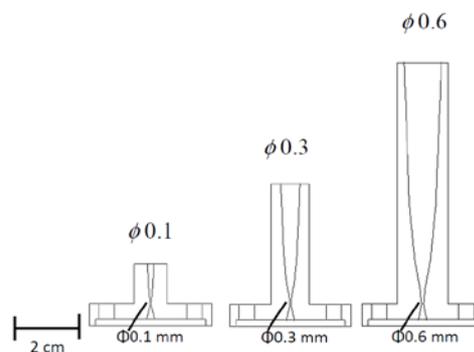


図 4.1.1.3-1 第 14 サイクル実験で用いられた 3 種類のラバーノズルの断面図。

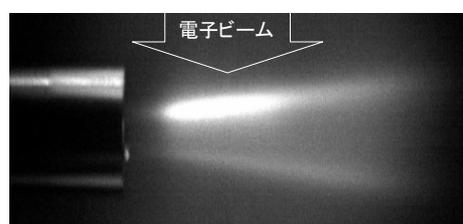


図 4.1.1.3-2 電子ビーム照射により可視化した He 超音速ガス流。拡散半角は約 10 度。

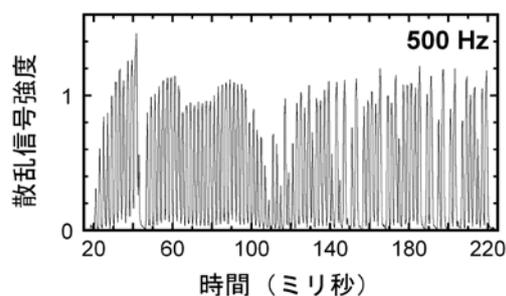


図 4.1.1.3-3 ソレノイドバルブ 500Hz 動作試験の例。クラスター化した水素ガス流からのレーザー散乱光を高速カメラで計測した。

(2) その場生成パイプガン方式固体水素ペレット入射装置

その場生成パイプガン方式固体水素ペレット入射装置は LHD 実験初期から導入され、例えば IDB (内部拡散障壁) プラズマの発見等、LHD プラズマの高性能化に寄与してきた。平成 22 年度第 14 サイクル実験より、IDB プラズマの長時間維持可能性を明らかにすることを目的として連続射出性能を従来の 2 倍に増強し、20 連発の射出を可能とした。同時に、プレプログラミングによるペレット入射タイミング設定に加えて、干渉計からの線密度信号、または制動輻射信号を目標値と比較してペレット入射タイミングを決めるフィードバック制御を導入した。これにより、密度限界に近い高密度プラズマを、放射崩壊に至らしめることなく準定常維持することに成功した。

図 4.1.1.3-5 にフィードバック制御を適用した典型的放電波形 (#104258) を示す。この放電ではプレプログラムによって 3 発のペレットを入射し、 $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の高密度プラズマを生成している。その後フィードバック密度制御に移行し、線平均密度の下限が $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ となるようにペレット入射制御を行っている。コア部への直接粒子供給によって、温度・密度は大きく擾乱を受けるものの、尖塔化した密度分布が維持できている。この時、フィードバック制御によってペレット入射タイミングにおける線平均密度は一定値 ($2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) を保っている一方で、中心密度は放電時間の経過とともに減少し、周辺密度は増加している。また、一定の線平均密度を維持するために必要なペレット入射間隔も、放電時間とともに長くなっている。これらのことは、高密度プラズマの長時間維持に伴ってリサイクリングの増加が引き起こされ、周辺プラズマ密度が増加していることを示している。今後さらに長時間高密度プラズマを維持するためには、ペレット入射によるコア部への効果的な粒子供給に加えて、閉構造ダイバータによる強力な周辺排気が必須である。

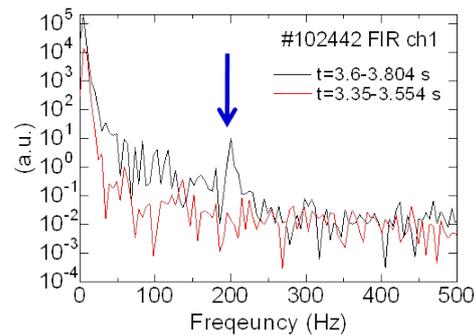


図 4.1.1.3-4 LHD 実験における 200Hz 繰り返し SSGP 入射時の密度揺動スペクトルの例。200Hz にクリアなピークが観測された。

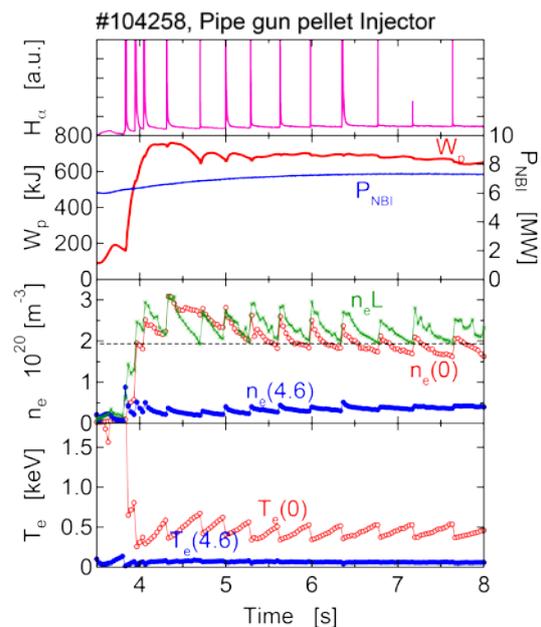


図 4.1.1.3-5 典型的なペレット入射密度フィードバック放電波形。

このように、ペレット入射装置の増強によって、LHD の運転密度領域をより高密度へ拡大するとともに、その長時間維持を可能にした。

一方でペレット入射の粒子供給特性はペレット溶発挙動と密接な関係があることがわかりつつある。ペレット溶発挙動を定量的に調べて燃料供給法の確立に資するため、ペレット溶発プラズモイドの内部パラメータを同定する計測手法を開発している。複数の狭帯域光学フィルターを通して同一のプラズモイドを一台の高速カメラで同時撮像し、それらの信号強度比からプラズモイドの電子密度と電子温度を評価する分光イメージング計測を開発し、実験に適用した。このようなペレット溶発過程の分光イメージング計測により、溶発プラズモイド内部のパラメータを二次元のイメージとして定量評価することが可能となり、その温度・密度分布を明らかにした（図 4.1.1.3-6 参照）。こうしたペレット溶発光のステレオイメージング計測によって、ペレット溶発プラズモイドの弱磁場方向への非拡散的輸送を観測した。

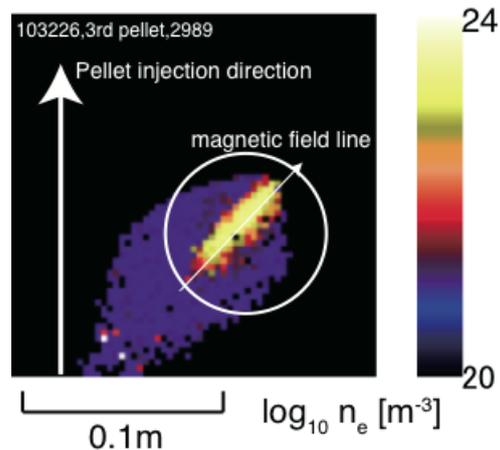


図 4.1.1.3-6 分光イメージング計測の例。

電子密度は対数スケールで表示している。○で囲まれた部分にペレット溶発プラズモイドのイメージが示されている。

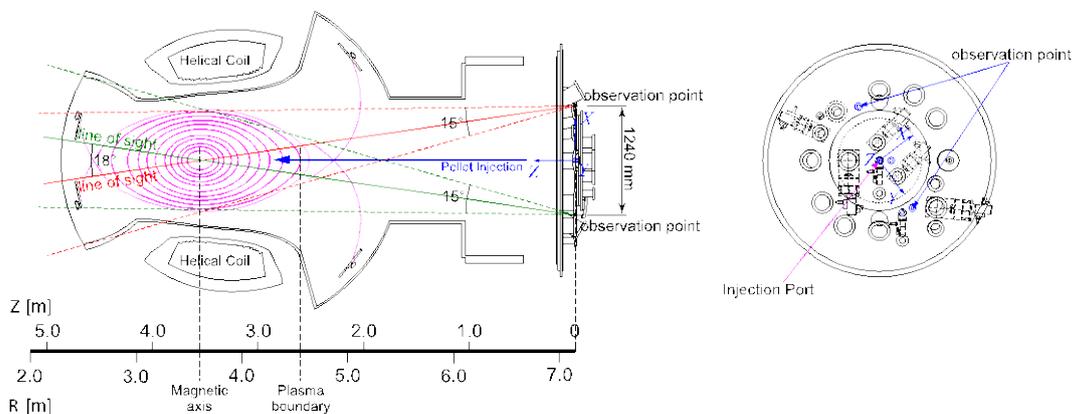


図 4.1.1.3-7 ステレオイメージング計測の概略図。位置の異なる 2 視点からの同時撮像を行うことで視線奥行き方向も含めたペレット溶発プラズモイドの三次元的な位置情報が得られる。

(3) メカニカルパンチ方式固体水素ペレット入射装置

ペレット溶発発光のステレオイメージング計測（図 4.1.1.3-7）によって、ペレット溶発プラズモイドの非拡散的輸送が明らかにされている。この現象は、ペレットによって供給された粒子が背景プラズマに吸収される前に輸送され、粒子供給特性

に影響を与えていることを示している。一方で、この非拡散的輸送は閉じ込め磁場の勾配によって駆動されていることが予測されている。これを検証するため、磁場構造の異なる任意の場所からペレットを入射可能なメカニカルパンチ方式のペレット入射装置の開発を行った。本装置の特徴は、ソレノイド駆動ピストンによって 250m/s 以下の低速でペレットを射出するため、湾曲したガイド管を用いた任意の場所からのペレット入射を可能としていることにある（図 4.1.1.3-8 参照）。

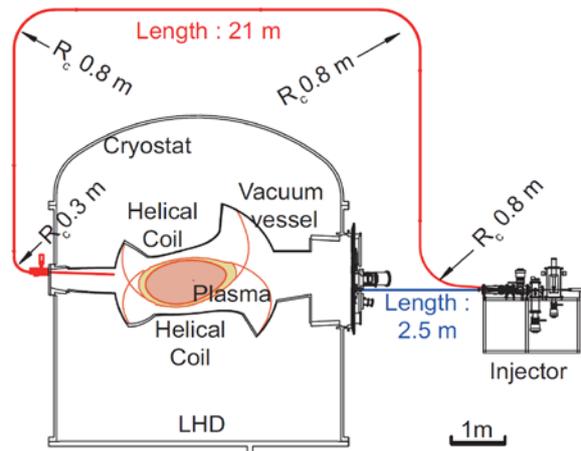


図 4.1.1.3-8 湾曲ガイド管を用いた低速ペレット入射の配置図。低速ペレットを用いることによって湾曲ガイド管中でペレットが破碎される確率を低減している。

（４）ペレット入射に関する理論的検討

実験と並行して、ペレット溶発プラズモイドの非拡散的輸送の理論モデル構築を進めるなど、ペレット入射による粒子供給の特性を包括的に理解することを目指した研究も行っている。

LHD ではペレットの溶発が一般的な中性ガス遮蔽モデルの予測よりも早いことが観測されており、加熱用中性粒子ビーム入射 (NBI) の影響を考察する必要性が指摘されていた。このため、ペレットの溶発現象に及ぼす NBI に起因する高速イオンの影響を考慮した理論モデルを構築した。同モデルを用いて実験結果の解析を行ったところ、LHD 実験では高速イオンによる溶発が支配的であることが明らかとなった。

ペレット溶発光の観測によるペレット溶発位置と、トムソン散乱計測による粒子の供給位置が異なることが LHD や他の装置で観測されており、これには溶発プラズモイドの非拡散的輸送現象が関与していると考えられてきた。LHD における実験結果を考察するため、プラズモイドの非拡散的輸送現象を記述可能なフランスの Tore Supra で開発された計算コードをベースに、国際共同研究を通じて、3次元磁場構造に対応できるよう拡張した。同コードによる計算の結果、実験結果は非拡散的輸送現象の効果として説明できることが示されている。今後は、これを用いてトカマクとヘリカル磁場の垣根を越えた物理的議論が展開され、環状プラズマの総合的理解に関する学術研究の進展に寄与するものと期待される。

(5) 今後の展望

燃料供給装置は今後も引き続き LHD 実験の基盤を支えていくが、LHD の性能をさらに高めて、国際的に高い水準の研究成果が得られるよう、並行して以下のような研究を進めることも計画している。

SSGP 入射実験においては、収束したガス流がプラズマに接触・電離される過程を詳細に調べるため、ペレット溶発の計測で成功を収めた高速カメラによる分光イメージング計測を行う。これにより SSGP によって供給された粒子の拡散及びプラズマの温度分布に対する擾乱を調べることができる。

ペレット入射実験に関しては、分光イメージング計測を用いたペレット溶発挙動の精密観測を引き続き行い、得られた溶発プラズモイド内部の電子密度・電子温度分布情報を基に理論モデルの検証を行う。溶発素過程を理解することでペレット溶発挙動の精密な予測を可能とし、燃料粒子供給特性を考慮した燃料供給法の最適化に貢献することを目指す。なお、有効性が認められた分光イメージング計測に関する英国・カラム研究所との共同研究を通して、トカマクとヘリカルと比較研究を行い、ペレット溶発挙動の総合的理解を図る。

ペレット入射に関する理論的検討として、仏・CEA カダラッシュ研究所との海外共同研究によるペレット溶発計算コードの改良を進め、ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 の設計に活用する。

4. 1. 2 加熱機器

LHD のプラズマ生成・加熱には、中性粒子入射 (NBI) 加熱装置、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) 装置およびイオンサイクロトロン周波数帯加熱 (ICRF) 装置が使われている。LHD プラズマの性能向上および動作領域の拡大は、これら加熱装置の性能に大きく依存しているため、着実にその増強・整備を行う必要がある。この間の NBI の性能向上と増強は、イオン温度の上昇とベータ値の増加をもたらした。ECH の増強と加熱技術の向上は、電子温度の上昇と電子加熱の密度領域の拡大を実現した。また、ICRF の改造・整備は、より高密度・高温条件下での定常実験を進展させた。一方、重水素実験を柱とする LHD 最高性能化計画に向けて、NBI を主として、ECH および ICRF も含めた加熱装置の増強を進める必要があり、同時に、重水素実験への対応および加熱シナリオの検討が必要である。このように、加熱機器の増強・整備は、LHD の高性能化に直接寄与してプラズマ性能の向上に貢献することが求められると共に、LHD 最高性能化計画を踏まえて、将来のヘリカル型核融合炉への適用を見据えた機器開発の観点からも、着実に取り組むことが必要である。

本節では、LHD プラズマの性能向上に直接的に寄与する加熱装置の増強・整備の進展、および LHD 最高性能化計画へ向けた増強・整備計画とその準備研究について報告する。

4. 1. 2. 1. 中性粒子ビーム入射加熱装置

LHD には負イオン源を用いた高エネルギー接線入射 NBI が 3 台設置されており、LHD プラズマの高性能化に貢献してきた。平成 17 年度の第 9 サイクル実験には、プラズマの動的制御の可能な汎用真空容器装置を設置して、それを用いた低エネルギー NB 垂直入射を開始し、LHD プラズマの高イオン温度領域の拡大に寄与すると共に、精密なイオン温度の分布計測を可能とした。さらに、平成 22 年度の第 14 サイクル実験には、プラズマ生成制御装置を設置して、その粒子ビーム供給制御機能を用いて、低エネルギー NB 垂直入射加熱能力を増強した。それにより、LHD プラズマの高イオン温度領域はさ

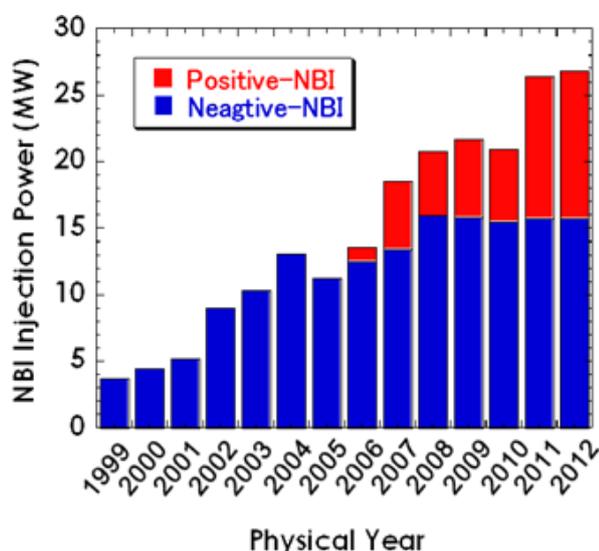


図 4.1.2.1-1 高エネルギー接線入射 NBI 装置による入射電力 (negative-NBI) と、汎用真空容器装置とプラズマ生成制御装置による低エネルギー垂直入射加熱電力 (positive-NBI) の実験サイクルごとの変遷。

らに拡大し、7 keV を超すイオン温度が得られた。

図 4.1.2.1-1 に、高エネルギー接線入射 NBI 装置による入射電力と、汎用真空容器装置とプラズマ生成制御装置による低エネルギー NB 垂直入射加熱電力の実験サイクルごとの変遷を示す。また、図 4.1.2.1-2 には、主要な LHD プラズマパラメータの変遷を示す。これらより明らかなように、中性粒子ビーム入射加熱電力の増強は、イオン温度、密度、ベータ値等の LHD プラズマの性能向上に直接的に貢献しており、また、閉じ込め、輸送、MHD 等の物理実験に対しても、広範なパラメータ領域を提供するなど、国際的に高い水準の研究成果に対する寄与も極めて大きい。

重水素実験を柱とする LHD 最高性能化計画では、汎用真空容器装置とプラズマ生成制御装置による低エネルギー NB 垂直入射加熱機能を改造・増強して、重水素入射 NBI 装置にする計画である。そのための検討を重水素正イオン源の設計を中心に進めており、そのための正イオン源の試験を実施し、設計の妥当性を確認した。

以下では、低エネルギー NB 垂直入射加熱機能の整備・増強、および高エネルギー接線入射 NBI 装置の運転性能と信頼性の向上について報告する。併せて、重水素実験に向けた NBI 装置の検討および重水素正イオン源設計のための試験結果についても報告する。

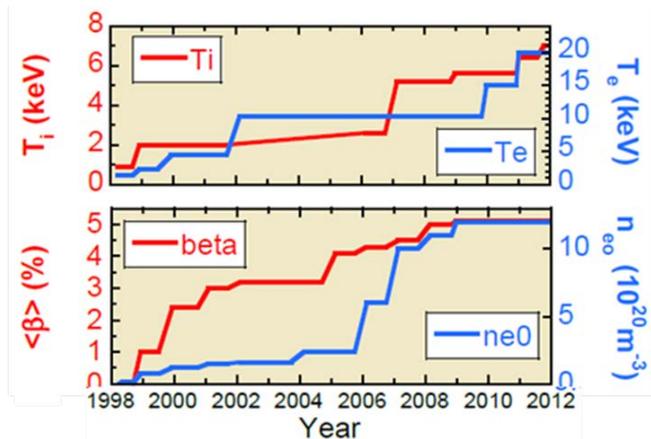


図 4.1.2.1-2 主要な LHD プラズマパラメータの実験サイクルごとの変遷。

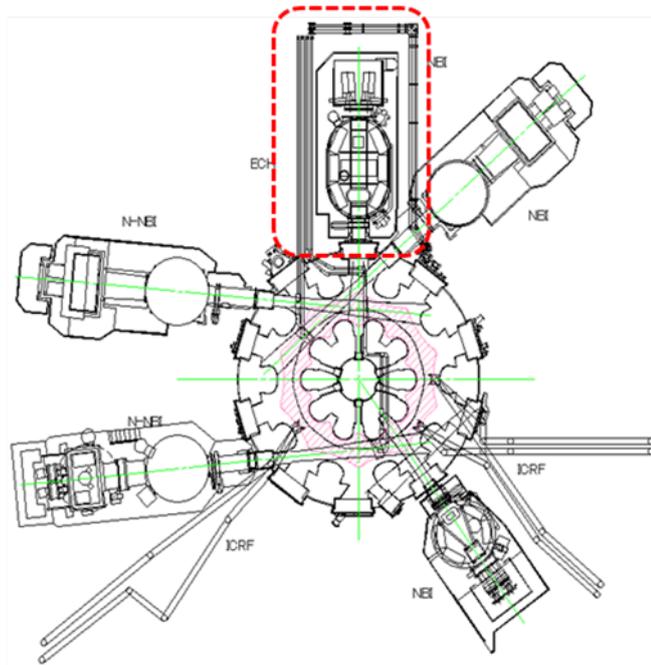


図 4.1.2.1-3 LHD における高エネルギー接線入射 NBI 装置、汎用真空容器およびプラズマ生成制御装置の配置図。赤線で囲んだ装置がプラズマ生成制御装置で、その粒子ビーム供給制御機能を用いて、低エネルギー NB 垂直入射を行う。

(1) 低エネルギーNB 垂直入射加熱機能の整備・増強

LHD では、目標プラズマパラメータであるイオン温度 10keV を目指して、イオン加熱電力の増強を進めている。汎用真空容器装置による低エネルギーNB 垂直入射機能の整備・増強に引き続き、平成 20 年度から 3 年かけてプラズマ生成制御装置を設置し、その粒子ビーム供給制御機能を用いて、平成 22 年度に低エネルギーNB 垂直入射加熱電力を増強した。4 台の正イオン源を用いて、磁力線に対して垂直方向に低エネルギー (40keV) の中性粒子ビームを入射する。

入射した低エネルギービームは、主にイオンを加熱するため、LHD における高イオン温度領域の拡大に貢献している。

図 4.1.2.1-3 に、プラズマ生成制御装置を示す。その粒子ビーム供給制御機能により、パルス幅 2 秒で 40keV/6MW の水素ビームが入射できるよう設計した。なお、将来の重水素実験では、80keV/9MW の重水素ビームが入射できるように改造・増強を行う計画である。

図 4.1.2.1-4 に、平成 22 年度の第 14 サイクル実験における、この低エネルギーNB 垂直入射のビームエネルギー及び入射電力の変遷を示す。図からわかるように、入射開始後 1,000 ショット程度で設計入射エネルギーの 40keV に、2,000 ショット程度で設計入射電力の 6 MW に到達した。その結果、低エネルギーNB 垂直入射加熱電力は、汎用真空容器装置による 7 MW から合計 13 MW へと増加し、これに伴い、LHD の最高到達イオン温度を 5.6keV から 6.4keV へと増加させることができた。さらに、平成 23 年度の第 15 サイクル実験では、7 keV を超えるイオン温度の達成に貢献した。

(2) 高エネルギー接線入射 NBI 装置の性能向上

負イオン源を用いた高エネルギー接線入射 NBI 装置は、LHD の実験開始当初から主加熱装置として、LHD プラズマの性能向上とパラメータ領域の拡大に大きな貢献をしてきた。また、接線入射 NBI 加熱プラズマは、大部分の物理テーマ実験の対象となっており、接線入射 NBI のビーム入射の成功率 (ビームの安定性) は効率のよい実験と

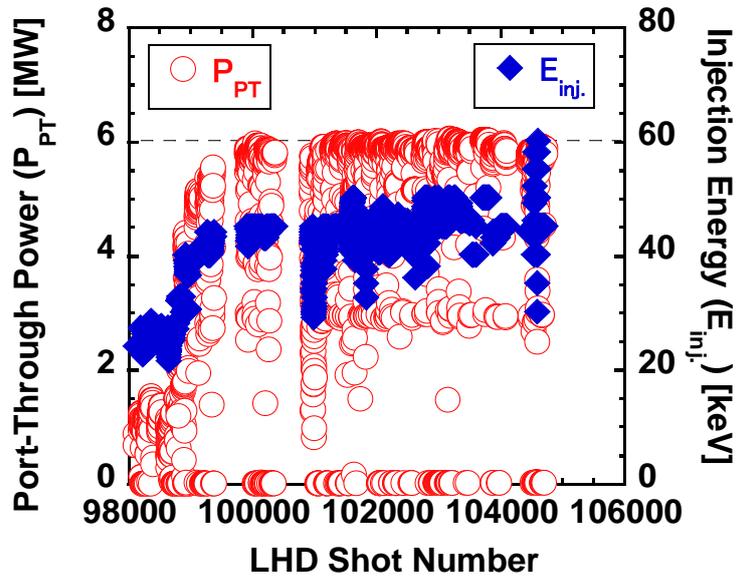


図 4.1.2.1-4 平成 22 年度の第 14 サイクル実験に稼動したプラズマ生成制御装置の低エネルギー垂直 NB 入射機能による入射エネルギー及び入射電力の変遷。

高い水準の研究成果に直結する。そのため、接線入射NBIのビーム電力増加と安定動作を目指した開発研究を行ってきた結果、負イオン源を用いた接線入射NBI装置3台による合計入射電力は、所期の定格の15MWを上回る16MWを達成した。また、さらなる性能向上を目指して、負イオン源における負イオン生成の最適化に関連した基礎研究を行っている。

負イオンNBIによる高エネルギー接線入射プラズマ加熱は、平成10年の第2サイクル実験に1号機(BL1)と2号機(BL2)の2台を用いて開始した。平成13年度の第5サイクル実験では、3号機(BL3)を増設し、その後、各入射装置の負イオン源の改造および性能向上、ビーム入射技術の蓄積等により入射電力の増加を図った。その結果、図4.1.2.1-5に示すように、負イオンNBIによる入射電力は年毎に増大し、平成19年度の第11サイクル実験に、負イオンNBIの仕様である3台合計の入射電力15MWを超える16MWのビーム入射電力を達成した。以降、15MWを超える入射電力により、LHDプラズマ性能の向上に貢献している。

NBI用負イオン源では水素負イオン電流の増加のため、セシウム(Cs)蒸気をイオン源のプラズマ室内に導入する。Cs導入量の適正值から過不足がある場合にはビーム加速電極間でブレークダウンが発生するが、このブレークダウンが多発するとNBIの動作が不安定になり、入射成功率が低下する。Cs導入率とブレークダウンの相関を調査するため、異なる1日当たりのCs導入量での入射電力分布を調べた結果を図4.1.2.1-6に示す。ここで、2007年度と2009年度のCs導入率は、それぞれ1日当たり0.18gと0.10gである。両者の入射電力分布を比較すると、2007年度では広い分布を持っているが、これはブレークダウンのためにビームエネルギーを頻繁に下げた結果である。一方、より少ないCs導入率でNBI運転を行った2009年度では、入射電

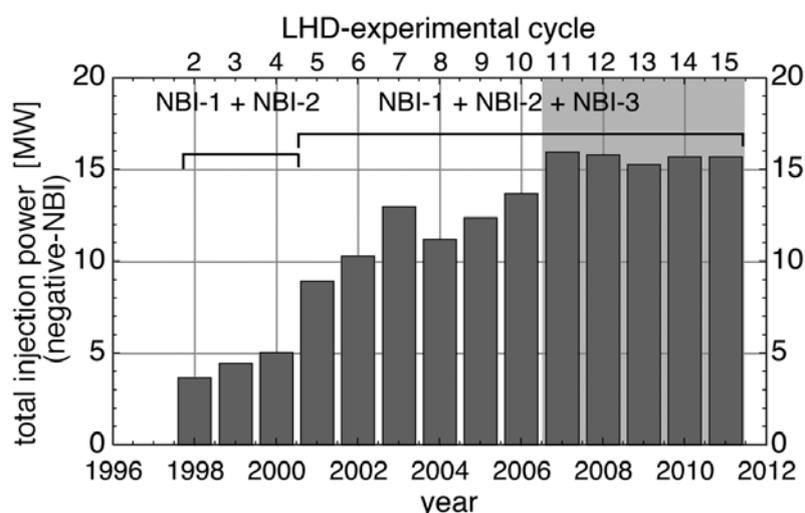


図 4.1.2.1-5 負イオンNBIの合計最大入射電力の年毎の進展。2000年度(第4サイクル実験)までは2台、2001年度の第5サイクル実験からは3台の負イオンNBIで入射。

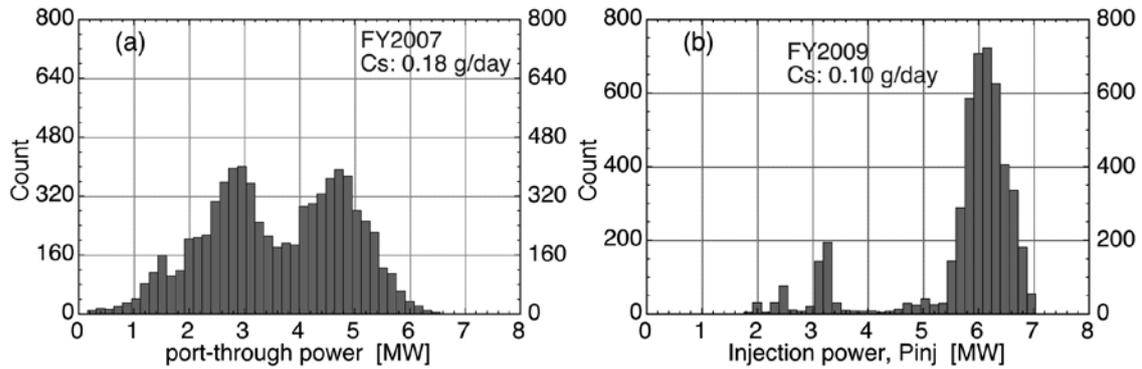


図 4.1.2.1-6 (a) 2007 年度と (b) 2009 年度の NBI 1 号機 (BL1) による入射電力分布。

力分布は 6 MW 付近に集中しており、安定した入射が行われたことがわかる。なお、入射成功率を設定ビームパルス幅に対する実際の入射パルス幅と定義した場合、6 MW 付近にあるピーク領域での入射成功率は 90%に達する。

低 Cs 導入による安定な NBI 運転を行うことにより、加速電極のブレークダウンによるダメージが減少し、結果として、図 4.1.2.1-7 に示すように、NBI 1 号機では定格の 5 MW を大きく上回る 6.9 MW のビーム入射電力を達成した。なお、この時加速された水素負イオン電流密度は 340A/m^2 であり、ITER-NBI における仕様値である 280A/m^2 を凌いでいる。また、Cs 導入の最適化、イオン源内プラズマの均一性、そしてパービアンス整合の調整により、NBI 2 号機と 3 号機でも、図 4.1.2.1-8 に示すように、入射電力の定格の 5 MW を超える 5.6 MW と 5.4 MW をそれぞれ達成した。こうした負イオン NBI 装置の性能向上は、LHD プラズマの性能拡大をもたらし、国際的に高い水準の研究成果に大きく貢献した。

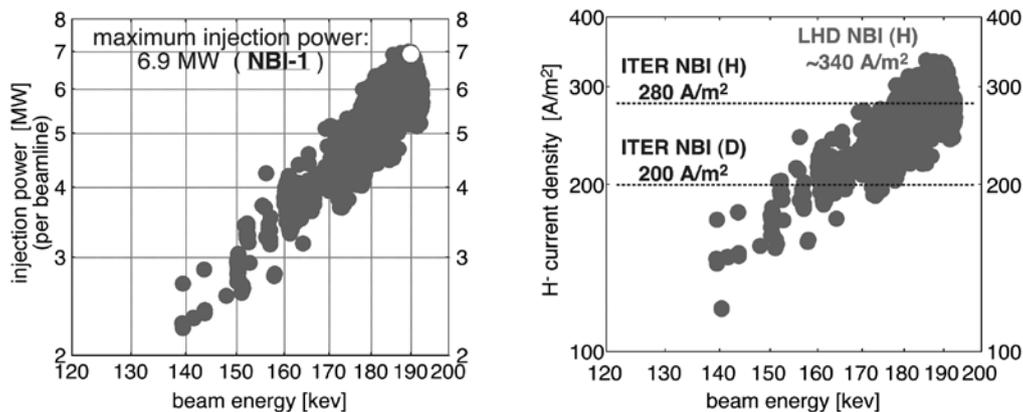


図 4.1.2.1-7 (a) 6.9 MW 入射達成時のビームエネルギーに対するビーム入射電力、及び (b) 水素負イオン電流密度。

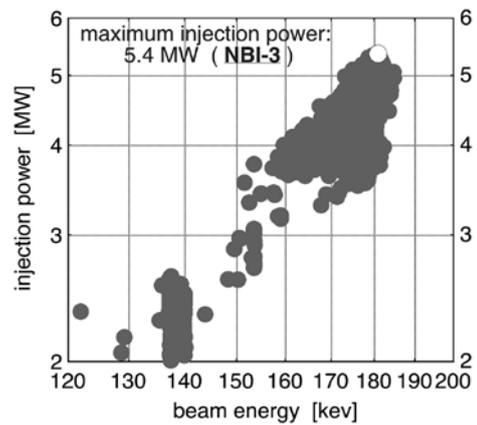
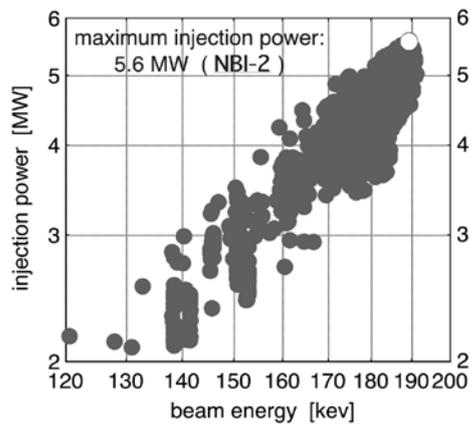


図 4.1.2.1-8 NBI 2号機 (左) 及び 3号機 (右) での入射ビーム電力の定格値の達成。それぞれ 5.6MW と 5.4MW の入射を達成。

(3) 負イオン源性能向上に向けた研究

負イオンNBIの性能をさらに向上させるため、負イオン源における負イオン生成と引き出しの最適化を目指した研究を行っている。負イオン源内での負イオン生成、ビーム引出し領域への負イオンの輸送、ビーム引出しという一連の過程の物理を理解し、負イオン源へフィードバックするために、複数の計測器を用い、ビーム引き出し領域の負イオンをはじめとする各種粒子と電位の計測を行った。負イオン源と設置した計測器の配位を図 4.1.2.1-9 に示す。なお、各計測器による測定量は次の通りである。

- ・キャビティリングダウン (CRD) : 水素負イオン密度 (絶対測定)
- ・ミリ波干渉計・表面波プローブ (SWP) : 電子密度測定
- ・静電プローブ : イオン源プラズマ状態の測定、水素負イオン電流と電子電流の比較
- ・分光器 : 水素負イオン密度測定、中性粒子密度測定、電子密度評価

また、ビーム引出しによる水素負イオン電流、電子電流と上記負イオン源プラズマ内の測定量の比較を行い、負イオン源プラズマ内部の粒子密度とビームとの相関を取った。ここでは、その結果の概略を示す。

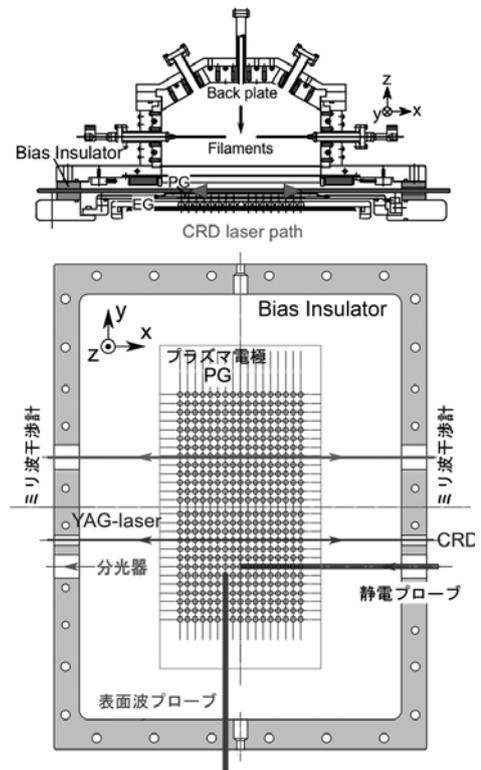


図 4.1.2.1-9 負イオン源と H⁻生成・輸送測定のための各計測器の配位

キャビティリングダウン (CRD) 法は水素負イオンの光中性化過程を利用して、レーザー光の減衰率により水素負イオン H-密度を測定する手法である。CRD 法では、1 対のキャビティ鏡間に多重反射させてレーザー光の吸収効率を上げることにより、誤差 1 % という極めて高い H-密度の測定精度を持っている。ここでは、20Hz の時間分解能と、ペローズによる空間走査を実現して、H-密度の時間変化と空間分布を測定することを可能としている。

図 4.1.2.1-10 に、プラズマ室とプラズマ電極間に印加するバイアス電圧を変化させたときの CRD 法により測定した H-密度 $n(H^-)$ と、放電電力 P_{arc} の時間変化を示す。イオン源内のプラズマは時刻 -8 秒前後から生成され、時刻 0~1 秒に負イオンビーム引出しが行われているが、バイアス電圧値によって、ビーム引出し前後の H-密度変化の状態に相違があることがわかる。低いバイアス電圧印加時では、ビーム引出し時間中ステップ状に H-密度が低下している。このように、生成される負イオン密度の高い負イオン源プラズマでは、動作条件により負イオン密度と引き出される負イオン電流との関係が変化するため、その機構を詳細に調べることにより、さらなる負イオン源の高性能化を行う計画である。

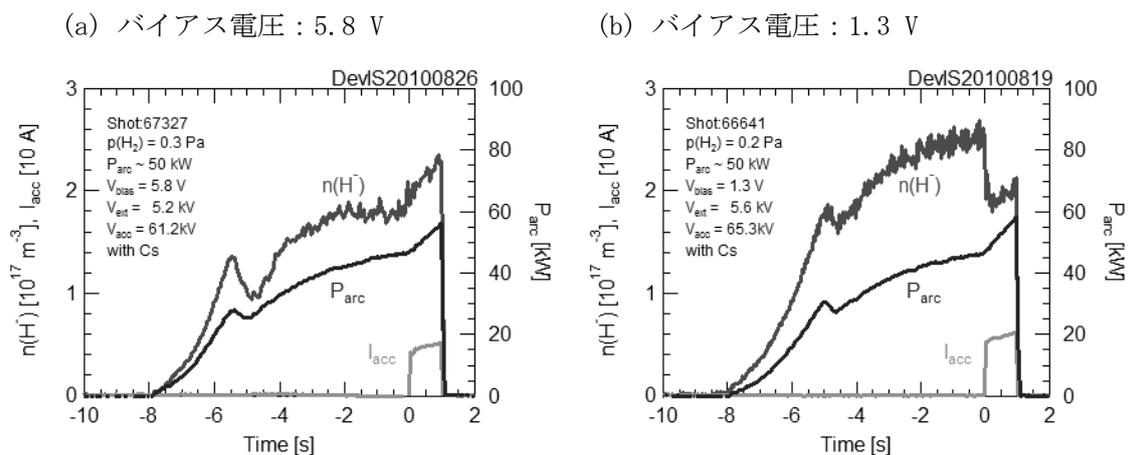


図 4.1.2.1-10 バイアス電圧を (a) 5.8 V および (b) 1.3 V 印可した場合の H-密度の時間変化の相違。

Cs を負イオン源内に導入すると、イオン源から引出される H-電流が増大するのにともない電子電流が減少する。Cs 導入量を負イオン引出しに対して最適化した結果、イオン源内の電子成分は1%以下となった。このようなプラズマの特性を静電プローブと CRD を組み合わせて測定した。図 4. 1. 2. 1-11 に Cs を十分導入した場合の引出し領域プラズマのプローブ特性（電圧・電流特性）を示す。中央部の×点はプローブ曲線の変曲点を示すが、この変曲点を中心にして極めて対称な特性が得られている。このようなプラズマは、電子密度が極端に低く正イオンと負イオンのみから構成されるイオン性プラズマであることを示している。負イオン密度を増加させた結果生成されたイオン性プラズマでは、イオンの引き出し界面に電子によるシースが形成されないため、高密度負イオンの引き出しの最適化を今後進める計画である。

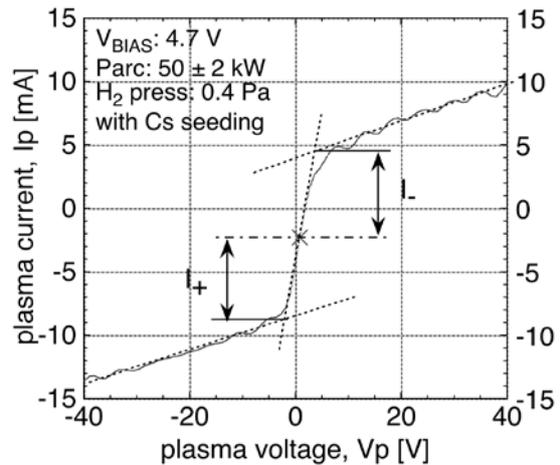


図 4. 1. 2. 1-11 Cs 導入後の引出し領域におけるプローブ特性。

以上のような負イオン源における基礎過程の研究を進めて、重水素実験で計画されている重水素負イオン源への改造に向けた検討も併せて進める予定である。

(4) 重水素実験へ向けた正イオン源の設計検討

LHD 最高性能化計画では、重水素実験に対応させるため、汎用真空容器装置とプラズマ生成制御装置による低エネルギーNB 垂直入射加熱機能を改造・増強して、重水素正イオン源 NBI 装置にする予定である。その際、ビームエネルギーを 40keV から 60~80keV にして、入射加熱電力をそれぞれ 9 MW に増強することを計画している。現状の水素ビーム入射では、各装置共に 4 台のイオン源を使用しており、1 イオン源当たりの出力は 40keV/1.5MW である。そのため、重水素 NBI 装置への改造に際して、1 イオン源当たりの重水素ビーム出力を 60-80keV/2.25MW にすることが必要である。現在、重水素ビームの引き出し実験を行うことはできないため、重水素以外の質量の異なったビームを用いてビーム引出データベースを作成して、重水素正イオン源の設計検討を行った。

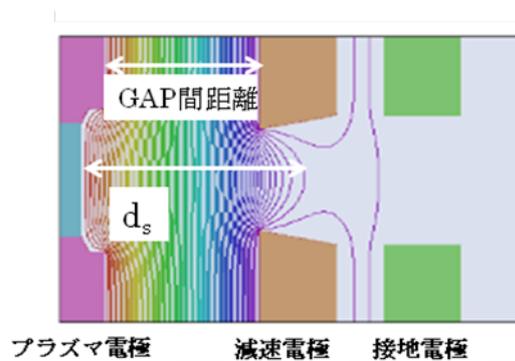


図 4. 1. 2. 1-12 正イオン源加速電極部構造図

水素から重水素に核種を変えた場合、イオンビームの中性化効率 η は核種によらずビームの速度に対して一定であるため、軽水素から重水素にする際には、ビームの入射エネルギーを 40keV から 80keV と倍することで中性化効率は同じになる。従って、現状の水素ビーム出力 40keV/1.5MW に必要な正イオンビーム電流は 75A であるから、重水素ビーム出力 80keV/2.25MW を達成するには正イオンビーム電流として 60A が必要である。

安定的な NBI の運転を行うためには、イオン源に高電圧を印加した際のブレークダウンを抑制する必要がある、そのためには電極ギャップ間に印加する電界強度をある一定の値よりも小さくする必要がある。水素ビームを 40keV に加速する際のギャップ間距離の実績としての最小値は 4.5mm であるが、安定した運転を実現するためにはギャップ間距離を 5mm 以上にすることが望ましい。正イオン源では、図 4.1.2.1-12 に示すように、逆流電子を抑えるために減速電極を設けて、-3kV 程度の負電圧を印加しているので、その時の電界強度 $(40+3)/5 = 8.6\text{kV/mm}$ を指標として、80keV 加速時のギャップ間距離を求めると、 $83/8.6 = 9.7\text{mm}$ となる。

ビーム引出の際に、その発散角が最小となる条件はチャイルド-ラングミュア則

$$J_{si} = \left(\frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2Ze}{m_i}} \frac{V^{3/2}}{d_s^2} \right)$$

によって支配される。また、ビーム光学系の議論を行う際にはビーム電流 (I) をその加速電圧 (V) の 3/2 乗で規格化したパービアンス ($\text{Perv} = I/V^{3/2}$) という値を用いると都合が良い。発散角が最小となるパービアンスを最適パービアンス (Perv^{opt}) と呼び、この値はチャイルド-ラングミュア則より、 $\text{Perv}^{\text{opt}} \propto m_b^{-1/2} d_s^{-2}$ でスケールすることが予測される。ここで m_b はビーム核種の質量、 d_s はビーム引出界面から加速

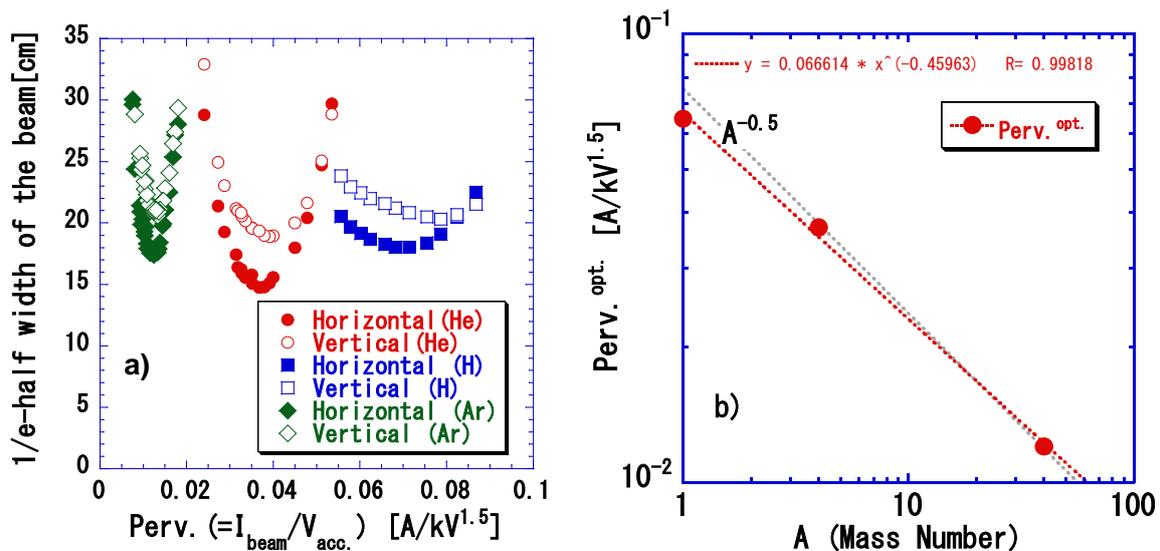


図 4.1.2.1-13 (a) 水素、ヘリウム、アルゴンビームのビームプロファイルの 1/e 値半幅のパービアンス依存性、及び (b) 最適パービアンスの質量依存性。

空間内の静電ポテンシャルが最低になる場所までの距離で、電極ギャップ間距離 (d) とその補正項 (Δd) を用いて $d_s=d+\Delta d$ と表される (図 4.1.2.1-12 参照)。正イオン源が重水素ビーム引出時において所定の性能を達成できるかを調べるため、最適パービアンスが質量の 0.5 乗及び $d+\Delta d$ の 2 乗に反比例することを確認して、 Δd の値を求めて、重水素ビームに対して $Perv^{opt}=(60/80^{1.5})x2^{0.5}=0.1186[A/kV^{1.5}]$ を 9.7mm 以上のギャップ間距離で達成できるかを検討した。

最適パービアンスの質量依存性については、正イオン源の電極ギャップ間距離を固定し、水素、ヘリウム、アルゴンと質量の異なるイオンビームを引出し、その最適パービアンスを調べることにより確認した。この実験はNBIテストスタンドにおいて実施し、その結果得られた各核種のビームプロファイルの 1/e 値半幅のパービアンス依存性とそこから求めた最適パービアンスのビーム質量依存性を図 4.1.2.1-13 に示す。この図より最適パービアンスは、ほぼ質量の 0.5 乗に反比例していることがわかる。水素ビームの最適パービアンスが他の 2 点から外挿した値よりも低めに現れるが、これは水素ビームが H^+ のみならず、 H_2^+ 、 H_3^+ の混合ビームから構成され、ビームの実効的な質量が 1 以上になっていることに起因していると考えられる。

最適パービアンスのギャップ依存性は、質量依存性の時と同様に NBI テストスタンドにおいて、異なるギャップ間距離に対して水素ビームを引き出す実験を行い、各ギャップ間距離に対する最適パービアンスを求めることにより調べた。テストスタンドの加速電源の定格は 40A であることから、必要とする正イオン電流を満たすことができない。そこで正イオン源の電極の半分をマスクし、ビーム電流を半分に制限することにより実験を行った。このため、この実験で示される最適パービアンスは実際に要求される値の 1/2 となる。図 4.1.2.1-14 に実験結果を示す。実験結果より、 $\Delta d =6.7\text{mm}$ とすることにより最適パービアンスが $(d+\Delta d)$ の 2 乗に反比例することがわかった。また、ギャップ間距離が約 11mm のとき最適パービアンスが $0.06(x2=0.12)[A/kV^{1.5}]$ となり、電極の全面積を使用した場合には、重水素ビームに要求される最適パービアンス $0.1186[A/kV^{1.5}]$ を満たしていることが示された。これにより、正イオン源が重水素 80keV ビーム運転の際に、要求される入射電力を充分満たした運転を行うことができることが確認された。

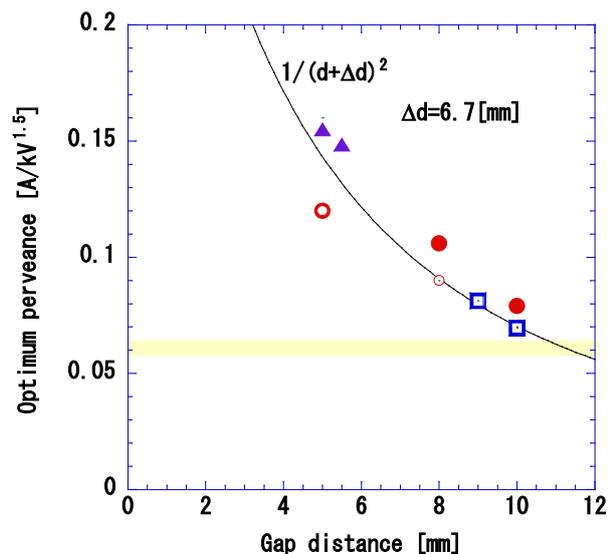


図 4.1.2.1-14 最適パービアンスのギャップ間距離依存性

4. 1. 2. 2 電子サイクロトロン共鳴加熱

電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)では、加熱増強計画の一環として、加熱磁場配位の自由度を拡大するために、共鳴磁場 2.75T に対応する周波数 77GHz/154GHz で出力 1MW 以上のジャイロトロンの開発、導入を、平成 18 年度より筑波大学と共同で進め、最終的には LHD へ 5MW 以上のパワー入射が可能となるようにシステムの整備を行ってきた。その結果、平成 19 年度からの大きな進展として次の成果が挙げられる。

1. 大電力 77GHz ジャイロトロン管 3 台の導入と 3.7MW パワーの LHD 入射の達成
2. アノード電圧制御によるジャイロトロンの大電力化(単管 1.5MW 以上)と、高効率化(50%程度)の達成
3. ジャイロトロン最高出力性能 1.8MW/1 秒の達成と最高電子温度 20keV プラズマの生成への寄与
4. 0.3MW 定常運転の達成
5. これらの大電力を高効率、高信頼性で長時間安定に入射するためアンテナ・伝送系の高性能化

今後、さらにメガワットジャイロトロンを導入を進め、LHD 入射パワーとして 5-7MW システムの構築を進めてゆく。

以下に得られた成果について詳述する。

(1) 大電力 77GHz ジャイロトロン管の導入 と大電力 ECH の LHD 入射の達成

平成 17 年度に自然科学研究機構と筑波大学との間に締結された「プラズマ物理・核融合分野における学術交流に関する協定」に基づき、平成 18 年度よりプラズマ核融合分野で必須となる大電力定常ジャイロトロン管開発を推進することを目標とした共同研究を開始した。周波数としては、LHD における加熱可能な磁場配位の自由度を拡大するために、基本波での共鳴磁場強度である 2.75T に対応する 77GHz を選択した。平成 18 年度に 1 号管(仕様:出力 1MW/5 秒パルス、0.3MW/定常)、平成 19 年度に 2 号管(仕様:出力 1.2MW/10 秒パルス、0.3MW/定常)、平成 20 年度に 3 号管(仕様:出力 1.5MW/2 秒パルス、0.3MW/定常)と段階的に設計定格出力を増大させて、開発を進めた。この開発においては、原子力機構で同時に進められていた ITER 用 170GHz ジャイロトロン管の工学的設計及び技術を取り入れて、開発を加速させた。平成 21 年度からは、高密度加熱を可能とするために第 2 高調波加熱用として 154GHz (仕様:1 MW/5 秒、0.3MW/定常)の設計を開始し、平成 22 年度、23 年度でジャイロトロン管の製作と超伝導マグネットの製作を行っている。表 4.1.2.2-1 にジャイロトロン管の開発状況と LHD 実験での使用状況を示す。

FY	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Injection Power	2.6	2.4	2.6	2.5	3.7	3.7	3.7	4.5
LHD Experiment	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th	14 th	15 th	16th
77GHz #1	★ Agreement	Design & Manufacturing	Conditioning	Repair				
77GHz#2		Design & Manufacturing	Conditioning		Upgrade			
77GHz#3		Design & Manufacturing	Conditioning					
154GHz			Design & Manufacturing	Conditioning	Design	Manufacturing	Conditioning	

表 4.1.2.2-1 77GHz/154GHz ジャイロトロンの開発、製作および試験状況と、LHD 実験への適用。

図 4.1.2.2-1 に、LHD に設置された 77GHz ジャイロトロン 2 号管の写真を示す。ジャイロトロン管は超伝導マグネット中に挿入されている。出力窓から放射されたミリ波は、準光学的結合器(MOU)により、強度、位相分布を成型されコルゲート導波管(直径 88.9mm)中に導入される。このコルゲート導波管により 100m 程度伝送され、準光学ミラーから構成されるアンテナによって、LHD 真空容器内の所望の位置に集光され、プラズマを加熱する。これまで段階的に開発・改善されてきた 3 本のジャイロトロンを使って、LHD における高温、高密度プラズマの生成をはじめとして、高電子温度プラズマ生成に寄与し、また局所加熱、電流駆動を利用したプラズマの分布制御、熱パルス伝搬による輸送解析、協同トムソン散乱による高エネルギーイオン分布計測のための大電力マイクロ波源として、LHD プラズマ実験の高度化に貢献している。

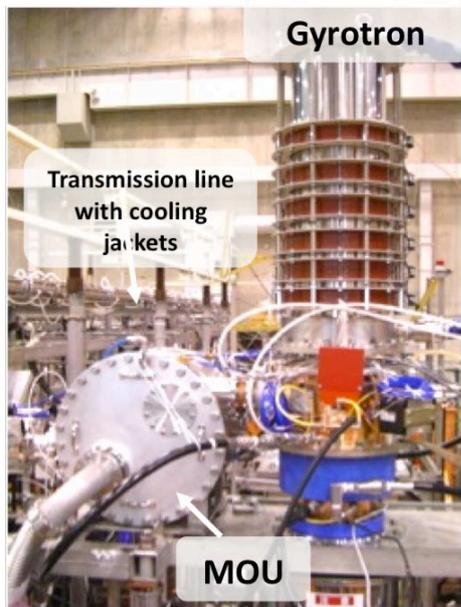


図 4.1.2.2-1 超伝導マグネットに挿入された 77GHz ジャイロトロン 2 号管と伝送系。

表 4.1.2.2-2 に、これまでに開発した 77GHz ジャイロトロン 1 号管から 3 号管までの仕様を示す。キャビティでの発振モードとしては $TE_{18,6}$ モードを選択し、電位降下

Items	Specification
Frequency	77 GHz
Power/ Pulse length	#1 : 1.0 MW/ 5 s, 0.3 MW/ CW #2 : 1.2 MW/ 10 s, 0.3 MW/ CW #3 : 1.5 MW/ 2 s, 0.3 MW/ CW
Beam Current	50 - 60 A
Total Efficiency	50 % (with CPD)
Cavity mode	$TE_{18,6}$
MIG type	Triode
Collector type	Collector Potential Depression
Output window	CVD diamond

表 4.1.2.2-2 77GHz ジャイロトロン#1-#3 の仕様。段階的に性能を向上させた。

型コレクタ方式を使用することにより 50%以上の出力効率を目標とした。出力変調のしやすさから 3 極型の電子銃とした。出力窓は CVD ダイヤモンドである。

(2) アノード電圧制御によるジャイロトロンの大電力化および高効率化

ジャイロトロン の 運 転 上 の 改 善 を 行 う ことにより、さらなる大電力化と高効率化を進め、ジャイロトン設計仕様値の達成を目指した。ジャイロトロンで電子ビームを引き出すアノード電源において、外部の波形生成器からの指示による任意の波形制御への改造を進めた。特にアノード電圧を二段階で立ち上げる運転手法を確立し、高出力化と高効率化を達成した。アノード電圧の二段階の立ち上げとは、図 4.1.2.2-2 に示すように、一段目では発振させずに電流のみを引き出し(100ms 程度)、二段目で発振を起こさせるものである。この手法には二つの効果がある。一つ目は、電流が流れ出すことによるコレクタ電圧の低下時間帯を回避し、過大なディプレッション電圧を避けることである。二つ目は、電子ビームの空間電荷による加速電圧の低下をイオンの電荷中和によって緩和し、設計値の加速電圧で運転パラメータの最適化が行えることである。この手法を 3 台すべての 77GHz ジャイロトロン の 運 転 に 適 用 す る こと により、一層の高出力化と高効率運転が可能となり、出力電力で 1.5~1.8MW を達成し、出力効率を最大 50%程度まで高めることができた。

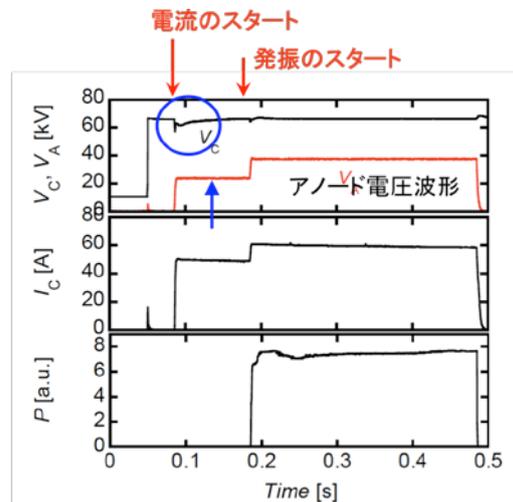


図 4.1.2.2-2 アノード電圧の二段立ち上げによる運転。上よりコレクタ電圧とアノード電圧波形、コレクタ電流波形、発振出力波形を示す。

(3) ジャイロトロン出力 1.8MW/ 1 秒の達成と電子温度 20keV 達成への寄与

77GHz 3 号管は、出力 1.5MW を目指して、大電流用の電子銃への改良、1.5MW 以上の出力に向けたキャビティの再設計、内蔵モード変換器の高効率化設計を行い、通常の運転において 1.5MW/1.6 秒の出力を達成した。このジャイロトン管に、さらに前述のアノード電圧の二段立ち上げ法を適用して、さらなる高出力化を図った。図 4.1.2.2-3 は、そのような運転を行ったときのビーム電流 I_c に対する出力と効率の依存性を、アノード電圧二段立ち上げの場合と、通常の立ち上げの場合と比較して示したものである。ビーム電流 70A において、出力は 1.5MW から 1.8MW へ、効率は 34%から 38%に向上している。図 4.1.2.2-4 に、1.8MW/1 秒の発振を達成した時の、電圧、電流波形と、出力の時間変化を示す。この結果は、通常の間筒型キャビティを用いたジャイロトンにおいては、世界最高級の性能を達成したものである。

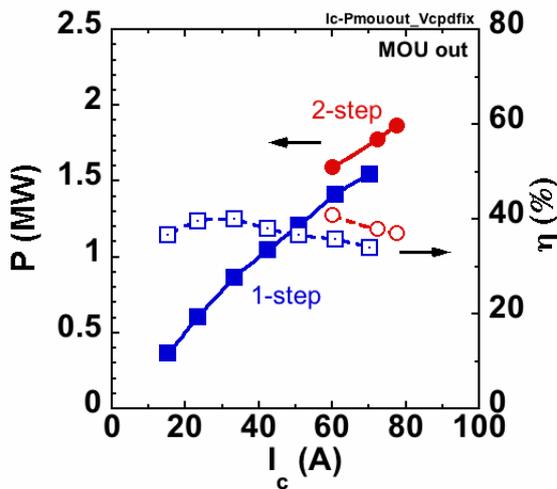


図 4.1.2.2-3 77GHz ジャイロトロン 3 号管での出力、効率特性. アノード電圧が一段での立ち上げの場合と二段立ち上げの場合を比較して示した。

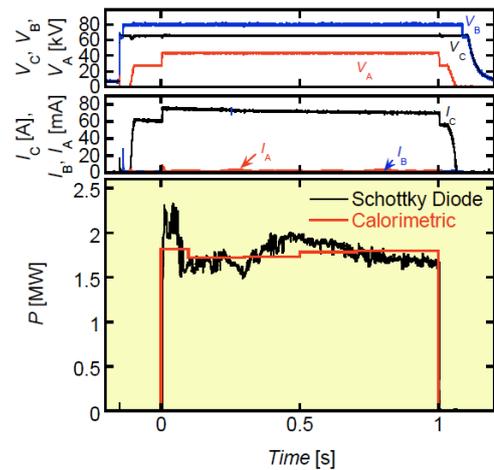


図 4.1.2.2-4 1.8MW/1 秒発振時の電圧、電流、出力波形。

これら 3 台の 77GHz ジャイロトロンにより、LHD へは 3.4MW の入射が可能となり、 $0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の低密度ではあるが、電子温度 20keV を超える値が得られた。また、 $1.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の密度レベルでは、電子温度 1 億度を達成した。

(4) 0.3MW 定常運転の達成

ジャイロトロンの定常運転化に関しては、これまでの開発を通じていくつかの問題点が明らかになってきた。定常運転を阻害する原因のひとつは、比較的周波数の低いジャイロトロンでは、内蔵モード変換器からの回折損失が大きいとため、ジャイロトロン内の非冷却パーツの加熱が大きくなり、長時間での運転で管内の真空度が劣化することである。それに対して内蔵モード変換器の変換効率の改善を進めてジャイロトロン管内の回折電磁波を低減し、他方冷却されていないセラミックパーツを低損失セラミックに交換するなどして、定常運転に向けた改良を進めた。その結果、3号管では出力 0.3MW で 40 分間の連続運転を達成することができた。さらに高出力での定常運転化には、今後コンバータ設計のさらなる最適化と、非冷却部分の構造設計の見直しが必要である。

Tube No.	Specification	Pulse Operation <5 s	CW Operation
#1 R	1 MW/ 5 s 0.3 MW/ CW	1.10 MW (36.4 %) 1.2 s 1.01 MW (33.0 %) 5 s	0.29 MW (29.2 %) 60 s 0.13 MW (21.7 %) 15.5min
	Two step V _A rise	1.41 MW (49.1 %) 1 s	
#2 (R)	1.2 MW/ 5 s 0.3 MW/ CW	1.10 MW (29.8 %) 1.2 s 1.02 MW (30.3 %) 5 s	0.2 MW (19.8 %) 370 s *0.24 MW (30.8%) 30min *0.3 MW (31.3 %) 165 s
	Two step V _A rise	1.28 MW (42.7 %) 0.45 s	
#3	1.5 MW/ 2 s 1.2 MW/ 10 s 0.3 MW/ CW	1.64 MW (42.1 %) 0.9 s 1.53 MW (36.0 %) 1.6 s 0.91 MW (40.9 %) 1.8 s	0.30 MW (36.3 %) 40min 0.22 MW (32.4%) 75min
	Two step V _A rise	1.87 MW (37.2 %) 0.1 s 1.78 MW (37.9 %) 1 s 1.59 MW (40.8 %) 1.8 s	

表 4.1.2.2-3 77GHz ジャイロトロン の 1 号管 から 3 号管 までの 運 転 達 成 パ ラ メ ー タ 。 表 中 の 数 字 は 出 力 (全 効 率) 発 振 時 間 に 対 応 し て い る 。

表 4.1.2.2-3 に、3 本の 77GHz ジャイロトロン管について、これまでに得られた出力、効率、発振時間について示す。パルス運転では、通常の運転法とアノード電圧二段立ち上げ法を行った場合に対して、それぞれ示してある。

(5) アンテナ・伝送系の高性能化

前述したジャイロトロン の 高 性 能 化 に 並 行 し て、こ れ ら を 接 続 す る 伝 送 系 お よ び 入 射 アンテナ の 高 性 能 化 を 行 っ た 。 具 体 的 に は、既 存 の 大 気 で 使 用 し て い た 88.9mm コルゲート導波管伝送系を真空化して、大電力伝送時にも導波管内で放電が起こらないよう対策を施した。

真空化伝送部品として、定常高真空化対応マイターバンド、パワーモニター、スライド導波管、赤外温度モニター及びアークセンサーポート付き本体真空窓接続導波管を付加するとともに、新たに定常実験対策としての導波管の冷却強化を行った。図 4.1.2.2-5 に示すように、これまで内径 88.9mm のコルゲート導波管を大気で使用して、最大 400kW 程度のマイクロ波伝送を行ってきたが、1 MW クラスでの大電力定常伝送時には導波管内でのアーク放電が懸念されたため、真空化と冷却強化を行った。真空化にあたっては、導波管接続部の改造、すべてのマイターバンドの高精度マイターバンドへの置き換え、パワーモニター、スライド導波管、本体真空窓部の接続導波管の置き換えを行うと同時に、定常対策として、すべての導波管外側に冷却ジャケット付き銅板を巻き付けて、除熱を行う構造とした。これらの改造により、77GHz 大電力ジャイロトロンを接続した三系統で、導波管真空度 1×10^{-4} Pa 以下での大電力伝送を信頼性高く行うことができた。図 4.1.2.2-6 に定常実験時における温度上昇の様子を示す。赤外温度計により、新設した L7 系統のダイヤモンド窓表面温度上昇が約 20 度であることがわかる。

冷却機構を付加していなかった簡易型アンテナのうち、2-0 アンテナについて、新たに大電力ジャイロトロンを接続するのに伴い、冷却機能を強化した。アンテナとして用いている駆動平面アンテナ、収束ミラー 3 枚および、方向転換用平面ミラー 3 枚の合計 6 枚の準光学ミラーすべてを水冷チャンネルをもつアルミミラーに置き換え、異材継ぎ手を介してステンレスパイプで冷却水を導入する形とした。この際、特に駆動ミラーの水冷パイプ部にはベローズを用いたため、駆動機構の強化改造も行った。

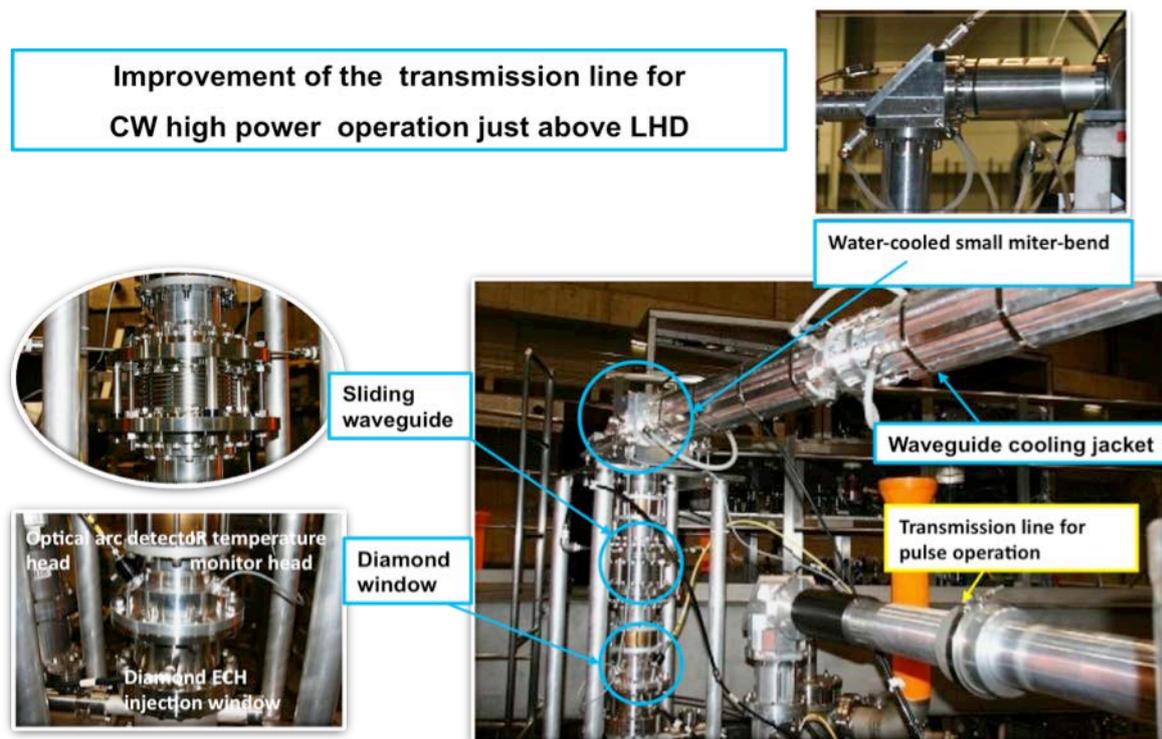


図. 4.1.2.2-5 伝送系の高性能化の例 (LHD 本体上部の高性能化部)。青で示した所が改良した部分で、下から、大電力透過ダイヤモンド窓部 (アーク検出用光ファイバーおよび、赤外線温度監視装置導入部付)、本体-伝送系機械的絶縁のための導波管スライド部、水冷チャンネルを備えた小型化マイターバンド。これらに加え、定常伝送時の導波管部除熱のため、大電力を伝送するおのおののジャイロトロンからアンテナまで合計約 60m の直線導波管部 3 系統すべてに写真に示されたような水冷チャンネル付銅板を貼付けた。

これらの改造・強化に併せて、真空導波管で接続されている伝送系を LHD への入射からジャイロトロンのダミーロード入射へ切り替えることにより、随時定常コンディショニングができるようにするため、定常対応真空導波管切替器の開発を行った。既存の導波管切替器は真空対応となっていたが、切替器内部でスライドするマイターバンドブロックと直導波管ブロックが直接水冷されていなかったため、特に、マイターバンド側を使用する場合には、マイターバンド反射板が発熱により高温になる可能性があったため、定常での使用ができなかった。この点を改善するため、

マイターベンダブロックに水冷機構を設けた真空導波管切替器の開発を行った。マイターベンダの反射板には、銅とステンレスの圧着合板を用い、銅を反射面として、ステンレス側に水冷ジャケット構造を設けている。水の導入にはステンレスパイプの二重管を用いて外側パイプと容器の間をスライドシールで真空封止する構造となっている。内部は直導波管とマイターベンダブロックがリニアール上を再現性よく高精度でスライドし、これを圧空シリンダで駆動している。本切替器を用いて大電力運転を行い、300kW-7分、200kW-21分までのダミーロードを用いたジャイロトロコンディショニングを問題なく行うことができた。これにより、LHDの定常プラズマ実験に際して、十分なコンディショニングを実施したうえで、定常実験を行うことができるようになり、限られた実験時間を有効に利用することに貢献した。

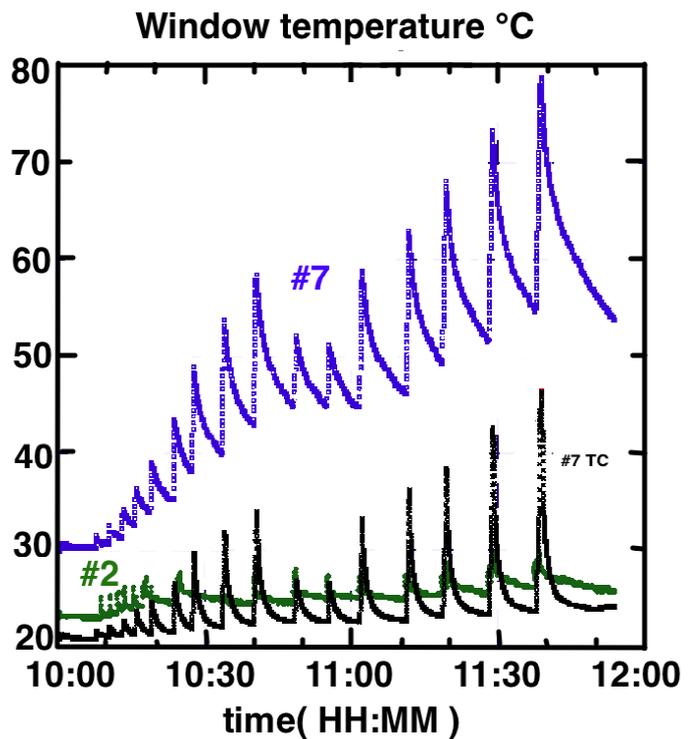


図. 4. 1. 2. 2-6 定常実験時の赤外線温度モニターで計測された真空窓の温度上昇 (#7 青、#2 緑) と、熱電素子で計測された温度上昇 (#7)

4. 1. 2. 3 イオンサイクロトロン周波数帯加熱

LHDにおけるイオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱実験は、波動加熱物理の理解を進めて、プラズマ実験領域を拡大すると共に、プラズマの長時間定常保持実験を遂行して、定常プラズマの物理と工学を発展させることを目的としている。平成17年度の第9サイクル実験において、54分を超える定常プラズマ保持を、ICRF加熱を主加熱として達成した後は、より高密度・高温条件下での定常実験に向けて、アンテナ及び高周波システムを中心とした機器整備を行ってきた。平成22年度には、新たに波数制御アンテナを設置し、平成23年度には改良したポロイダルループアンテナを再設置して、ICRF加熱の実験領域の拡大と高性能プラズマの定常実験に取り組んだ。このように、現在2組4本の速波励起用ループアンテナがLHD真空容器内に設置されている。図4.1.2.3-1にアンテナの配置図を示す。これらのアンテナはそれぞれ、大電力定常運転が可能な発振器及び伝送路に接続されており、大電力及び定常実験に供

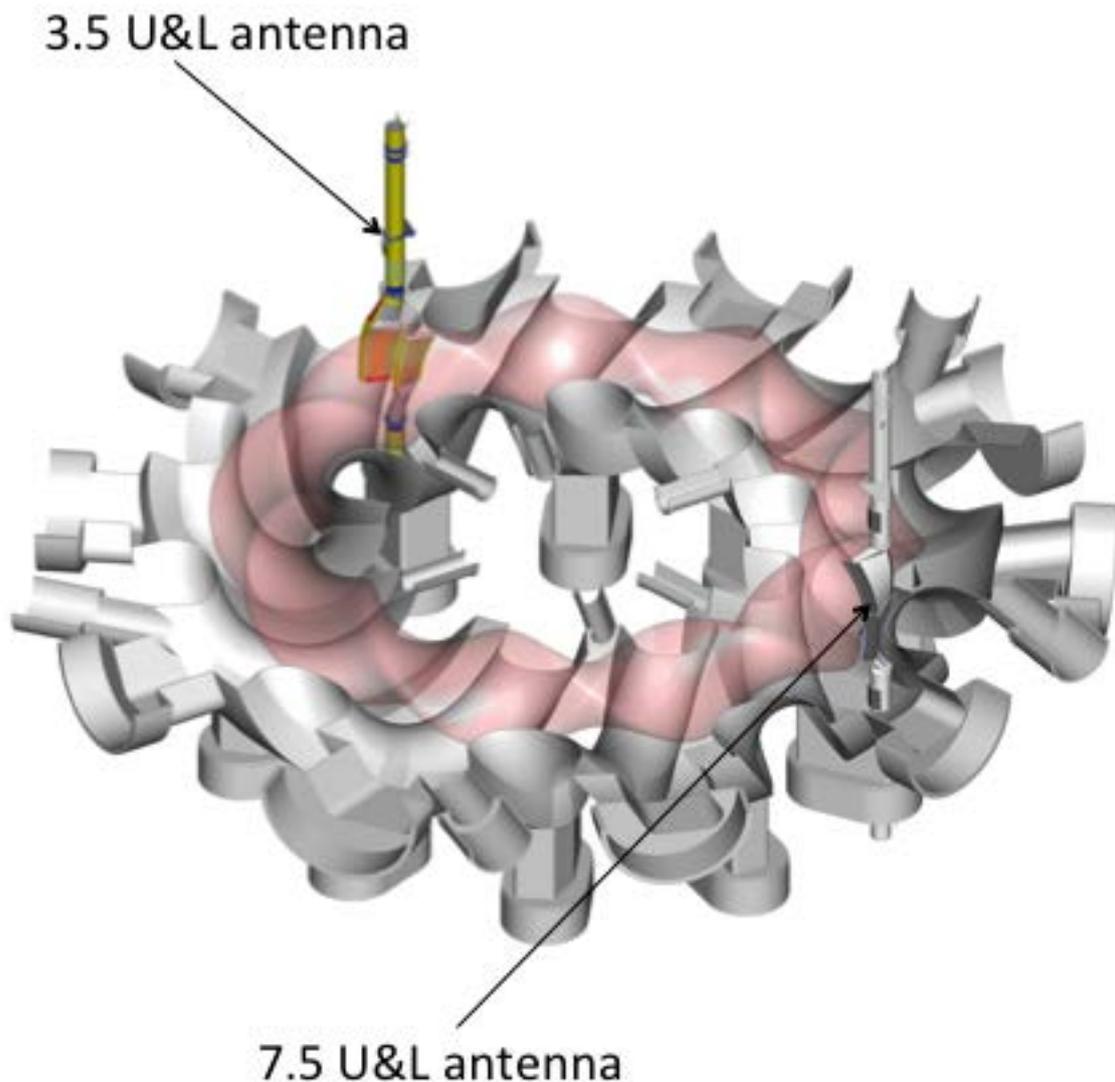


図 4. 1. 2. 3-1 LHD に設置したイオンサイクロトロン加熱アンテナの配置図。

されている。これらは十分な検討を行って設計・製作して、システムとして構築してきたものであるが、実験領域の拡大に伴って改善を進めると共に、実験に際して顕在化した問題点の解消、実験の安全性や効率化の向上、及び技術の進歩に伴うシステムの高度化等を目指して改良を行ってきた。以下では、新規に設計・設置した波数制御アンテナとそれらを含めたICRF加熱システムの改良・整備状況について記述する。

(1) 波数制御アンテナの設計製作及び設置

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱において、磁場に平行方向 (トロイダル方向) の波数 ($k_{//}$) は、加熱に影響を与える外部制御ツールのひとつである。ICRF 加熱の高度化を目指し $k_{//}$ の波数制御が可能なアンテナを新規に導入するために、アンテナの設計製作及び LHD



図 4.1.2.3-2 LHD に設置した波数制御 (HAS) アンテナ。

への設置を行った。図 4.1.2.3-2 は、真空容器内に設置された新規アンテナの写真である。アンテナの形状が握手 (Handshake) をする前の掌の形、もしくは、波数制御という言葉に因んで HAS アンテナと命名した。より高性能なプラズマによる定常実験を可能とするために、設計に当たってのコンセプトとして、トロイダル方向の位相制御によりアンテナ近傍のシースポテンシャルを下げてアンテナ近傍から不純物がプラズマに流入するのを抑えること、位相制御によりプラズマ周辺部での吸収を抑え中心加熱パワーを増やすこと、定常実験時にプラズマからの熱負荷を抑えるた

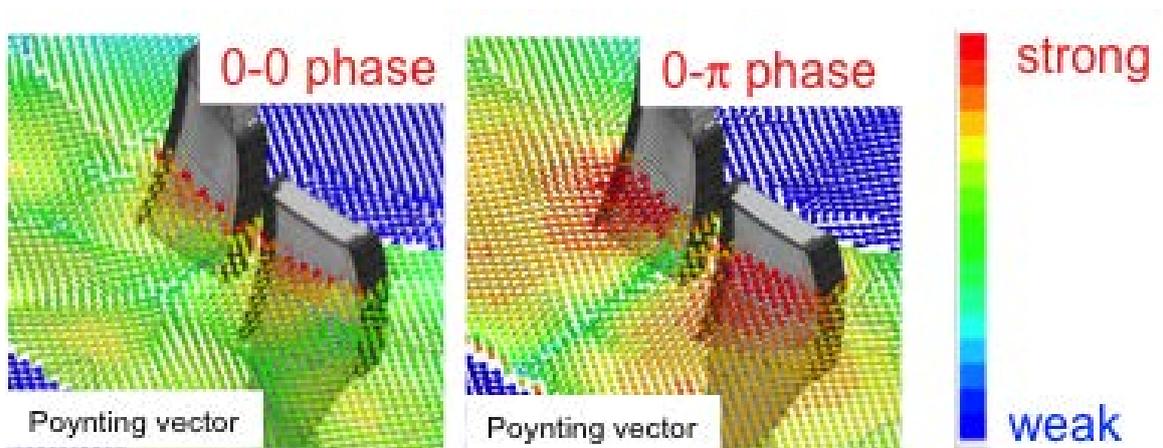


図 4.1.2.3-3 HFSS コードで計算した HAS アンテナ周辺のポインティングベクトル。

めにアンテナ形状をより厳密に規定しアンテナの冷却能力の向上を図ること等を基本とした。設計に当たっては、3次元CADデータ及び電磁界シミュレーションコードであるHFSSを使用し、アンテナ周りの電磁界やアンテナの電気的特性及びアンテナから放射される電力の流れ等を考慮した。図4.1.2.3-3は、2つのストラップ間のアンテナ電流の位相を0-0及び0- π にした場合のポインティングベクトルを示している。0-0位相の時に比べ、0- π 位相では、放射されたパワーがアンテナの前面により集中していることが分かる。HASアンテナの大きさは以下の通りである；内導体ストラップ幅：20cm、ストラップ長さ：65cm、アンテナ幅：54cm、アンテナ間隔：10cm、アンテナ厚さ：12cm。アンテナは水平方向に可動で、ストラップやバックプレート及びサイドプロテクターの根元は定常実験時の熱除去のために水冷却を行っている。ストラップとバックプレートは、SUS316でできており、アンテナ放射部前面にあるフェラデーシールドは、熱伝導と剛性を得るために銅の周りをステンレスで覆ったクラッド材を使用している。また、サイドプロテクターはCFC材、上部と下部のプロテクターはグラファイトを使用している。3次元CADデータは、3次元シミュレータによるバーチャルリアリティー空間での細部及び裏側になる部分の設計・検討、アンテナ取り付け作業時における機器取り回し作業の検討にも大変有効であった。上述のHASアンテナ及び改良して再設置したポロイダルループアンテナを

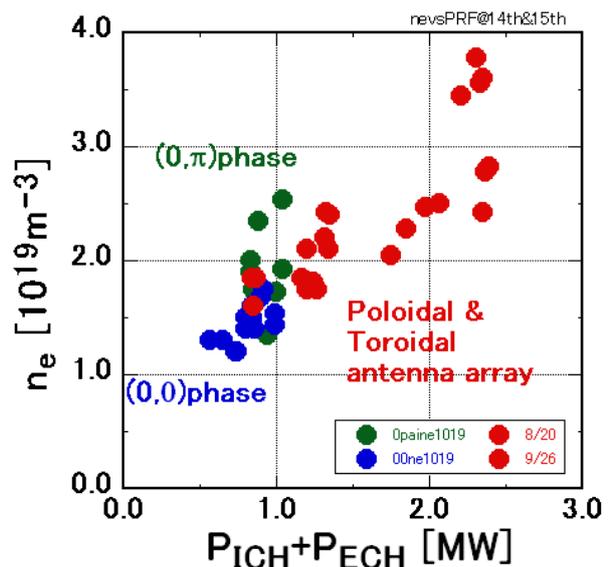


図 4.1.2.3-4 イオンサイクロトロン加熱により得られた電子密度と高周波入射電力。

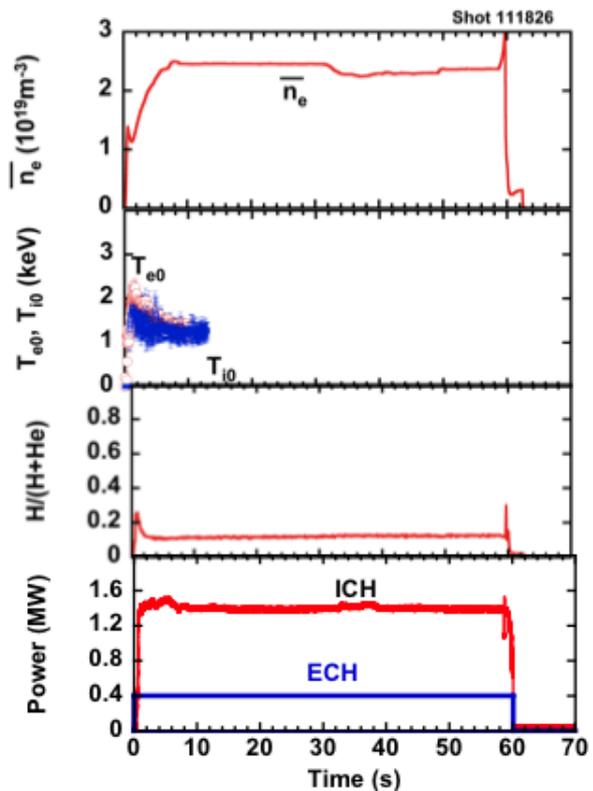


図 4.1.2.3-5 高密度大電力長時間加熱時のプラズマパラメータの時間変化。

用いた ICRF 加熱実験において、プラズマの電子密度を更に高い領域に拡大することができた。図 4.1.2.3-4 は、HAS アンテナ及びポロイダルループアンテナを用いて得られた電子密度の高周波入射電力依存性を示したものである。得られた密度は高周波入射電力に依存するが、これまで最大 $3.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の線平均電子密度が、イオンサイクロトロン加熱電力 2 MW と電子サイクロトロン加熱電力 0.4 MW で得られている。また、HAS アンテナに関しては、 $(0, \pi)$ 位相のときの方が $(0, 0)$ 位相のときより高い電子密度が得られている。図 4.1.2.3-5 は、高密度大電力入射により長時間加熱を行ったときのプラズマパラメータの時間変化を示している。この放電においては、1.8 MW の高周波電力の入射により、線平均電子密度 $2.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを 60 秒間維持している。このように、ICRF 加熱システムの増強・整備により、ICRF 加熱プラズマの動作領域を拡大すると共に、より高密度条件下での定常プラズマ保持を可能とした。

なお、新規に設計・設置した HAS アンテナに関しては、これまでのプラズマ実験において、アンテナの損傷等のハードウェア及びプラズマ加熱性能等に関する問題点は特に生じておらず、今後、更なる大電力長時間加熱実験に供されることが期待される。

(2) 機器保全システムの高度化

ICRF 加熱実験における機器の健全性を確保するに当たり、不具合が発生したときの高周波電力の遮断は重要な課題である。電圧が過大にかかったときに発生するアーキングは伝送路の耐電圧低下をもたらし、大電力の入射を制限する。また、過大な電圧印加によりフィードスルーのセラミックが破損した場合には、LHD 本体の真空リークを引き起こす。これまでは電圧プローブによるモニターで印加電圧に上限を設けていたが、セラミックの部分にアーク光を検出する遮断システムを追加した。図 4.1.2.3-6 は、アーク検出用の Si フォトダイオードを取り付けたフランジの写真である。これをフィードスルー部のセラミックを見込む位置に装着した。図 4.1.2.3-7 にアーク光の検出による高周波電力遮断の例を示す。検出されたアーク光は電圧に変換され、1 V に達したところで遮断用信号を出しており、高周波電力は約 3 ms 後に遮断されている。また、遮断速度を更に早めるために、図 4.1.2.3-8 に示すように、高速ゲートを遮断回路に組込んだ。これにより高周波電力の遮断速度は、約 3 ms から 50 ns へと著しく向上した。このように、ICRF システムの機器の健全性が向上したことにより、ICRF 加熱プラズマの実験領域及び実験機会が拡大し、同時に、LHD の真空システムの健全性の向上により、LHD 実験の効率的運用に貢献した。

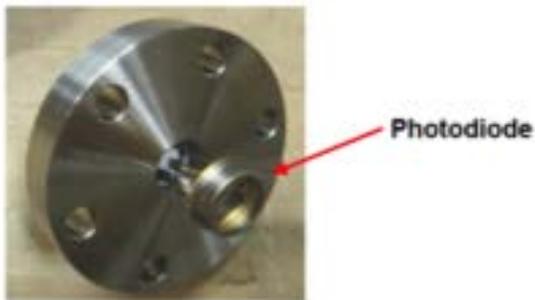


図 4.1.2.3-6 フランジに取り付けたアーク検出用フォトダイオードの写真。

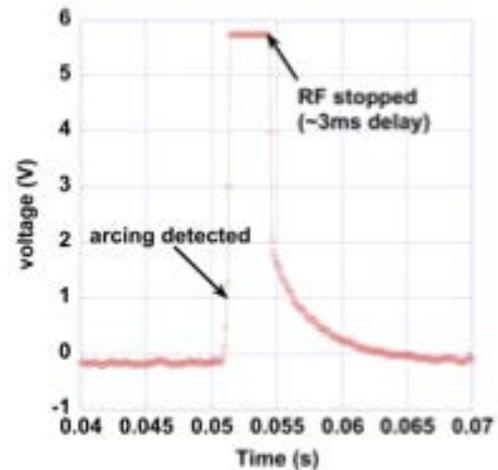


図 4.1.2.3-7 アーク検出器による高周波電力遮断例。

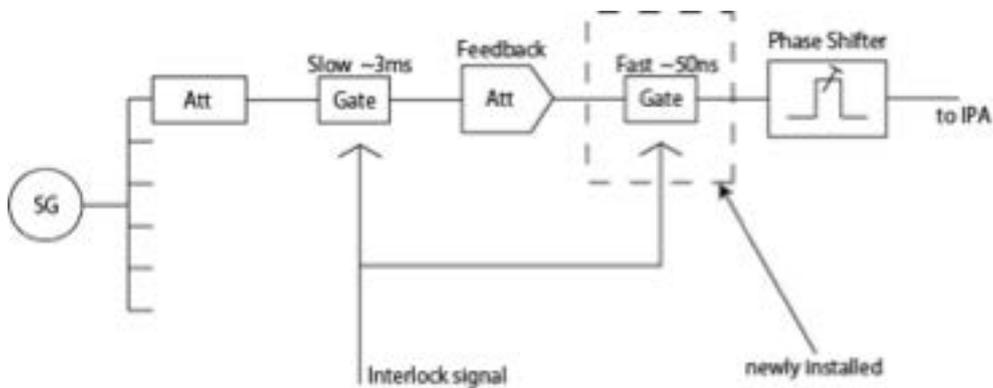


図 4.1.2.3-8 高周波遮断回路への高速ゲートの挿入。

(3) ITER 委託共同研究による発振試験

LHDにおける定常加熱実験の実績及び成果は、国際的に見ても ICRF 加熱システムの極めて高い性能を示している。そこで、国際的 COE としての役割を果たすことへ向けた LHD の貢献として、ITER 計画との連携を図る目的で、ITER 委託共同研究に基づいた高周波発振器の発振試験を行った。ITER では、イオンサイクロトロン加熱システムの終段用四極真空管を選定するに当たり、CPI 社製 4CM2500KG 四極管の高周波数での発振試験データを必要としている。4CM2500KG を用いた大電力定常発振試験を実施できるのは、世界的に見て、定常試験の実績を有する LHD の ICRF システムにおいて他に無く、本研究所で受託・実施することとした。発振試験は既存の発振器及び模擬負荷を使用して行い、発振周波数は 65MHz であった。図 4.1.2.3-9 は、達成した高周波電力及びパルス長である。

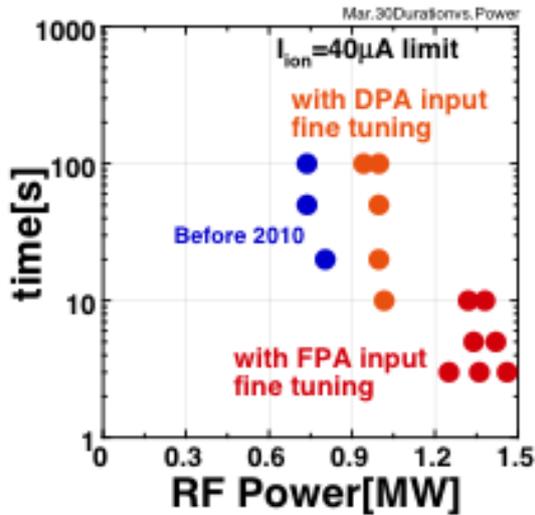


図 4.1.2.3-9 発振試験により得られた発振電力及びパルス長。

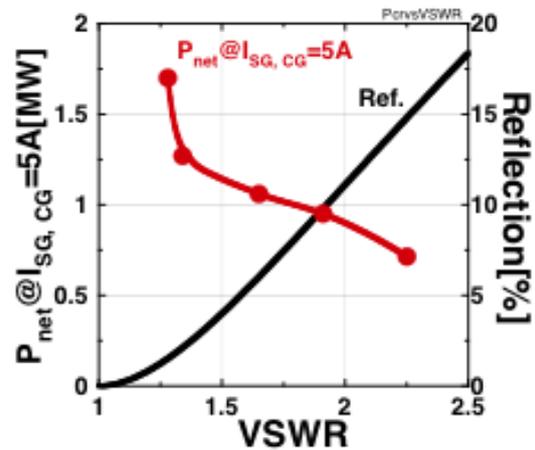


図 4.1.2.3-10 VSURを変えたときの発振電力と反射率の関係。

1.4MW/3秒、1.3MW/10秒、1MW/100秒の発振を達成した。図 4.1.2.3-10 に、定在波比 (VSUR) を変えときの発振電力と反射率を示す。発振電力は VSUR の増加とともに減少し、VSUR=2.2 のときの発振電力は、VSUR=1.3 のときの半分以下であった。

LHD の ICRF 加熱システムは、開発段階から大電力定常運転を目指した実機的设计・製作を行ってきた。実際の大電力定常プラズマ加熱実験を開始してからは、実験の進展に伴って生じてきた新たな課題に対して、その度に改良を重ねながら問題点を克服してきた。そうして蓄積されてきた技術を基に、さらなる機器の整備・増強を進めることにより、国際的に群を抜く ICRF 定常加熱実験の成果を挙げ、LHD において、より高密度・高温条件下での定常実験の進展に寄与している。

4. 2 計測機器および理論・解析モデルの拡充

LHD プラズマの性能を拡大させて、ヘリカル方式の物理の体系化と環状プラズマの総合的理解を進めるためには、精度の高い計測を行うとともに、理論・解析モデルを確立して、精密な科学的議論を展開することが必要である。ここでは、ヘリカル方式の物理の理解を深める観点から推進している計測機器の高度化の進展、並びに、実験グループと緊密に連携しながら開発を進めている理論・解析手法の進展を中心に報告する。併せて、重水素実験へ向けた計測機器の検討、及び同位体効果の物理の理論的検討の進展について述べる。

4. 2. 1 計測機器

大型ヘリカル装置(LHD)では、LHD プラズマの高性能化に歩調を合わせる形で、閉じ込め・輸送性能の精査、並びに測定領域の拡大を目指し、計測機器の高度化、或いは新規計測機器の開発が間断なく行われてきた。また、現在進行しているLHD 実験への対応に加え、将来の重水素実験に向けた既存機器の対応、並びに新規計測に関する検討作業が行われている。大型ヘリカル装置(LHD)では、プロジェクト開始当初より重水素を使った実験が計画されており、電子密度、温度計測に代表される基本、且つ重要パラメータ計測機器に関しては、重水素実験を実施するに当たり大幅な変更なく対応できるよう配慮した形で整備を進めてきた。また、中性子 γ 計測など、実際の重水素実験時に必要となる計測機器に関しては、近年、LHD 計画共同研究、一般共同研究、並びに他機関の中性子発生施設との共同研究の下、国内の専門家による当該計測開発検討グループが組織され、精力的に研究開発を進めてきた。本項では、重水素実験に向けた既存重要計測機器の対応、並びに現在研究開発検討を進めている新規計測の進捗状況について以下に記す。本項では、2008年以降に実施した上記の内容に関して代表的な機器を取り上げ、その成果を記す。

4. 2. 1. 1 既設計測機器の高度化

(1) 高温・低密度プラズマ実験におけるトムソン散乱計測のデータ品質の向上

LHD トムソン散乱装置は、 $T_e=50\text{eV}\sim 10\text{keV}$ の温度領域に対して最適化された設計がなされているため、10keV 以上の領域では誤差が急激に大きくなる傾向にある。特に、低密度プラズマでは散乱信号強度が弱いため、正確な電子温度計測が一層困難になる。ECH 実験に代表される高電子温度実験時の電子温度分布データの質を向上すべく、信号強度を増やし統計誤差を減らすことで計測精度を高める目的で、LHD トムソン散乱装置では、次の4つの方法を試みた。

- (1) ハイパワーレーザー3台の同時入射
- (2) 固定プラズマショットの生信号の積算
- (3) 隣り合う時間フレームの生信号の積算
- (4) 隣り合う空間チャンネル (ポリクロメーター) の生信号の積算

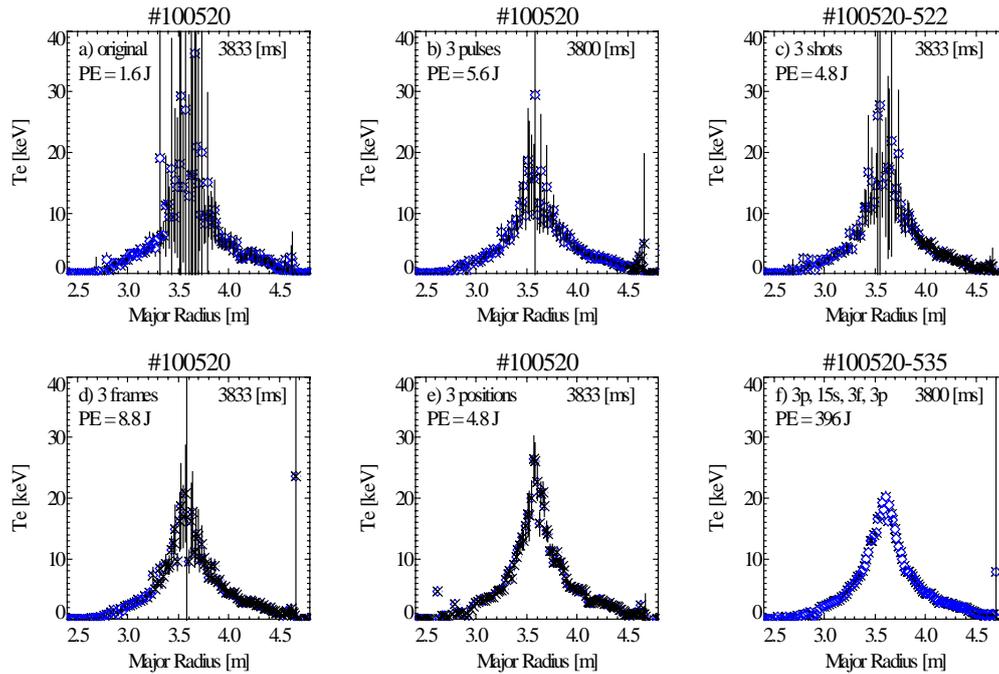


図 4.2.1.1-1 a) 新手法適用前の電子温度分布、b)～e) は手法(1)～(4)を個別に適用した場合、f) は(1)～(4)を同時に適用した場合に得られた電子温度分布。

これら4つの手法は、互いに相反するものでなく、同時に適用することも可能である。この結果を図4.2.1.1-1に示す。a) が以前の電子温度分布、b)～e) は上の(1)～(4)を個別に適用した場合、f) は(1)～(4)を全て同時に適用した場合に得られた電子温度分布である。a) と比べてb)～e) の4つの手法を個別に適用した場合、ほぼ同程度の品質向上（誤差の減少）が見られた。また、更にこれら4つの手法を同時に適用した場合においては、非常に明瞭な電子温度分布が得られ、高電子温度実験において精度良く電子温度分布データが得られるようになった。

(2) 重イオンビームプローブ計測領域の拡大

磁場閉じ込めプラズマ中に形成される電位分布とその揺らぎはプラズマの輸送、閉じ込め性能と密接な関係があり、電位計測は輸送研究を進める上で必要不可欠である。LHDでは電位計測法の一つとして重イオンビームプローブ（HIBP）の研究開発を進めてきた。2006年度の計測開始以降、計測可能パラメータ領域の拡大のために、(1)ビームライン改造による計測可能空間領域の拡大、(2)イオン源の高出力化による計測精度の向上、(3)加速電圧の安定化と実時間フィードバック制御によるプローブビームエネルギーの安定化、(4)プラズマ電流に伴うプローブビームの軌道のずれの実時間フィードバック制御などを行った。

図4.2.1.1-2に(4)のビーム軌道フィードバック実験の例を示す。フィードバック制御が無い場合(左図)はプラズマ電流(I_p)が増加するにつれて検出ビーム電流(SUM)が減少し測定できなくなっているのに対して、フィードバック制御した場合(右図)は左図より大きなプラズマ電流が流れているにもかかわらずビームが検出できていることが分かる。これは原理的にフィードバック制御が有効であることを初めて実証した結果であり、LHDにおける電流駆動による磁気シア制御実験への適用のみならず、プラズマ電流が必須のトカマク装置やRFP装置におけるHIBP計測にも応用可能な成果である。また、(1)~(3)の改良は、特に高エネルギービームでの計測が必要な高磁場実験時の計測に貢献しており、高イオン温度実験や高電子温度実験におけるコア領域の電場分布計測に初めて成功するという成果に結びついた。

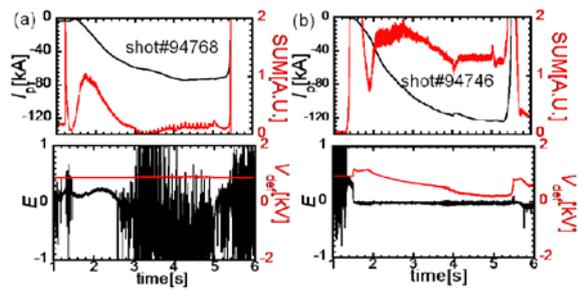


図 4.2.1.1-2 ビーム軌道フィードバック (FB) 実験の例。(a)FB無し、(b)FB有り。上図にプラズマ電流(I_p)と検出ビーム強度(SUM)、下図に検出器上のビーム到達位置のずれ(E_0)、軌道制御に用いた静電偏向器電圧(V_{def})。

(3) 高エネルギー粒子物理研究に関連した計測機器の拡充

LHDでは、接線高速中性粒子ビーム入射した低磁場高ベータプラズマにおいて、高エネルギーイオンにより励起されたトロイダルアルヴェン固有モード(TAE)が観測され、TAEにより、TAE励起に寄与した高エネルギーイオン自身が大半径方向外側に輸送されることが、接線視野を持つE//B型荷電交換中性粒子分析器(NPA)により確認されている。TAEによる高エネルギーイオンの輸送および損失の有無を精査するために、2008年より8-0ポートにシンチレータ型損失高速イオンプローブ(SLIP)を導入した。NPAは系内に閉じ込められているイオンの情報を提供し、一方、SLIPは損失してくる高エネルギーイオンのエネルギー/ピッチ角の情報を提供することから、この二つの検出器を同時に利用することにより、TAE発生時の高エネルギーイオンの挙動がより明らかとなった。SLIPを導入した結果、図4.2.1.1-3に示すように、TAEにより高エネルギーイオンが大半径方向外側に輸送され、その一部は損失に至ることが分かった。また、損失高エネルギーイオン束の揺動成分を詳しく調べたところ、TAE揺動周波数と同じ周

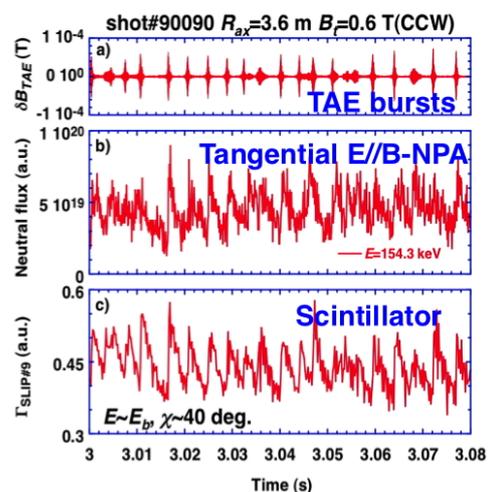


図 4.2.1.1-3 TAE 発生時における高エネルギーイオンの振る舞い

波数の揺動成分が認められ、SLIP 計測により、TAE が co-方向に周回する通過軌道を持つ高エネルギーイオンに励起されていることが明らかとなった。このように、SLIP 等の計測機器の拡充により、高エネルギー粒子の物理に関する研究が進展した。

(4) 実験データ集録

LHD の実験データ集録システムは、大規模並行分散処理の基本コンセプトに基づいて構築されており、長期にわたってスケラブルに増強可能で、性能を向上させやすいシステム形態である。計測ノード数は実験の進捗に合わせて堅調に増加しており、実験 1 回あたりの収集データ量は 10 年で 100 倍の増加ペースが続いている。この「データ爆発」現象は、18 ヶ月で倍増する有名な「ムーアの法則」に非常によく一致している。

他方、同システムでは、世界に先駆けて高速・定常データ収集システムを開発・稼働して、LHD 定常長パルス実験に大きな貢献をしている。図 4.2.1.1-4 の左図に示す赤丸は、約 1 時間の LHD 長パルス実験において、90GB/回という収集データ量の世界記録を達成したことを示している。LHD 実験開始当初からの定常非対応の CAMAC 収集計測系が約 30 計測で頭打ちになっているのに対して、定常実験に向けた環境整備として、定常収集に対応した WE7000、cPCI 計測系を拡充しており、オンライン計測全体の約 2/3 を占めるに至っている。

今後の LHD 最高性能化計画に向けての計測高度化として、100 余に及ぶデータ収集ノードの完全遠隔運転と高可用性化（高信頼＋メンテナンスフリー）、データ集録・伝送機器の放射線影響等の調査を進めている。

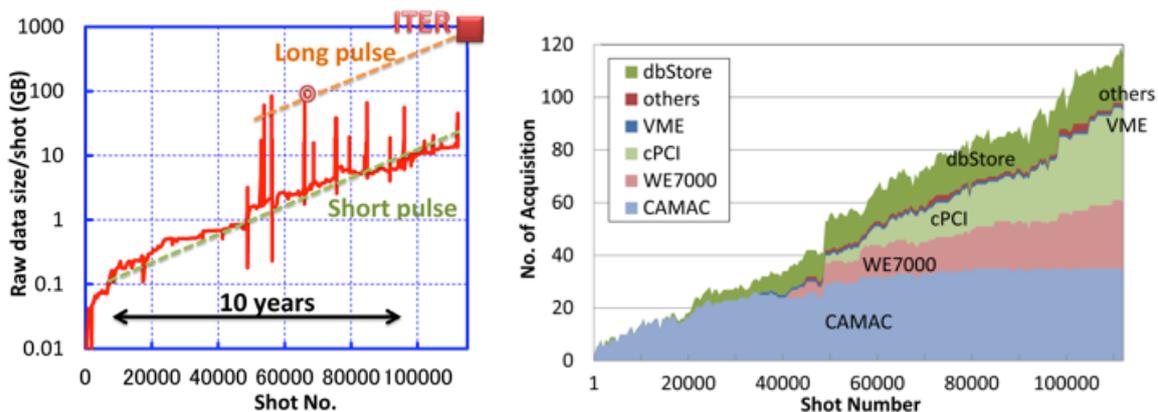


図 4.2.1.1-4 LHD 実験開始からの 1 回あたりの収集データ量 (左) とデジタイザ種別毎の計測数 (右) の推移：左図赤丸は最高記録 (90GB/shot) を、右図 dbStore はデータの手動登録数を示す。

(5) 核融合バーチャルラボラトリ

核融合科学研究所は核融合研究分野の大学研究センターとの間で双方向型共同研究を推進しており、その枠組みの下で、2008年6月より九州大学の QUEST 装置が新たに実験を開始した。実験当初から LHD システムによる遠隔データ収集を行い、2011年現在、5 計測 0.64GB/回という小型装置としては異例の大量計測データを実現している。九州大学 QUEST 装置での遠隔実験の成功を受けて、稼働中の筑波大学 GAMMA10 装置でも 2009 年度から遠隔データ収集を開始した。

こうした遠隔実験環境は、国立情報学研究所との連携により学情網 SINET 上に設けられた核融合分野専用仮想閉域網 SNET をフル活用して構築されており、『核融合バーチャルラボラトリ (Fusion Virtual Laboratory in Japan)』として国内での進展・拡充を図るとともに、次期 ITER 計画の遠隔実験基盤としても機能整備を進めている。

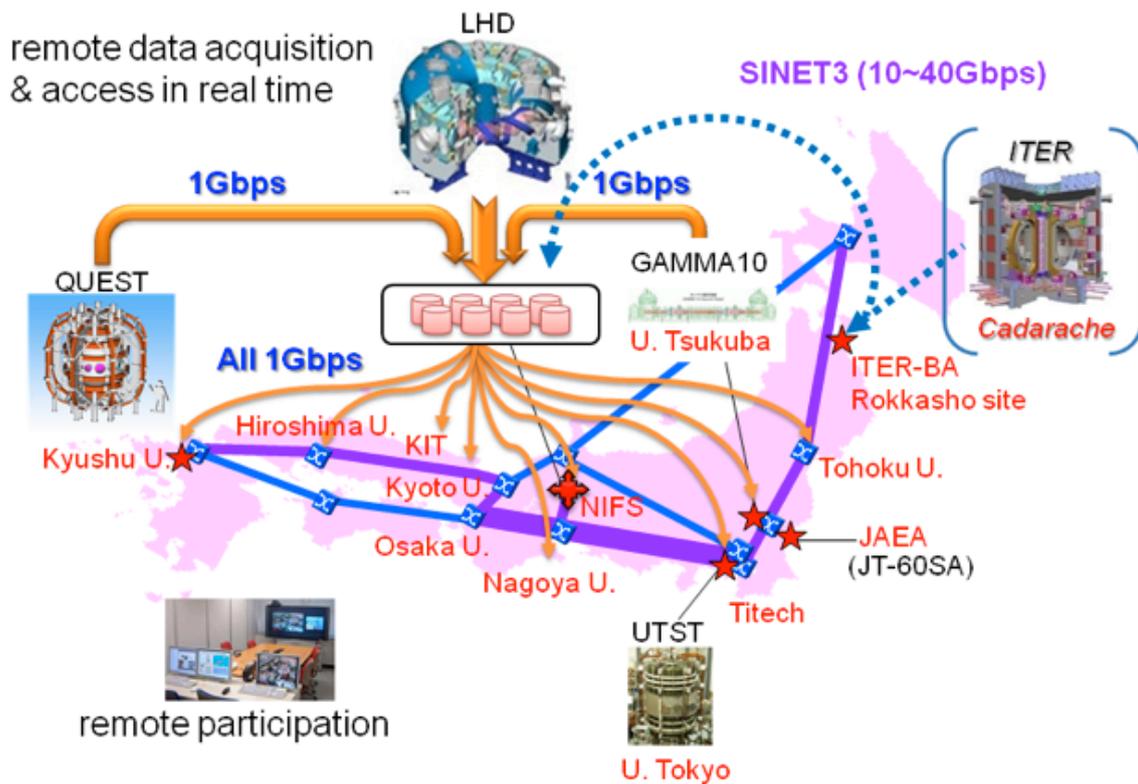


図 4.2.1.1-5 SINET 上に構築された核融合バーチャルラボラトリと、参加する LHD、QUEST、GAMMA10 各実験からの計測データの流れ

4. 2. 1. 2 重水素実験に向けた計測機器の検討

重水素実験における中性子環境下での計測機器に対する放射線影響を検討した。代表的な計測機器構成要素に関する耐用速中性子束を表 4. 2. 1. 2-1 に示す。最大中性子発生量を伴う放電を想定した場合、中性子輸送計算によると LHD 本体近傍における中性子束は、約 10^{10} (n/(cm²・shot)) 程度と予想される。地下室においては、開口部真下では、地下室の他の場所に比して中性子束が幾分大きくなるが、概ね 3 桁程度減衰する。計測機器室では、地下室に比して更に 3 桁程度の減衰が見込まれる。これらは、本体室床、LHD 本体・地下室側壁の開口部が開いた条件下での評価値であり、実際には、開口部を可能な範囲でポリエチレンビーズ、或いは砂により埋める計画であるため、計測機器室に配置されている機器への中性子影響は無いと考えられる。

表 4. 2. 1. 2-1 代表的な計測機器要素に関する耐用速中性子束

機器要素	耐用速中性子束 (n/cm ²)
石英ファイバー	$1 \times 10^{15} - 3 \times 10^{15}$
光電子増倍管	$3 \times 10^{14} - 1 \times 10^{15}$
半導体検出器	$1 \times 10^{11} - 1 \times 10^{12}$
CCD カメラ	$1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$

Ref. 飯田敏行、「核融合診断用センサ・素子の 14 MeV 中性子照射効果」、放射線、**17** (1991) 57.

LHD 本体室に配置されている機器への影響に関して言えば、石英ファイバーについては、特段の遮蔽を設けなくとも問題は生じないと思われる。CCD カメラについては、中性子照射による影響が予想されるため、出来るだけ LHD 本体からは遠ざけ、かつ遮蔽を設ける必要があるだろう。フォトダイオードや表面障壁型シリコン半導体検出器に代表される半導体検出器については、比較的短い期間での性能の劣化が見込まれるため、CCD カメラ同様、装置から出来るだけ遠ざけ、かつ遮蔽を設ける対策が必要であると思われる。また、計測機器担当者全員に、重水素放電時に予想される担当機器への放射線影響とそれに向けた対策方針に関するアンケート調査を既に実施しており、重水素実験に向けた既設の各計測機器の対応方針を確認している。

重水素プラズマでは、熱や粒子の輸送の改善により、高い閉じ込め性能が得られることが期待されている。また、重水素実験では高エネルギー粒子物理研究の拡大が見込まれている。これらの物理研究を推進すべく、重水素実験に向けて、中性子計測システム、高エネルギー粒子計測システム、高精度輸送計測システム、ダイバータ計測システム、定常・高速データ収集処理システムの整備が計画されている。これらの中で、物理研究のみならず、装置運転、放射線安全管理上必須の中性子計測システムを中心に検討・開発状況について以下に述べる。

(1) 中性子計測システムの検討

重水素高速中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱実験においては、中性子は、1) 熱核融合反応 (バルクイオン-バルクイオン間の反応)、2) ビーム成分-バルクイオン間の反応、3) ビーム成分-ビーム成分間の反応、の3つの過程で発生する。LHD における中性子計測システムの検討および研究開発が、国内の大学との共同研究を中心に進められている。研究開発項目の中でも特に重要なのが、中性子総発生率・量測定である。現在、中性子発生率測定に、2種類の中性子計数管を3セット用意する計画である。計数管の選定、並びに設置場所を決定する上で、LHD の形状、並びに装置を構成する部位の材質を考慮した中性子輸送計算は必要不可欠である。このため、3次元モンテカルロ中性子輸送計算コード MCNP 上での LHD のモデル化を名古屋大学との共同研究の下に進め、LHD 装置近傍における中性子輸送計算を行えるよう整備した。図 4.2.1.2-1 に、MCNP コード上に体系化した LHD 装置と実験室床を考慮したモデル、並びに、計算の一例として、予想最大中性子発生率を仮定した場合に MCNP 計算で得られた LHD 装置の大半径方向外側の赤道面上における中性子束分布を示す。その他、計測ポートを考慮した場合としない場合での中性子束や中性子エネルギー分布の差異、中性子計数管を覆うポリエチレン減速材の厚みの最適化等、中性子計数管の選定、設置位置の検討のための計算を進めている。

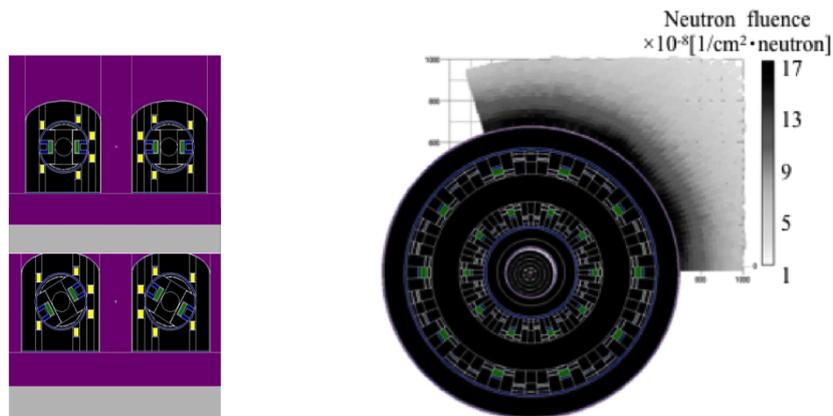


図 4.2.1.2-1 MCNP コード上に LHD 装置本体、並びに本体室床を体系化したモデル (左図)、最大中性子発生率を想定した LHD 装置近傍における中性子束分布 (右図)。計算はフルトラスモデルで行われており、ここでは赤道面上の 1/4 セクション分のみ中性子束分布を表示している。

また、第 15 サイクル中に模擬計数管を本体室 C1 架台上に、前置増幅器を本体地下室に、信号処理ユニットを計測機器室(1)に設置し、LHD 運転環境下におけるノイズレベル調査を実施した。その結果、ノイズレベルは、測定上問題の無いレベルであることを確認できた。ただし、NBI のブレークダウンに起因するノイズが観測されたので、実機の設置に当たっては、十分な電磁シールドを行い、かつ、ケーブル敷設ルートや

信号処理ユニットへの供給電源対策にも注意を払う必要がある。

重水素プラズマにおける中性子発生率を得るためには、LHDの真空容器近傍に設置した中性子計数管の出力とトーラス全体の中性子総発生率との関係を予め較正しておく必要がある。その場較正においては、トーラス状の中性子源を模擬するために、中性子発生率が既知の中性子源を搭載した電車を遠隔操作にて真空容器内を走らせる周回移動体システムが必要となる。較正時において中性子源を搭載した電車は、長時間安定して走行しなければならない。限られた時間の中で較正を遅滞無く実施できるように、現在、この較正時に使用する周回移動体システムの開発を行っている。具体的には、真空容器内に精度よくレールを敷設する方式の検討、高速走行下での走行安定性試験等を行っている。

名古屋大学との共同研究により、中性子エネルギー spektrometa の開発を行っている。プラズマ中にビーム入射高エネルギーイオン等のテイル成分が存在する場合、発生する中性子は、その速度分布を反映した形のエネルギー spektrol となるため、その spektrol 形状からビームイオンの速度分布情報を得ることができる。図 4.2.1.2-2 に現在開発を進めている共役粒子同時計数型中性子 spektrometa の検出概念図を示す。第 1 検出器（有機シンチレータ）に入射した中性子の一部は、シンチレータ内で反跳陽子を叩き出す一方、自身も散乱を受ける。ある一定角度で散乱を受けた反跳陽子のエネルギーをシリコン半導体検出器で測定し、また同時に散乱された中性子のエネルギーは、第 1 検出器と第 2 検出器（有機シンチレータ）間の飛行時間から評価する。また、第 1 検出器での付与エネルギーも測定する。本 spektrometa では、この 3 つのエネルギーを足し合わせることで、入射した中性子のエネルギーを得ることができる。これまでに、日本原子力研究開発機構の中性子源加速器 FNS を利用し単色 DD 中性子照射実験を行ったところ、約 6.3% のエネルギー分解能を得るに至った（図 4.2.1.2-3）。この値は、JET で使用されている DD 中性子 spektrometa TOFOR の値と同等である。しかしながら、現状検出効率が低く（ 3.3×10^{-7} ）、今後、第 2 検出器の多チャンネル化等の検出効率の改善に向け

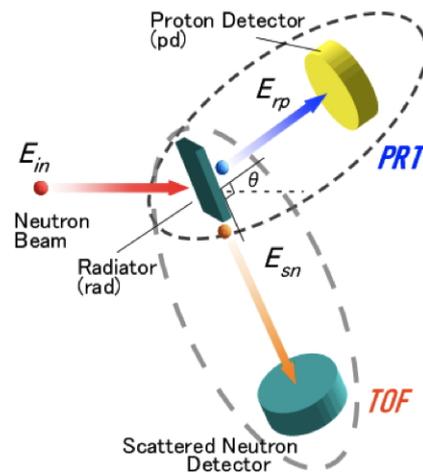


図 4.2.1.2-2 共役粒子同時計数型中性子 spektrometa の動作概念図

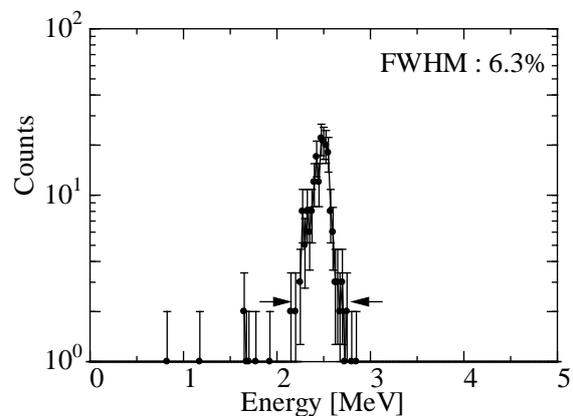


図 4.2.1.2-3 単色 DD 中性子照射時に測定された spektrol

た努力を払う必要がある。その他、大学との共同研究の形で、中性子発生プロファイル測定に使用する最適な高速中性子シンチレータの調査等を進めている。

(2) 高エネルギー粒子計測システム

高エネルギー粒子計測システムには、ヘリカルレイ損失高エネルギーイオンプローブ、協同トムソン散乱 (CTS) 計測が計画されている。CTS 計測については、現在、研究開発が進行しており、LHD において、電子サイクロトロン共鳴加熱用 77GHz ジャイロトロンを光源とした CTS 計測の試験測定を行っている。図 4.2.1.2-4 に、LHD における CTS 測定系の光源ビームと受信ビーム方向を示す。測定では、垂直入射した高エネルギーイオンに由来すると考えられる散乱信号が受信されており、現在、観測散乱スペクトルと垂直入射高エネルギーイオンの減速分布から予測される散乱スペクトルとの比較解析を進めている。

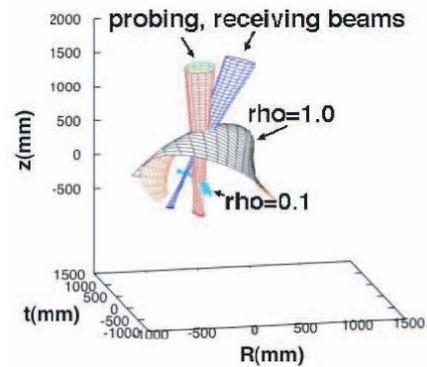


図 4.2.1.2-4 LHD CTS の入射光源ビームと受信ビーム方向

(3) H/D 比計測の検討

重水素実験では、主要な課題であるプラズマ閉じ込め物理の同位体効果を調べるために、バルクプラズマにおける水素と重水素の比の同定が重要である。また、水素同位体比の計測は、ヘリウムとの比の計測も含めて、将来の燃焼プラズマにおける燃料希釈率を測定する上でも重要な課題である。以下に、H/D 比の計測手法の検討状況について述べる。

平成 23 年度の第 15 サイクル実験で導入した 2 波長分光計を使った荷電交換分光により、コア領域の水素とヘリウムの比の測定を試みた。NBI を遮断した後の再結合フェーズの水素とヘリウムの比から較正を行い、この荷電交換分光計測により、コア領域における水素とヘリウムの比が測定できるようになった。また、荷電交換分光により、コア領域におけるバルクプラズマの速度分布が計測できた。図 4.2.1.2-5 に得られた水素の荷電交換スペクトルを示すが、この手法を用いると水素と重水素の比が計測できる。荷電交換光のピーク波長 λ_p は、水素 (波長 656.28nm) の密度

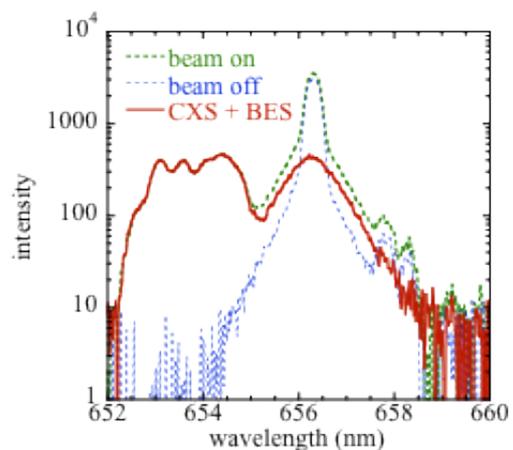


図 4.2.1.2-5 中性粒子ビーム on から off のスペクトルを引き算して得られた水素の荷電交換スペクトル。

n_H と重水素 (波長 656.10nm) の密度 n_D を用いて、以下の式で近似できる。

$$\lambda_p \sim 656.1n_D/(n_H+n_D) + 656.28n_H/(n_H+n_D)$$

従って、荷電交換分光のピークの波長を精密に計測することにより、水素と重水素の比が以下の式で得られると考えられる。

$$n_D/(n_H+n_D) \sim (656.28 - \lambda_p)/0.18$$

今後はさらに、測定精度等についての検討を進める予定である。

電子およびイオンの温度と密度、ならびに回転変換がわかると、測地線音響モード (GAM : Geodesic acoustic mode) 周波数を測定することにより、イオンの質量密度を求めることができる。LHD において、この GAM スペクトロスコピーを用いた H/D 比同定の検討を行っている。LHD

では、HIBP 及び反射計で高速イオン励起 GAM が検出されており、HIBP ではその局所計測に成功している。図 4.2.1.2-6 に、測定された GAM 周波数と軽水素単独プラズマを仮定した場合の理論予測の比較を示す。測定値は理論値の 0.77 程度であり、この低下がイオン質量密度によるとすると、イオン質量密度は軽水素の約 1.7 倍と評価される。これは、制動放射計測によって観測されている低密度プラズマにおける実効電荷数の増加と矛盾しない結果となっている。ただし、高速イオン励起 GAM 周波数は、バルクイオンに対する高速イオンの圧力が高い場合に周波数が低下する可能性があり、この効果の評価を進める必要がある。一方、このような高速イオンが存在する場合は、アルヴェン固有モードが励起され、その周波数測定からもイオン質量密度の推定が可能である。図 4.2.1.2-6 の実験と同時に励起されたアルヴェン固有モード周波数からは、イオン質量密度が軽水素の約 2 倍と評価され、GAM スペクトロスコピーの評価と良い一致が得られている。これら 2 つの手法の併用により、高速イオン存在下でも高い信頼性でイオン質量密度およびそれによる H/D 比の評価ができる可能性が示された。

プラズマ中の局所的な燃料イオン比の情報をプラズマ密度揺動の周波数スペクトルから求めるといふ新しい計測手法の開発を、小電力のミリ波を用いた反射 (散乱) 計測法を用いて行っている。本手法では、プラズマ中に存在する種々の密度揺動のうち、その揺動周波数がイオンの質量に依存する揺動群に着目し、これらを同時にかつ空間分解能良く計測することで、質量イオン比を精度よく推定することを目指している。現在、測地線音響モード (GAM 振動)、トロイダルアルヴェン固有 (TAE) モード、およびイオンサイクロトロン周波数領域 (ICRF) 波動などを対象に検討を進めている。GAM 振動と TAE の派生である逆磁気シアアルヴェン固有 (RSAE) モードが同時に発生するプラズマに対して、これらを同一地点において計測することで、局所的な質量比

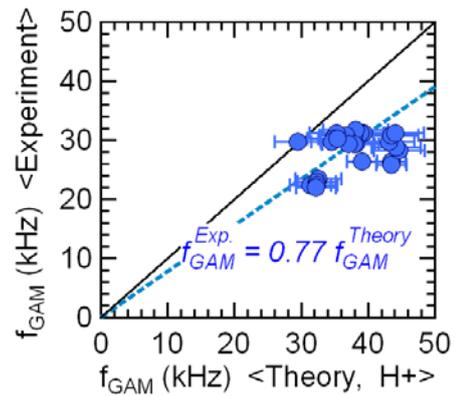


図 4.2.1.2-6 GAM 周波数の比較。
縦軸は測定結果、横軸は軽水素を仮定した時の理論予測。エラーバーは電子温度計測の誤差による。

を推定することが可能となる。このようなプラズマにおいて、ミリ波反射計によって観測された密度揺動スペクトログラムから得られた TAE 周波数と GAM 周波数を、図 4.2.1.2-7 に示すように、この時のプラズマのパラメータから予想される各々の周波数の質量比依存性と比較したところ、このプラズマ中における質量比は、約 1.7 であると推定できた。また、ミリ波計測システムの受信周波数帯域を数百 MHz まで拡張するような開発を行うことにより、ICRF 波動を検出できた。今後、ミリ波を用いたプラズマ中の質量比計測法の検討・開発をさらに進める予定である。

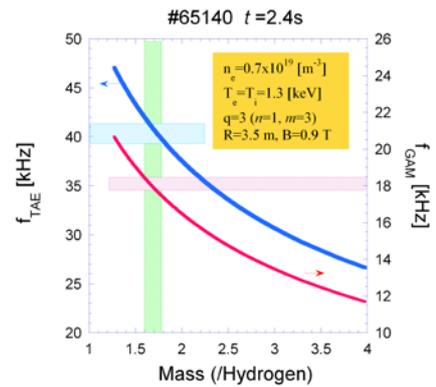


図 4.2.1.2-7 GAM 周波数と TAE 周波数の水素に対する質量比依存性

(4) 定常・高速データ収集システムの整備

重水素実験では、通常の軽水素実験に較べて大幅に実験機会（回数）が減るため、より内容の濃い計測データ集録を行う必要がある。このため、基本的に全計測の定常実時間運転と、画像・揺動計測など大容量データの高速（実時間）処理が求められる。LHD の計測データ収集処理システムは、PC クラスタ技術に基づくフレキシブルな構成をとることでスケラブルな性能増強を可能にしている。核融合実験の定常化に向けてはギガビット級リアルタイムデータ収集系をいち早く開発し、一計測で最大 160MB/s の収集能力（定常）を実現した。その結果、約 1 時間の定常実験で 90GB/回のデータ収集量世界最大を記録している。10 秒未満の短パルス実験でも 16.6GB/回の収集（2011 年実績）を毎日 170 回以上行うなど、世界最多のデータ集録を続けており、次世代 ITER 実験に最も近い計測データシステムである。

他方、重水素実験による中性子束はデータ集録機器中の半導体記憶、光変換素子等に影響を及ぼす可能性があり、保守性を含めて放射線管理区域となる本体室外での運転を検討している。アナログ用同軸ケーブル 3,500 本以上、デジタル通信用光ファイバー 500 本以上を本体室からデータ収集室への信号伝送のために計画している。なお、これまでの検討からケーブル媒体の放射線劣化、伝送信号への擾乱は特に問題のないレベルに留まると予想されている。また、本体室内あるいは本体地下室で運用する機器については、個別の中性子遮蔽を施し、遠隔制御可能なよう遠隔電源制御および遠隔コンソール装置を設置する等の対応を検討している。

LHD 実験の高度化には物理解析をショット間で完了させる必要があり、データ解析処理の高速リアルタイム化が欠かせない。重水素実験に向けたプロトタイプシステムの検討も進んでおり、64 並列の PC クラスタで従来 10 分 30 秒かかった磁場配位への計測データのマッピング処理を 25 秒に短縮する等の成果を得ている。

4. 2. 2 理論・解析モデルの拡充

LHD 計画のプロジェクト化に伴い、実験グループと理論グループの連携がより緊密となり、LHD プラズマの理論的解析を進めるコードの開発が進展している。LHD をはじめとするヘリカル方式に代表される 3次元の解析手法の進展は、精密な科学的議論を促進するとともに、3次元的な解析の必要性が増大しているトカマクを含めた環状プラズマの総合的理解に大きく貢献している。また、重水素実験における重要な課題である閉じ込めの同位体効果に対する理論的検討も進展している。

本節では、こうした理論・解析モデルの拡充に関する進展を、MHD 解析、高エネルギー粒子解析、運動論的輸送解析、流体乱流輸送解析、周辺プラズマ及びプラズマ・壁相互作用の解析について述べるとともに、3次元ヘリカルプラズマに対する統合輸送解析コードの開発と LHD 実験への適用の検討状況も合わせて報告する。

4. 2. 2. 1 MHD 平衡・安定性・非線形解析

MHD 関連の理論データ解析としては、LHD の三次元平衡、非線型 MHD 解析、粒子補給、及び環状プラズマの総合的理解に関して、モデルの拡充とコードの整備が進められた。三次元平衡計算コード HINT の整備によって、LHD に配備された磁気ループ信号の再現が可能となった。 $(m, n)=(1, 1)$ のモード数を持つ磁気島の成長に伴い、コアプラズマの磁気軸がヘリカル状になり、水平面からの信号を計測しているトムソン散乱計測が磁気軸の電子温度を反映していない可能性があることが示された[1]。

非線型 MHD 解析手法の拡充により、LHD プラズマの非線型ダイナミクスに関する研究が進展した。線型解析では、圧力駆動型モードが $R_{ax}=3.6m$ の配位において不安定となることが予想されていたが、実験では最高ベータ値が達成されており、圧力駆動型モードの安定化メカニズムの解明が重要課題である。このモードは波長が短い方が大きな線型成長率を持つという性質を持っているのに対して、実験では短波長モードが観測されていない。そこで短波長モードの低減メカニズムを高精度の三次元 MHD シミュレーションにより解析し、短波長モードでは交換型から図 4.2.2.1-1 に示すようなバルーニング的な構造となることが示された。さらに、短波長モードの安定化には、磁力線に平行方向の熱伝導が最も効果的であり、圧力分布の平坦化や圧縮性の効果では完全には安定化できないことが明らかになった[2]。また、ベータ上昇効果を含むマルチスケール手法を高精度化する

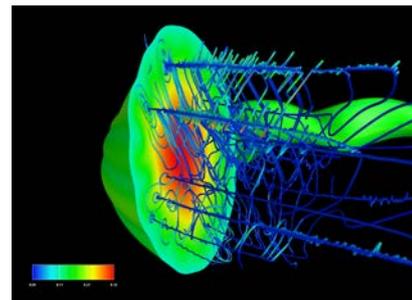


図 4.2.2.1-1 LHD プラズマにおけるバルーニングモード。カラーマップの赤は高い圧力、緑は低い圧力を示す。青の線はプラズマの流線を示し、螺旋状の形状がバルーニングモードによる渦を示している。

ことにより、プラズマの自己組織化によって長波長交換型モードによる崩壊現象が回避されることが示された[3]。

LHD プラズマにおけるペレット入射による効率的粒子補給手法の探究を目的として、MHD シミュレーションによるプラズモイドの挙動の解析がなされた[4]。図 4.2.2.1-2 に示すように外側入射によってプラズモイドがトラス外側に形成された場合には、プラズモイドは大半径外向きにドリフトする。これに対し、内側入射によってプラズモイドがトラス内側に形成された場合には、非常に短い変位で大半径方向に振動する結果が得られ、トカマクとは大きく異なる。この挙動の違いが、磁力線の結合長の違いに起因することを解明した。

一方、環状プラズマの総合的理解の観点から、京都工芸繊維大学との共同研究として RFP に対する MHD シミュレーションが行われ、実験で得られている単一ヘリカル構造の形成が再現された。また、ヘリオトロンプラズマの静的磁気島と交換型モードの相互作用[5]、新古典拡散効果を含む静的磁気島のヒーリングと成長[6]、ドリフトテアリングモードによる磁気島とゾーナルフローのシミュレーション[7]に関する成果も得られている。また、京都大学との共同研究として、ダブルテアリングモードの成長における磁気島の爆発的ダイナミクスの機構の解明がなされた[8]。

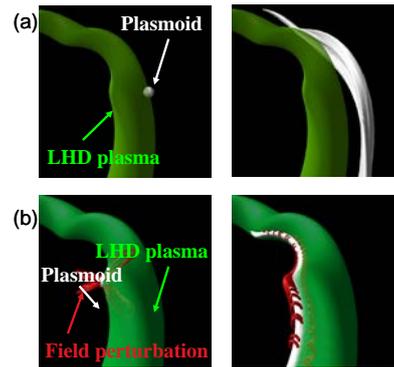


図 4.2.2.1-2 LHD プラズマにおけるプラズモイドの挙動。(a)及び(b)はそれぞれプラズモイドの初期位置がトラス外側及び内側に位置している場合を示す。左図は初期状態、右図は時間発展後の状態を表す。

- [1] Y. Suzuki et al., Plasma and Fusion Res. **6**, 2402134 (2011).
- [2] H. Miura, N. Nakajima, Nucl. Fusion, **50**, 054006 (2010).
- [3] K. Ichiguchi, B. A. Carreras, Nucl. Fusion **51**, 053021 (2011).
- [4] R. Ishizaki, N. Nakajima, Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 05409 (2011).
- [5] K. Saito, K. Ichiguchi, N. Ohya, Phys. Plasmas **17**, 062504 (2010).
- [6] S. Nishimura et al., Plasma and Fusion Res. **5**, 040 (2010).
- [7] K. Uzawa, A. Ishizawa, N. Nakajima, Phys. Plasmas **17**, 074503 (2010).
- [8] M. Janvier, A. Ishizawa, J. Li, Y. Kishimoto, Phys. Plasmas **18**, 102112 (2011).

4. 2. 2. 2 高エネルギー粒子解析

高エネルギー粒子とアルヴェン固有モードなどのMHDモードとの相互作用は核融合プラズマの重要な研究課題の一つである。高エネルギー粒子・MHD 連結シミュレーションコード MEGA は、HINT コードによって計算された LHD プラズマの MHD 平衡データ

に対応し、相互作用する高エネルギー粒子と MHD モードの時間発展のシミュレーションが可能である。また、MEGA コードは高エネルギー粒子の代わりにプラズマ内部で一定の周波数で振動する電流を用いてアルヴェン固有モードを励起できるように拡張されている。これによって高エネルギー粒子を用いる場合よりも短い計算時間でアルヴェン固有モードを見出すことが可能となった。この方法を用いて LHD 実験#47645 プラズマにおけるアルヴェン固有モードを調べた結果を図 4.2.2.2-1 に示す。図では 2つの磁気面上と複数のポロイダル断面において、半径方向速度揺動に半径座標値を乗じた物理量の分布が表示されている。さらに、熱イオンの反磁性ドリフト効果を含むような MHD モデルの拡張についても研究を進めている[1]。

米国のトカマク TFTR と DIII-D における重水素実験では、アルヴェン固有モードがバースト的に繰り返し発生し、D-D 反応によって発生する中性子が 1ms よりも短い時間に 10%程度減少する現象が観測されている。中性子放射の減少はアルヴェン固有モードによる高エネルギー粒子の損失を示している。LHD においてもアルヴェン固有モードがバースト的に繰り返し発生する同様の現象が観測されているが、これまでの実験は水素プラズマを用いているので中性子は発生していない。LHD において重水素実験が行われれば、中性子放射の計測から高エネルギー粒子損失に関する新しい情報が期待できる。核融合科学研究所では TFTR におけるこの現象をシミュレーションで再現した実績がある。その研究をさらに発展させ、LHD における高エネルギー粒子とアルヴェン固有モードの相互作用を計算する摂動論的シミュレーションコードを開発した[2]。

アルヴェン固有モードのバースト現象が観測された LHD 実験#47645 について、アルヴェン固有モードによる高エネルギー粒子輸送解析[3]と摂動論的シミュレーションを行った。これらの研究では、HINT コードを用いて計算した MHD 平衡データと Spong 博士によって開発された AE3D コード[4]によって見いだされた二つの n=1 トロイダルアルヴェン固有モード(TAE モード)が用いられている。アルヴェン固有モードバーストの摂動論的シミュレーションでは、入射エネルギー180keV の順進行および逆進行の中性粒子ビームをそれぞれ 2.5MW で入射

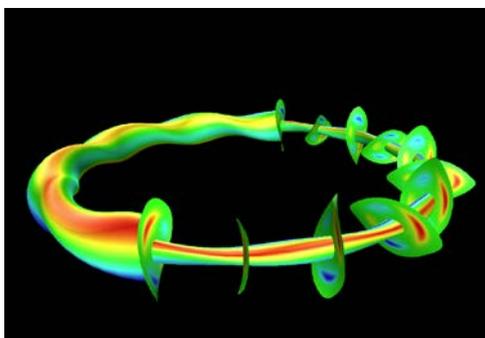


図 4.2.2.2-1 MEGA コードを用いて計算した LHD におけるアルヴェン固有モード

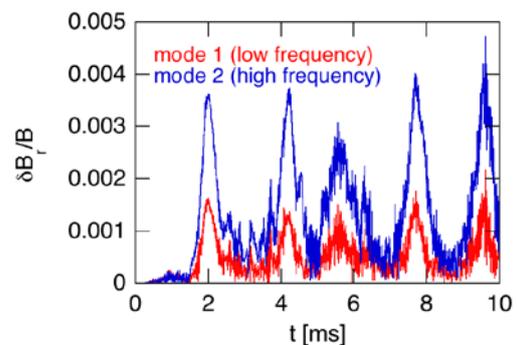


図 4.2.2.2-2 2つの TAE モード振幅の時間発展

した（合計5MW）。高エネルギー粒子減速時間を100ms、TAEモードの減衰率と角周波数の比を6%とした場合に、約2ms間隔でTAEバーストが発生した。図4.2.2.2-2に2つのTAEモード振幅の時間発展を示す。アルヴェン固有モードのバースト現象が定性的に再現された。

LHDにおいてNBIとICRFによって生成される高エネルギーイオンの閉じ込めに関するシミュレーション研究が京都大学との共同研究により進められている[2]。5次元位相空間における高エネルギー粒子ドリフト運動論シミュレーションコードGNETを用いて高エネルギーイオンの定常分布が得られており、プラズマ加熱手法に依存した高エネルギーイオン分布の特徴が明らかにされた。LHDプラズマの磁気軸位置を大半径方向内側に強く移動させることによって高エネルギーイオン閉じ込めが改善することが示されている。

- [1] Y. Todo et al., Plasma and Fusion Research, **5**, S2062 (2010).
- [2] Y. Todo et al., Fusion Science and Technology, **58**, 277 (2010).
- [3] Y. Todo et al., Plasma and Fusion Research, **3**, S1074 (2008).
- [4] D. A. Spong, E. D' Azevedo, and Y. Todo, Physics of Plasmas **17**, 022106 (2010).

4. 2. 2. 3 運動論的輸送解析

LHDにおける輸送特性の理解を深め、数値実験炉におけるコア輸送モデル構築、ならびに、将来の実験炉・実証炉における閉じ込め性能の予測と最適化へ寄与するために、運動論的理論およびシミュレーションに基づいた磁場閉じ込めプラズマの輸送研究が進められている。精密な理論・解析モデルの拡充、重水素実験に向けた理論・数値モデリング、ならびに環状プラズマの総合的理解に向けた研究において多くの進展が見られた。

LHD実験計測をもとに再構成された平衡磁場データと密度・温度分布を使って、実験に適合したジャイロ運動論的シミュレーションを行うGKV-Xコードを開発した[1]。イオン温度勾配(ITG)乱流輸送シミュレーションから見積もられたイオン熱流束は、実験から得られたデータと非常に良い一致を示している(図4.2.2.3-1)。さらに密度揺動計測とシミュレーションとの比較においても矛盾のない結果が得られた。LHD実験の精密な解析と輸送機構の定量的理解をはかる上で有用な成果であり、今後さらにモデルの拡張と精密化を継続的に進める計画である。

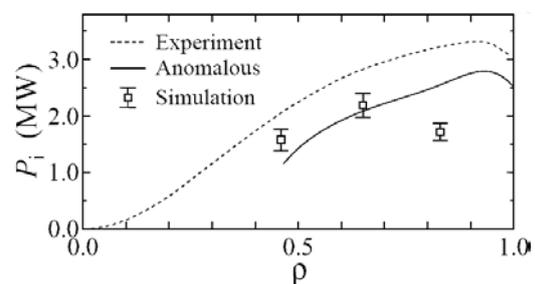


図 4.2.2.3-1 ジャイロ運動論的シミュレーションから得られたイオン熱輸送フラックス(丸印)とLHD実験から見積もられた値の比較

中心で高い電子温度を持つ LHD の CERC (Core Electron Root Confinement) プラズマに適用できるように、3次元磁場形状と有限軌道幅効果を考慮したグローバルな新古典輸送解析コード FORTEC-3D を拡張した[2]。これを用いて LHD 実験における径電場分布を解析したところ、計測結果を良く再現する結果が得られた (図 4.2.2.3-2)

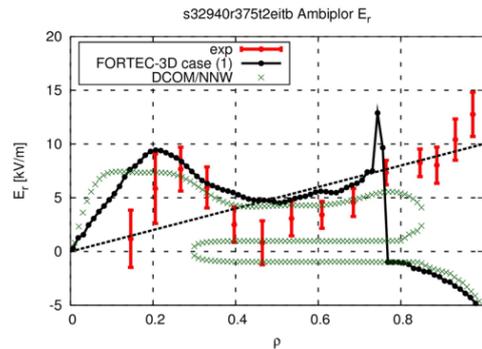


図 4.2.2.3-2 LHD の CERC プラズマにおいて観測された径電場分布と FORTEC-3D(黒線)との比較。中心領域での電場を良く再現している。

新古典輸送により形成される平衡径電場によってゾーナルフロー応答特性が増大することが理論的に示された[3-4]。さらにポロイダル面においてグローバルに取り扱えるように GKV コードを拡張し、径電場によるゾーナルフロー応答の増大とそのマッハ数依存性を明らかにした (図 4.2.2.3-3)。これにより、イオン質量数が増加する重水素実験において、LHD プラズマ中にゾーナルフロー生成が促進されることが示された。さらに、LHD プラズマ中の乱流輸送に対して径電場を介した同位体効果がどのような影響を及ぼすかについて、ジャイロ運動論的シミュレーションによる解析が進められている。

FORTEC-3D コードは、非軸対称磁場摂動をもつトカマクプラズマにおける新古典トロイダル粘性 (NTV) 効果の定量的解析にも適用された[5]。磁気面を作らない乱れた磁場領域においても新古典輸送を解析することのできるシミュレーション・コード KEATS が開発され、共鳴摂動磁場を与えたトロイダルプラズマ中でのイオン熱輸送の計算が可能となった[6]。また、ヘリカルプラズマにおいて効率的なジャイロ運動論的シミュレーションを可能にする新たな計算手法が開発された[7]。運動論的電子を取り入れ、さらに電磁的揺動を扱うように、ジャイロ運動論的シミュレーション・コードの拡張がなされた。スラブ ITG 乱流輸送のイオン/電子質量比依存性の解析が行われた[8]。

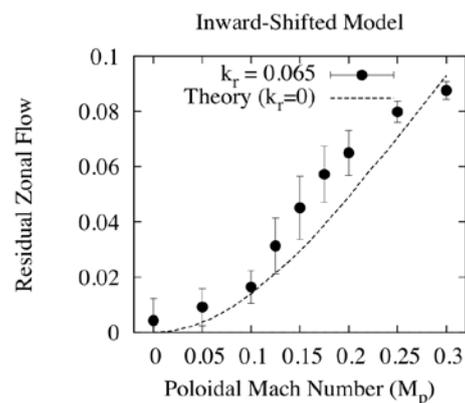


図 4.2.2.3-3 LHD の内寄せ磁場配位モデルにおいて見出されたゾーナルフロー応答特性のポロイダルマッハ数依存性。これをもとに、乱流輸送に対する同位体効果が期待される。

- [1] M. Nunami et al., Plasma Fusion Res. **6**, 1403001 (2011).
- [2] S. Matsuoka, et al., Phys. Plasmas **18**, 032511 (2011).
- [3] T.-H. Watanabe, H. Sugama, and M. Nunami, Nucl. Fusion **51**, 123003 (2011).
- [4] H. Sugama and T.-H. Watanabe, Phys. Plasmas **16**, 056101 (2009).
- [5] S. Satake et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 055001 (2011).
- [6] R. Kanno et al., Plasma Phys. Control. Fusion **52**, 115004 (2010).
- [7] S. Maeyama et al., Plasma Fusion Res. **6**, 2401028 (2011).
- [8] A. Ishizawa et al., Plasma Fusion Res. **6**, 2403087 (2011).

4. 2. 2. 4 流体乱流輸送解析

流体的描像に基づいて、トロイダルプラズマにおける乱流輸送現象の理論体系構築、特に、乱流輸送の構造形成およびLHD実験結果における輸送に関する物理機構解明に向けた数値シミュレーション研究が進められた。

LHDの実験結果において静電ポテンシャルの振動現象が観測されている。輸送シミュレーション解析により、巨視的な電場の振動現象を得ることができた(図4.2.2.4-1)[1]。解析により得られた振動周期・振幅や振動現象の現れるパラメータ領域は、実験結果と同程度である。

乱流シミュレーションデータ上で実験計測と同様の操作を行うことにより、LHDの乱流輸送現象を描き出すための乱流計測シミュレータ研究が進められている。これまでに重イオンビームプローブ、位相コントラスト干渉計、ビーム発光分光法などを模擬した揺動計測モジュールが開発された。ヘリカルプラズマにおけるドリフト交換型モードコードから得られた3次元乱流場時系列データに適用し、特徴的な空間スケールを持つ乱流構造に対する有限空間分解能での計測、線積分量として得られる信号から局所的な値を抽出する手法について研究がなされた[2, 3]。また、簡約化二流体方程式の3次元シミュレーションコードを用いて、外部入力によって駆動された有限ベータプラズマにおける乱流の熱輸送を解析し[4]、温度分布の硬直性が示された。また、UCSDとの共同研究により磁気島がある場合のイオン温度勾配不安定性 (ITG) 研究がなされた[5]。今後、流体乱流輸送コードの適用領域を広げ、開発された解析モジュールのヘリカルプラズマにおける統合コードへの適用により、実験プラズマに対する理論予測を目指す。

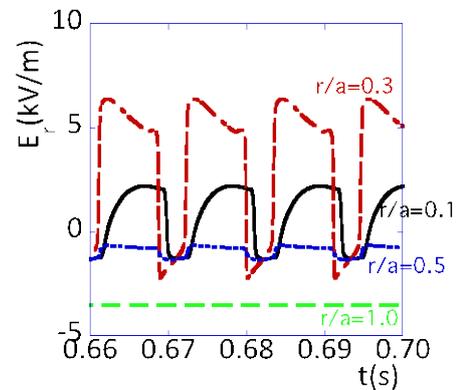


図 4. 2. 2. 4-1 電場 E_r の自励振動

- [1] S. Toda and K. Itoh, Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 105011 (2011).
- [2] N. Kasuya et al., Plasma Sci. Tech. **13**, 326 (2011).
- [3] N. Kasuya et al., Plasma Fusion Res. **6**, 1403002 (2011).
- [4] A. Ishizawa and N. Nakajima, Nucl. Fusion **49**, 055015 (2009).
- [5] A. Ishizawa and P. H. Diamond, Phys. Plasmas **17**, 074503 (2010).

4. 2. 2. 5 周辺プラズマの物理とプラズマ・壁相互作用の研究

LHD における周辺プラズマでの不純物輸送シミュレーション研究は三次元流体コード EMC3-EIRENE によって行われてきたが、計算技術的制約から現在はダイバータレグが計算領域に含まれておらず、不純物源とレグ部における輸送が模擬的に扱われている。周辺プラズマをより詳細に調べるために ERO (erosion and redeposition) コードを用いた共同研究が行われた。

ダイバータ部から生成される炭素不純物の第一壁への再堆積機構とその分布の研究がなされた ([1]および図 4. 2. 2. 5-1 参照)。中性炭素粒子はストライクポイントから直線的に広がり、電離した炭素イオンはプラズマ摩擦力によって壁近傍に局在している。ダイバータ部下側の壁面への炭素再堆積分布を図 4. 2. 2. 5-2 に示す。ダイバータ板付近では、対面側に比べて隣接側の寄与が圧倒的に多いことがわかる。対面側から来た炭素原子はダイバータレグのプラズマによって電離するために再堆積量が減っている。ダイバータ板近くに堆積が多く、離れると少ないまたは無いという傾向や、中性粒子のために堆積に方向性があることは実験観測結果を再現している。

LHD ダイバータレグ部にガスパフで導入された不純物がどのように輸送されるかを、ERO を用いて調べた [2]。図 4. 2. 2. 5-3 はガスパフされたネオンの空間分布を示す。ネオンガスは図中の青点線で示したレグで大部分がイオン化され、下流側へ押し流されていることがわかる。ダイバータへ到達したイオンによるタングステン(tungsten)のスパッタ

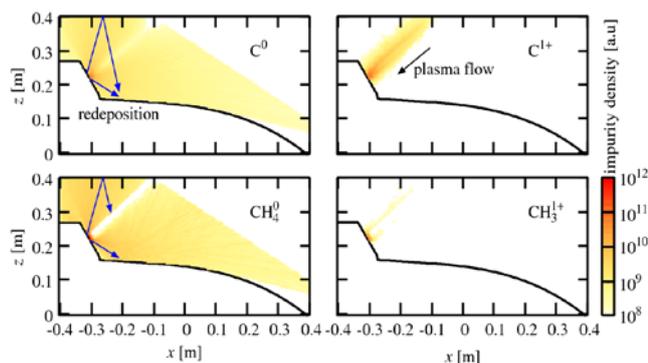


図 4. 2. 2. 5-1 ダイバータ部での炭素不純物の分布

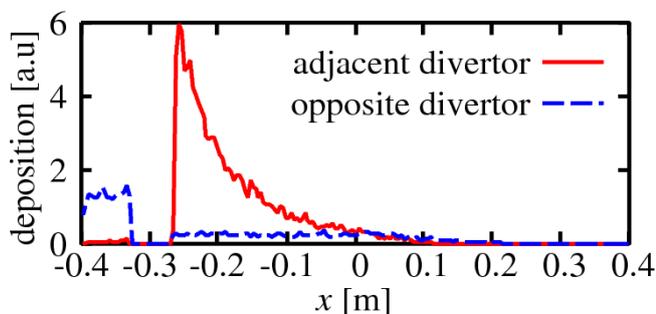


図 4. 2. 2. 5-2 壁面への炭素再堆積分布。赤実線は下側の近接したダイバータ板からの炭素、青点線は上側の対面したダイバータ板からの炭素の寄与を表す。

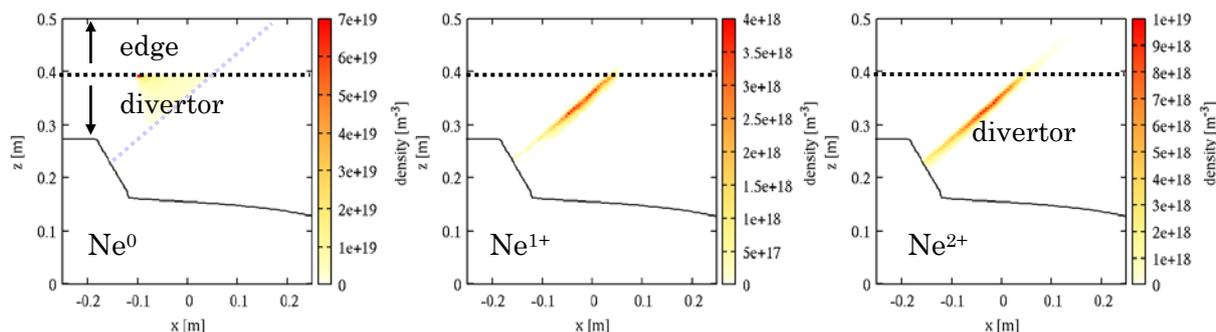


図 4.2.2.5-3 ガスパフされたネオン原子および電離したイオンの空間分布。レグの付け根に向かって水平にガスを噴射している。イオンはほぼ全てダイバータ側へ輸送されている。

量、またその再堆積量の評価を行い、2/3程度のタングステンが再堆積する結果を得た。また、ガスパフ量を与えたときの損耗率の評価について検討し、装置形状やプラズマ中でのイオン拡散係数のモデル化など、定量評価へ向けての課題を明確にした。

これまでの成果を踏まえて、「拡張版 EMC3 コード」の開発を進めている。これは、EMC3 コードをダイバータレグプラズマまで含んだ領域にまで拡張するもので、そのメッシュ構造を図 4.2.2.5-4 に示す。今後、これを基盤にして閉構造化ダイバータにおけるモンテカルロ法によるプラズマと中性粒子の振る舞いを研究していく。周辺プラズマ輸送シミュレーションコードのモンテカルロ法計算スキームの改善も進めている [3]。拡張版 EMC3 とプラズマ壁相互作用コード (ERO コード等) を結合することにより、「周辺プラズマ統合コード」を目指す。

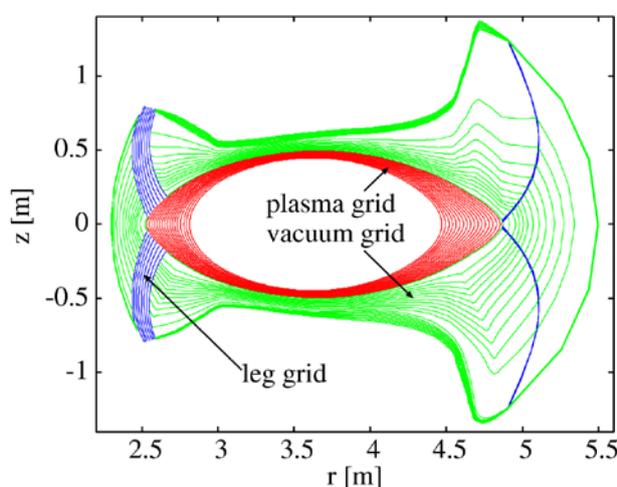


図 4.2.2.5-4 拡張版 EMC3 コードのメッシュ構造。

- [1] G. Kawamura et al., Contrib. Plasma Physics, **50**, 451 (2010).
- [2] G. Kawamura et al., 20th Int. Toki Conf. P2-22.
- [3] R. Kanno et al., Plasma and Fusion Res. **6**, 2403066 (2011).

4. 2. 2. 6 統合輸送解析コードの開発と LHD 実験への適用

LHD をはじめとした環状磁場閉じ込めプラズマの物理機構解明と体系化に資するため、統合輸送解析コード TASK3D の開発とその LHD 実験適用・検証を展開している。TASK3D は、トカマクを対象とした統合解析コード TASK[1] を基盤として、ヘリカルプ

ラズマにおける特有の物理機構や、各種物理要素モジュールの3次元平衡データとの連携機能などを追加する形で開発を進めている。TASK3Dによる実験データ解釈の精度と、重水素実験、さらには炉心プラズマ設計などの新たなパラメータ領域に向けた予測精度を高めるためには、LHD 実験データへの適用を通じた理論モデルの検証と改良・拡張や、大規模シミュレーションとの連携による新たな理論モデルやデータベースの導入などを進める必要がある。

TASK3Dの各種物理要素モジュールの開発状況概観を図4.2.2.6-1に示す。ヘリカルプラズマ特有の物理過程として、回転変換の時間発展解析モジュールEI[2]、新古典拡散の、3次元磁場構造および径電場への依存性を高精度かつ迅速に評価可能ならしめているデータベース

DGN/LHD[3]、さらに、ヘリカルプラズマの径電場形成機構の支配的因子であることが認識されている新古典両極性径電場[4, 5]を算出するモジュールER、圧力交換型モードの圧力分布平坦化をモデル化したモジュールMSSH[6]などの開発と整備が進められ、それぞれ単体あるいは、径方向拡散輸送方程式を解くモジュールTRなどと統合した形でLHD実験への適用・検証を進めてきている。

また、LHDにおけるNBI、ECH、ICH加熱へのモジュール対応も進めている。NBIに関しては、すでにLHD実験解析に広く用いられてきているFIT3D[7]、また、特に低磁場において影響があると考えられる再突入粒子を考慮したMORH[8]の開発・検証が進んでいる。LHDのECHグループで開発され、運用がなされてきた光線追跡コードLHDGauss[9]のTASK3Dへの導入や、ICH加熱解析のためにTASKコードの波動伝搬解析モジュールWMの3次元平衡との連携・計算の妥当性確認などの作業も進展している。

モジュール統合とそのLHD実験への適用を促進するために、定常熱輸送解析パッケージTR-snap[10]のリリースを2011年度に行った[11]。3次元平衡(VMEC、BOOZER)、NBI加熱(FIT3D)、パワーバランス(TR)の各モジュールを統合することで、NBI加熱プラズマの定常熱輸送解析を行うものである。一方、実座標における温度・密度計測データを磁気座標上にマッピングする手法が整備され、ほぼショット間(<3分)でその処理が済み、情報が入手できる状況である[12]。このマッピングに対応したVMEC平

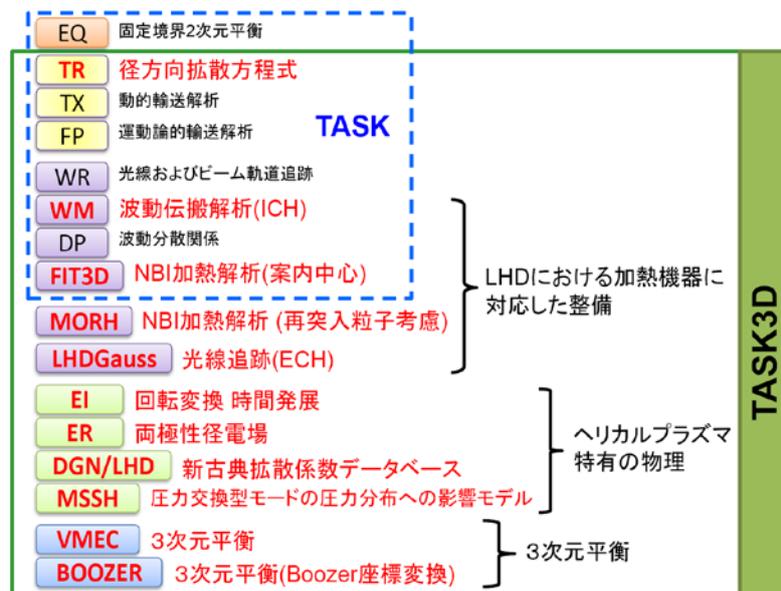


図4.2.2.6-1 TASK3Dのモジュール整備状況概観。モジュール名とともに、それらが記述する物理過程を記載。

衡の再構築とともに、温度・密度の分布情報、NBI のビームエネルギー・入射パワーを TR-snap の入力として提供するインターフェイスを整備したことで、TR-snap と LHD 実験データとの連携が格段に向上し、熱輸送解析の大幅な迅速化が実現した。LHD 制御室でのリアルタイムの議論(例:電子密度分布と NBI 加熱分布の相関など)に対して、定量性ある知見を提供するに至っている。また、実験解析のみならず、時間発展を考慮したプラズマパラメータの予測計算への TASK3D 適用にも着手しており、実験シナリオ立案などへの寄与も期待できる。実験解析によるモジュールの妥当性検証・改良を進めていくことで、TASK3D のさらなる機能拡充と予測精度の向上を図り、重水素実験、さらには、炉心プラズマ設計などへの貢献を図っていく計画である。

TASK3D の開発は、数値実験プロジェクトの統合輸送コードグループの主導で進めているが、主に京都大学との共同研究、大型ヘリカル装置計画プロジェクトとの強い連携作業によって大きな進展を実現している。さらに、FFHR 設計への適用を通じた貢献を図るべく、核融合工学研究プロジェクトとの連携活動にも着手している。

- [1] A. Fukuyama, TASK code Homepage: <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>.
- [2] Y. Nakamura et al., Plasma Fusion Res. **3**, S1058 (2008).
- [3] A. Wakasa et al., Contributions to Plasma Phys. **50**, 582 (2010).
- [4] K. Ida et al., Nucl. Fusion **45**, 391 (2005).
- [5] M. Yokoyama et al., Nucl. Fusion **47**, 1213 (2006).
- [6] M. Sato et al., Contributions to Plasma Physics **50**, 665 (2010).
- [7] S. Murakami et al., Trans. Fusion Technol. **27**, 256 (1995).
- [8] R. Seki et al., Plasma and Fusion Res. **5**, 027 (2010).
- [9] S. Kubo, National Institute for Fusion Science, private communication.
- [10] R. Seki et al., Plasma and Fusion Res. **6**, 2402081 (2011).
- [11] <http://task4lhd.lhd.nifs.ac.jp/>.
- [12] C. Suzuki et al., to be presented at the 18th International Stellarator-Heliotron Workshop (Jan. 2012).

4. 2. 2. 7 プラズマシミュレータ中間レベルアップ

平成 21 年 3 月から 6 年間の借入契約で導入されたプラズマシミュレータは、平成 24 年 9 月に性能向上のための中間レベルアップが予定されている。平成 21 年 3 月から平成 24 年 8 月までの借入期間前半（フェーズ 1）では、プラズマシミュレータの中核装置である大規模並列型計算サーバは 128 ノードの日立製作所製 SR16000 モデル L2 で構成されており、総演算性能（理論値）77TFlops, 総主記憶 16TB, 外部記憶装置容量 0.5PB である。中間レベルアップでは計算機の機種を更新し、性能をそれぞれ 315TFlops 以上、32TB 以上、2PB に向上する。平成 24 年 10 月から借入期間後半（フェーズ 2）の運用を開始する。

中間レベルアップにより、これまでに整備されてきた解析コードをより精密かつ高速に実行することが可能になる。LHD における実験結果の理解を深めるとともに、新たな実験計画の提案につながるシミュレーション研究の進展が期待される。

5. 共同利用・共同研究の推進

5. 1 一般共同研究・LHD 計画共同研究・双方向型共同研究

LHD 計画は全て、第2章の体制に関わるところで述べたように共同研究を基本として遂行されている。共同研究については昨年度の外部評価で研究所全体としての活動評価をいただいております。LHD 計画もその中に含まれていたことから、ここでは、昨年度から更新されたデータを交えつつ、LHD 計画に固有の事項について述べる。図 5. 1-1 に LHD 計画に関わる共同研究採択件数の推移を示す。分類は、一番下から(一般共同研究のカテゴリーの大型ヘリカル装置プロジェクトの大型ヘリカル装置実験共同研究 (青) と実験技術・開発共同研究 (茶)、LHD 計画共同研究のプラズマ (ピンク)、炉工学 (緑) である。このうち、青の大型ヘリカル装置実験共同研究は LHD を利用して直接、実験に参加するものであり、この件数が平成 19 年度の 33 件から、平成 23 年度には 47 件に増加している。これに、所内や海外からの実験サイクル毎の提案者を合わせて、LHD 実験に関わる研究者及び学生の正味の人数の推移を示したものが図 5. 1-2 である。

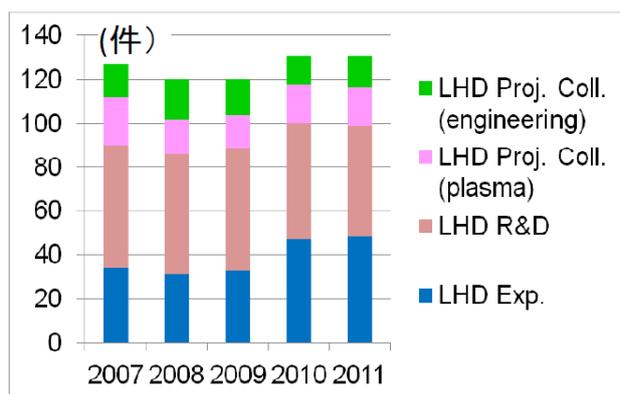


図 5. 1-1 LHD 計画関連の共同研究採択数の推移

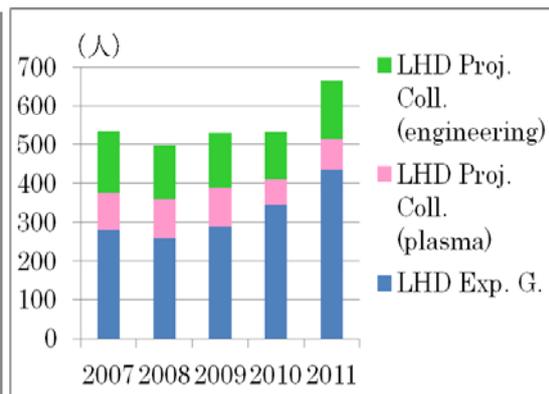


図 5. 1-2 LHD 計画関連の共同研究参加者数 (正味) の推移

採択件数はほぼ一定で 120 件前後であるが、これらの共同研究への正味の参加者数が平成 19 年度の 533 名から平成 23 年度では 644 名へと 2 割以上増加した。

一般共同研究を通して、第3章に見られる多様で先駆的な成果が得られた。図 5. 1-3 に核融合科学研究所の共同研究論文数の推移を、論文の第一著者が所内所外に分けて示す。約半数が所外研究者の貢献である。ここでは、研究所全体の論文数の統計であるが、LHD 計画がその主要な部分を占めていることは明らかである。さらに図 5. 1-4 に核融合科学に関わる代表的な学術誌である、Physical Review Letters, Nuclear Fusion, Plasma Physics and Controlled Fusion, Physics of Plasmas の4誌に掲載された LHD 計画に関わる論文数の推移を示す。年間 30 件程度の論文が掲載され、ここでも所外研究者の貢献が非常に大きいことが分かる。

一般共同研究では、実験を企画し、マシンタイムを要求しての実験の遂行を行うものから、LHD 実験で得られたデータベースを利用するものまで幅広くある。また、大学側で LHD 実験のために研究開発を行う、LHD 計画共同研究によって、多様な機器や解析手法が LHD 実験に直接応用され、一般共同研究に引き継がれるとともにそこでの重要な研究プラットフォームとなっている。また、双方向型共同研究では、大学のセンターとの間で非常に強固な組織的協力による役割分担によって相補的に研究を加速している。

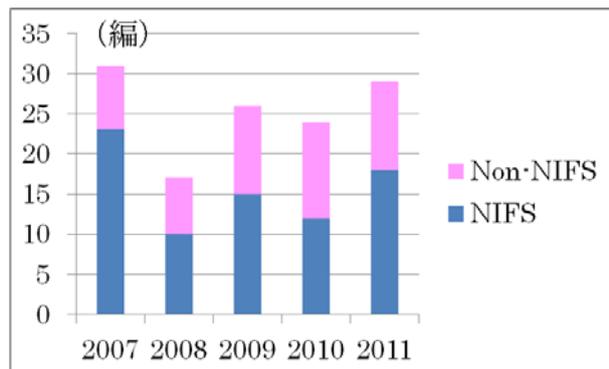


図 5.1-3 核融合科学研究所の共同研究による論文数の推移

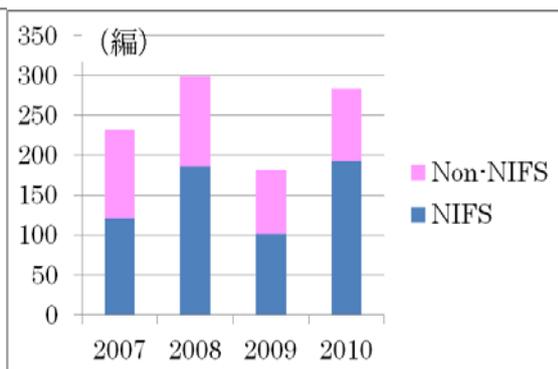


図 5.1-4 代表的学術誌(PRL,NF,PPCF,PoP)でのLHD計画に関わる掲載論文数の推移

研究成果の具体例については第3章にある通りであるが、いくつか例をあげる。一般共同研究では、東北大学とは、高イオン温度プラズマにおけるリサイクリングの研究や、電極バイアスによる電場分岐の実験などが進められ、九州大学とは、LHD 計画共同研究により開発され非局所輸送に関わる過渡応答解析を LHD 実験に応用して、乱流の長距離相関を同定するなど、新しい物理の知見が開かれている。プラズマ壁相互作用は最も共同研究が盛んな分野の一つであり、北海道大学、静岡大学、九州大学、名古屋大学、室蘭工業大学、京都大学などと、材料へのプラズマ照射を中心とした共同研究が幅広く展開されている。このカテゴリーにおける原子分子過程に関する共同研究は大きな展開を見せている。ここでは所外提案による共同研究課題が主体となっていること、プラズマ・核融合研究以外の原子物理学、天体物理学、光源開発を目的とした分野の基礎研究と直結している課題を実施していることが特徴である。

LHD 計画共同研究の例として、高密度・ダイバータに関する物理研究ではモジュールモデルを用いた研究を東海大学との共同研究で行った。これは LHD 計画共同研究を通じて東海大学で製作した V 字型閉構造ダイバータモジュールを、平成 22 年度より LHD で実機実験を開始したものである。ターゲット板にはプローブアレイが取り付けられており、ダイバータプラズマが非接触に至る過程など、基礎的な物理機構の解明を行っている。V 字構造ダイバータはトカマク装置でも採用が検討されており、LHD における実験結果は極めて有益である。

京都大学と核融合科学研究所で LHD 計画共同研究により開発されたヘリカル系の統合シミュレーションコード TASK3D の改善を進め、実験データに対応した新古典輸送

解析(データベースの構築、その活用)、径電場解析(特に HIBP 計測結果との比較)、パワーバランス輸送解析を行い、さらに、加熱パワーの進展によって進捗が期待されるパラメータ領域での径電場予測、その新古典熱輸送低減効果について定量的把握を進めた。これには双方向型共同研究も連携している。

双方向型共同研究との相乗効果で顕著なものは、筑波大学とのジャイロトロンの開発であり、LHD 用大電力 77GHz ジャイロトロンの開発と導入に直接貢献している。これによって、3本の77GHz管の導入が完了し、3.7MWのECHパワーで20keV以上の電子温度達成につながった。また、京都大学とは高エネルギー粒子駆動のMHD不安定性に関するデータベース化の作業が双方向型共同研究を通じて進められている。

5. 2 広い分野との連携による学際的展開

核融合科学に留まらない広い分野との連携による学際的研究の展開は、新しい研究課題や分野の創成を通じて、大学等の発展に大きく貢献するものであり、LHD計画の中でも、LHDの実験装置としての活用と、LHD計画から得られた知見の展開を促している。

特に、安定、定常、堅牢なLHDプラズマの特長を活かした光源としての利用が多様に進んでいる。この研究展開を担っているのが3.3.6節で述べた「LHDを用いた原子・分子過程研究」である。1eV以下の周辺プラズマから10keVのコアプラズマまで、広い電子温度領域が得られ、分子から多価イオンまで、多種多様の発光線が観測できること、プラズマ中心の電子密度として、 10^{18}m^{-3} 以下の低電子密度放電から、 10^{21}m^{-3} を超えるような高密度放電まで可能なこと、不純物許容量が高く、高Z元素不純物入射も可能なこと、そして、これらのプラズマのパラメータが分布を含めて精密に測定されていることは、世界にない大きな特長である。これにより高Z元素、多価イオンの波長など原子データの測定による原子構造における相対論効果や量子電磁気学効果の検証、分光モデルの検証、プラズマ中の衝突素過程の断面積など原子データの検証といった基礎研究、新しいプラズマ診断法の検証、分光データや検証した分光モデルを必要とする他の研究分野への展開、高分解高速分光計測によるプラズマダイナミクス研究への応用などを目指して、様々な研究課題を推進した。これらの課題は原子物理学、天体物理学、光源開発を目的としたものであり、プラズマを光源とした異なる分野の基礎研究である。また、これらの課題のほとんどは一般共同研究課題として所外より、提案され、実行されている。中でも、太陽コロナの加熱機構の解明を目的としたLHDと太陽観測衛星「ひので」による非平衡プラズマの研究が共同で進められている。プラズマパラメータが良く分かっており、なおかつ制御できるLHDのプラズマを利用して、鉄イオンスペクトル線解析を行い、これを太陽活動領域の電子密度分布の評価に応用するなど、多くの成果が上がっており、平成17年の協力開始以来、20篇の共同論文が発表されている。

もう一つ、特筆できる連携研究が実験室プラズマの自発回転と太陽の差動回転との

共通の物理を探る国立天文台との連携である。太陽では赤道に近い方が、回転が速いことが知られており、最近のLHDでもプラズマの自発回転が精密に議論されるようになりつつある（図 5.2-1 参照）。このことから、乱流駆動の角運動量輸送をテーマとして議論を進めている。

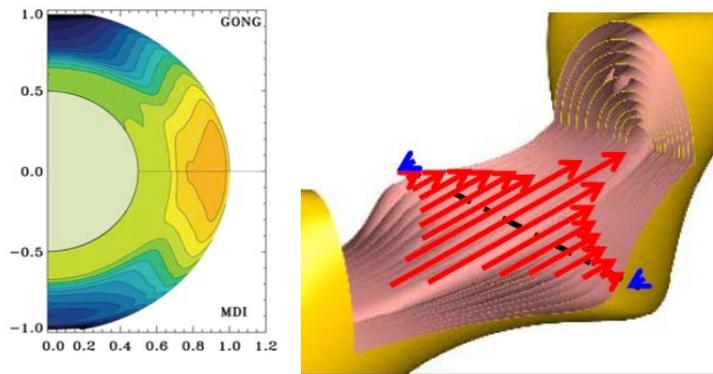


図 5.2-1 左：太陽断面の周回回転分布、右：LHD プラズマ中のトロイダル回転分布

また、平成 23 年度から回転系の乱流場が自発的に形成する流れ場に関する研究が新たに開始されている。これは、上記の“実験室プラズマの自発回転と太陽の差動回転の共通物理を探る連携研究”の中で提案されたものであり、電気対流を用いる制御された乱流場実験と太陽観測およびそのシミュレーション研究との連携研究である。これにより、共通の支配方程式系で記述される乱流から駆動されるトーラスプラズマの乱流駆動帯状流（閉じ込め改善機構のひとつ）と回転する天体球殻にみられる差動回転や帯状流駆動機構の統一的理解の進展が期待されている（図 5.2-2 参照）。これらの分野横断的な共同研究は、関連学会の間で進展している連携活動と連動して、トーラスプラズマの物理研究の裾野を広げる活動が機能した成果である。

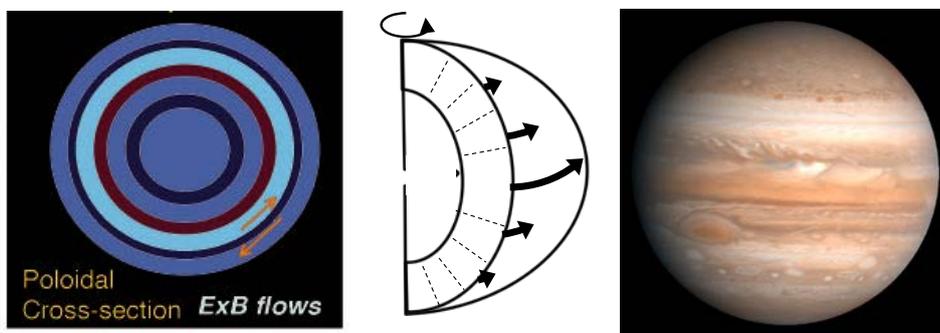


図 5.2-2 (左) トーラスプラズマ中の帯状流の概念図、(中図) 太陽対流層の作動回転、および (右) 木星の帯状流

太陽では差動回転や子午面還流の機構が謎で、多くの研究者が関心を持つ話題になっている。一方、磁場閉じ込め実験室プラズマでは、自発的トロイダル回転が話題となっている。実験室プラズマと太陽と何が同じで何が異なるのか、同じ物理はあるのか、について核融合科学研究所と国立天文台との学術連携として、共通の話題となりえる「回転」をテーマに「共通の物理」を議論する会合を平成 22 年度より開催してきている。第 1 回は「実験室プラズマと太陽プラズマ研究のシナジー効果を目指して」をテーマに会合を行い、太陽の差動回転と高温プラズマの自発回転を紹介し、太陽と

実験室プラズマの比較を行った。第2回は「乱流駆動の角運動量輸送」をテーマに会合を行い、太陽の対流・差動回転・子午面環流、日震学、核融合プラズマの MHD Spectroscopy についての発表に続いて太陽と実験室プラズマのパラメータ比較を議論した。その後、今後の研究の発展として、太陽の差動回転を実験室で作る可能性や、レイノルズ応力と流れの計測について議論を行った。今後、引き続き、太陽の差動回転とプラズマの自発的回転はどこまで類似性があるか、を議論していくこととなっている。

この他、材料関係は学際的展開の潜在性が高い。核融合分野外との協力としてプラズマ放電中に移動するダスト捕獲のため、KEK 及び JAXA/千葉大から提供された SiO_2 エアロゲルを用いた実験を行った。エアロゲルの特性評価、事後解析手法に関する情報の相互交換により、双方の分野における進展が得られている。

6. 国際的COEとしての国際連携・共同研究の推進

6. 1 国際共同研究

図 6.1-1 に示すように海外からの LHD 実験への参加者は大きく増加している。これは LHD 実験が世界的に評価されてきている証左であると考えられる。トカマク研究にあっても定常や3次元の物理など、包括的な取り組みと理解を必要とする課題が明確になりつつあり、LHD の先駆性とともに、その実験プラットフォームとしての魅力が増してきていることは明らかである。

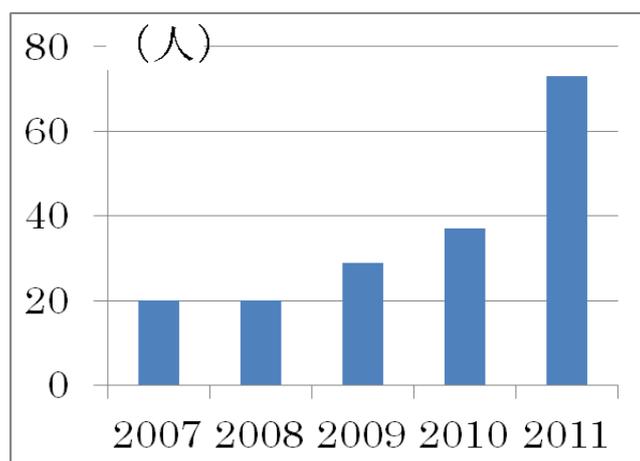


図 6.1-1 海外からの共同研究者数の推移

また、LHD 計画では海外からの実験参加を促すために、英文での資料集 LHD Technical Guide Book の刊行や、第2章で述べた海外の実験参加手続きの明確化などを図ってきた。

最近の国際連携の端的な例は共鳴磁場摂動と磁力線のストキャスティック化を理解するための共同研究である。このテーマは3次元の物理としてその包括的理解が、学術的に非常に価値が高いとともに、ITERにおけるELM緩和に関わり、緊急かつ決定的な課題となっている。このため、核融合科学研究所とジェネラルアトミックス社のDIII-Dチームが共同実験プログラムとして双方向に組織的に取り組み、米国のプリンストンプラズマ物理研究所およびオークリッジ国立研究所と我が国の日本原子力研究開発機構の研究者も加わっている。図6.1-2にその共同実験のスナップ写真を示す。



図 6.1-2 LHD における磁場構造の同定に関する共同実験に参加する米国の共同研究者たち

また、組織的な国際共同研究の好例として、機関間の学術交流協定に基づき、かなり大がかりな装置を持ち込んでの共同研究が 2 例進められている。一つ目は米国のプリンストンプラズマ物理研究所との X 線結晶分光イメージング測定器の導入である。分光システムをプリンストンプラズマ物理研究所が製作し、周辺機器は核融合科学研究所が担当した。平成 22 年度末から取り付けが始まり、平成 23 年度の実験の最初からデータを出すことに成功した。これにより、イオンおよび電子温度の分布について新しい計測手段を手にすることになる。未だ、プラズマ全体を見る視野がないが、初期成果として十分なものであり、平成 24 年度からはプラズマ全体を計測できるようになる予定である。これにより、計測ビームを必要としないイオン温度分布測定が可能となり、波動加熱プラズマや計測ビームが侵入できない超高密度プラズマなどについての輸送研究が大いに進むことが期待される。二つ目は、ドイツのマックスプランクプラズマ物理研究所から高速 IR カメラを持ち込んでの、ダイバータ板上の熱粒子負荷の精密測定に関する共同研究である。 β 値の上昇に伴う磁場構造の変化を反映してダイバータ板上での熱負荷分布が変わることが平成 23 年度の実験で明らかとなった。この実験はドイツの大学院生が長期滞在して博士論文の研究として進めていることも特筆される。ドイツでは W7-X への応用のため、LHD だけではなく TEXTOR の動的エルゴディックダイバータでの実験を相補的に進めており、LHD 計画を軸として、3 次元のストキャスティック磁場中でのプラズマ輸送研究を加速することができている。

この他にも、プリンストンプラズマ物理研究所とはジャイロ運動論シミュレーションと観測される乱流揺動の比較研究、オークリッジ国立研究所とは、アルヴェン固有モードに関する数値コードによる解析の協力、デンマーク RISOE グループと協同トムソン散乱に関する共同研究として散乱スペクトル計算コードのベンチマークなども国際共同研究の好例としてあげられる。

6. 2 ITER/BA 計画への連携及び貢献

ITER/BA 計画は核燃焼プラズマの実証と制御を目指すものであるが、同じトロイダルプラズマであるLHDによる開発研究は核融合炉開発における相補的な役割を果たすものであり、トロイダルプラズマの包括的理解に向けて ITER/BA 計画への積極的な貢献を継続している。

(1) 国際トカマク物理活動 (ITPA) への積極的な貢献

国際トカマク物理活動 (ITPA) は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。また、ITER 機構設立後は ITPA が機構の傘下に置かれ、ITER 設計評価においても ITPA から物理面での多くの指摘がなされ、ITER の実験計画立案にも大きく貢献している。

ITPA は7つのトピカル物理グループ (輸送、周辺とペDESTAL、スクレイプオフとダイバータ、MHD、高エネルギー粒子、定常運転シナリオ、計測) で構成されており、それぞれ年に2回の会合が開かれ、日本、ヨーロッパ、ロシア、アメリカ、中国、韓国、インドの7極から各トピカルグループの委員が参加している。当研究所からは50名中延べ13名の委員を出しており、ITER の喫緊の課題である ELM 制御などに関連して、ヘリカル系の特徴である3次元効果の物理面からの貢献が行われている。特に、「閉じ込めと輸送」及び「ペDESTAL」トピカルグループにおいて、3次元物理セッションが設けられたことは特筆すべき貢献である。図 6.2-1 に示されるように、平成16年度 (2004年) からの ITPA 会合への参加者は延べ158名 (約20名/年) となり、各トピカルグループでの発表件数も115件 (約15件/年) に上っており、ITER の設計活動から実験計画立案に対して、LHD からの成果を中心にしてヘリカル系から多大な貢献をしている。具体的には、LHD における輸送現象、閉じ込めデータベース、MHD 現象、高エネルギー粒子による不安定性の励起、PWI 関連研究、定常運転に関する物理及び技術などが挙げられる。特に、電子輸送障壁、粒子内部拡散障壁、不純物ホール発見、非局所輸送に関する研究、粒子輸送及び乱流輸送の比較研究 (トカマク/ヘリカル)、ペDESTAL 構造形成、トロイダルアルヴェン固有モード (TAE モード) の実験解析及びシミュレーション、ダストやタングステン照射等のプラズマ壁相互作用、損失 α 粒子計測法の開発などについての発表はデータベースの構築やトーラスプラズマの包括的理解を深める上で注目され、大きな評価を得ている。

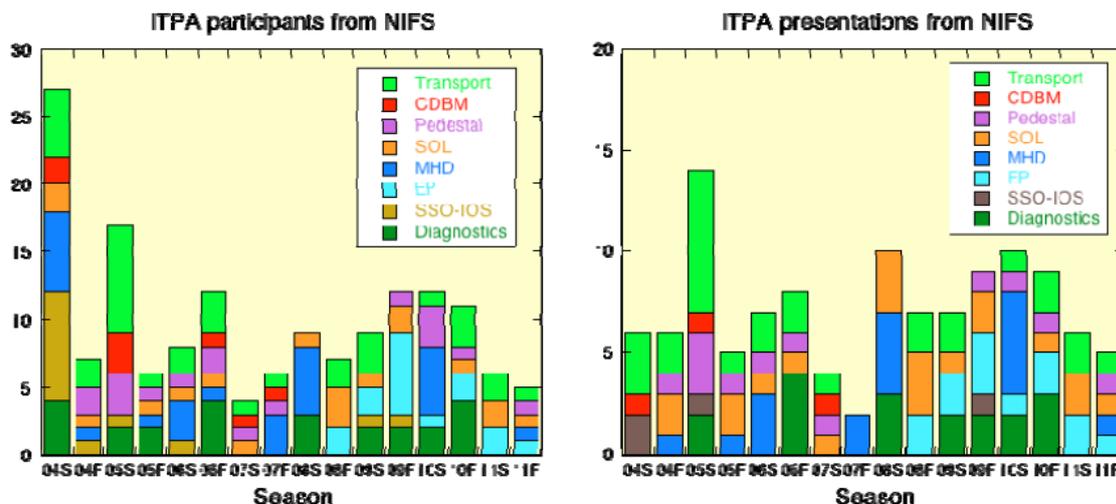


図 6.2-1 ITPA 会合への参加者数と発表件数の推移(Sは春、Fは秋を表す)

(2) ITER への貢献

ITER は 2019 年の実験開始を目指して、本格的な建設が開始された。ITER 建設のために重要な工学的な課題を解決するために、LHD での装置開発、建設及び運転での豊富な実績を生かして、契約による以下の共同研究を実施した。

1) ICH 発振管の出力試験

ITER のイオンサイクロトロン加熱は 20MW 定常を予定しており、定常大電力 4 極真空管の候補として欧州 (タレス : TH525A) と米国 (CPI : 4CM2 500KG) が挙げられている。LHD での ICH 加熱装置開発において達成した米国 CPI 管の 1.6MW/5,000 秒の運転実績が高く評価され、ITER 加熱部門の ICH 責任者から ICH 発振管 (CPI : 4CM2 500KG) の定常出力試験の依頼を受けた。両者協議の上、契約締結 (2008 年 6 月) による共同研究として実施することになった。

LHD 装置の加熱電源施設等を利用しての出力試験では、1 MW/100 秒、1.3MW/10 秒、1.4MW/3 秒の出力試験に成功した。また、H-L 遷移に伴う高周波加熱源への電力反射の影響を調査し、電力反射率の増大に伴う高周波加熱源出力の減少 (スクリーングリッドへの電流制限のため) を明らかにし、報告書にまとめて提出した。

2) 低温冷却システムのリアルタイムシミュレーション

ITER クライオプラントプロセスのリアルタイムシミュレーションに関して ITER から外部委託研究の依頼があり、LHD における低温冷却システムの開発において用いられた開発コードによるシミュレーション研究を実施することになった。研究内容は 3 つの段階に分かれており、第 1 段階では超臨界圧ヘリウム循環テスト装置のモデル化とそのシミュレーションの実行、第 2 段階ではサブクルの ITER 超伝導コイルシステムのモデル化、第 3 段階では ITER コイルシステムに予想されるダイナミックな熱負荷の変動を軽減し、液化機の安定な運転を継続する運転手法の検討を行うことになっている。2010 年 11 月に ITER 担当者とのキックオフミーティングを研究所で行ない、

現在、第1段階において ITER からのクライオプラントの実験データを基にしたシミュレータの精度の確認を行なっている。

3) ITER データ収集の基本設計に向けた調査研究

ITER CODAC (制御・データアクセス・通信システム) におけるデータ収集機能の基本設計に向け、物理データ形式及び関連システムに関する要求仕様分析と関連技術調査に関する ITER の外部委託要請に応える形で、核融合科学研究所が応札し、調査研究を実施することになった (2010年11月から2011年6月までの短期契約)。研究内容は、物理データ形式の分類・分析、定常データ収集方法の検討、ITER データ保存システムの技術検討と提案、ITER サイト内及び遠隔データアクセスの仕様分析等である。LHD で実績を積んできた LABCOM データ収集システムにおける定常データ高速収集や遠隔実験データ収集及び再配信についての報告は大きな評価を得た。

(3) BA 活動への貢献

BA 活動の中心的な計画として位置づけられている JT-60SA 研究計画は、ITER への貢献と DEMO 炉へ向けた開発研究という重要な役割を果たすことが期待されている。大学や研究機関が一体となって推進する体制作りが行なわれており、LHD からの物理的あるいは工学的な貢献として以下のものが挙げられる。

1) JT-60SA リサーチプラン策定への貢献

JT-60SA の建設開始と共に、研究計画の策定作業も始められ、国内重点化装置としての位置付けから国内の大学・研究機関を含めた JT-60SA リサーチプラン検討体制が核融合エネルギーフォーラムのプラズマ物理クラスターを中心にして作られた。各分野 (運転領域開発、MHD 安定性と制御、輸送と閉じ込め、高エネルギー粒子軌道、ペデスタル及び周辺プラズマ特性、ダイバータ、SOL、プラズマ・材料相互作用、炉工学) の国内検討代表者として LHD 実験担当者の3名が選出され、また、日本原子力研究開発機構の専門部会への協力者3名を含めると延べ6名の研究者が JT-60SA リサーチプランの策定に中心的な役割を果たしてきた。さらに、リサーチプランは2010年3月から国内検討が開始され、2011年2月に国内の最終案を完成したが、途中の議論の中での参加者も含めると延べ23名の LHD 関係者が JT-60SA リサーチプラン (Ver. 2.1) の策定への貢献者として名前が挙げられている。

2) JT-60SA 超伝導コイルの性能確認試験

「JT-60SA 超伝導コイルの性能確認試験に関する共同研究」として、LHD 超伝導コイル開発に用いられた世界有数の大型超伝導試験設備を用いた連携研究協力が2007年度から実施されている。既存の設備に熱交換器と断熱容器を増設し、大型強制冷却導体の任意温度における性能評価を可能とし、JT-60SA の試験導体及び実機導体の性能評価を実施している。これまでに EF コイル用の試作導体の分流開始温度測定、試作接続部の抵抗測定、安定性試験及び CS コイル用の実機導体の分流開始温度測定、接続部の抵抗測定を実施してきた。2012年度からは、CS モデルコイル (1パンケーキ) 試験及びモジュール試験を実施する予定である。これらの性能確認試験により、

JT-60SA 超伝導コイルの製作の進展に大きく貢献すると共に、超伝導関連技術における新たな知見を得ることができ、4 件の学術論文を発表するなど学術的な面でも大きく貢献している。

これに関連して、超伝導関連技術における連携協力として、LHD 建設の経験に基づいて、JT-60SA トカマク装置の組立・試験に関する助言を実施しており、JT-60SA の建設においても LHD からの貢献は多大であると言える。

7. 人材育成

核融合研究は長期にわたる事業であることから、不断の人材育成によって世代を繋いでいくことが極めて重要である。特に LHD は国内にあっては唯一の大型核融合プラズマ実験装置であることから、この世界最先端の施設を人材育成、特に世界的にリーダーシップをとれるような国際的水準の研究者の育成のために活用することが核融合コミュニティにおける LHD 計画の責務である。

図 7-1 に平成 19 年度から 23 年度までの LHD 計画に関わる共同研究者の中の正味の大学院生数の推移を示す。常に 150 名を越える大学院生が LHD 計画に参加していることが分かる。特に、平成 23 年度で言えば、総数 183 名となっている。このうち、113 名の大学院生が LHD 実験そのものに関わっている。また、LHD 計画共同研究のみに関わっている大学院生数は 70 名であり、これらの学生も LHD を直接利用してはいないが、各大学において、LHD 実験への応用を動機として、核融合科学に関する研究に携わっている。これらによって、多くの修士及び博士の学位の取得に LHD 計画は貢献している。また、ここには学部生は含まれていないこと、総研大の夏の体験入学などによって広く核融合研究の魅力を伝えていることも重要である。

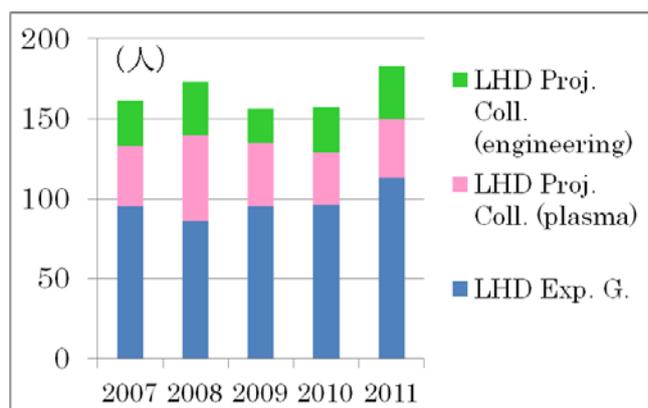


図 7-1 LHD 計画へ参加している
大学院生数 (正味) の推移

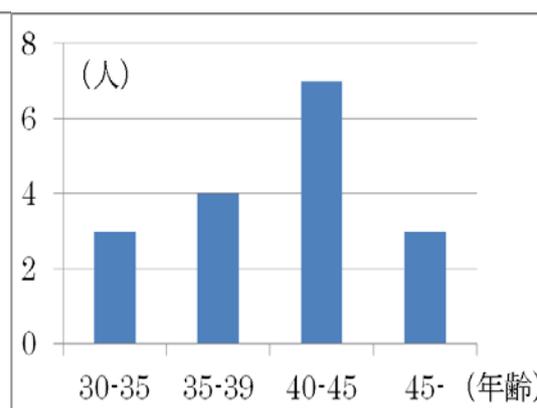


図 7-2 LHD 実験におけるチームリーダー・
サブリーダーの年齢構成

さらに、大学院生の教育だけではなく、キャリアパスの確保は、不断の世代交代のために必要不可欠である。このため、核融合科学研究所ではポストドクトラルフェローとして COE 研究員 (定員 8 名) を持っており、さらに、ほぼ恒常的に助教の採用を進めている。平成 19 年度以来の助教の採用数は以下の通りである。

平成 19 年度	3 名
平成 20 年度	4 名
平成 21 年度	0 名
平成 22 年度	5 名
平成 23 年度	4 名 (予定を含む)

COE、助教とも核融合科学研究所全体の数であるが、LHD 計画は研究所の主計画であること、及び、新しいプロジェクト体制によって所属研究系にとらわれずに各プロジェクトへの参画が可能であることから、これらの若手人材の多くが LHD 計画に貢献していると言える。

大学院、ポスドクに続くキャリアパスにも配慮している。LHD 実験の遂行において、テーマグループにおけるリーダーおよびサブリーダーのリーダーシップは極めて重要であり、実験研究の成否を決めていると言っても過言ではない。基本的にはテーマグループごとのリーダーは所内および所外 1 名ずつの共同リーダー体制とし、1 名ないし 2 名のサブリーダーがサポートしている。図 7-2 の所内のリーダー・サブリーダーの年齢構成を示した。適材適所を旨としているが、人材育成のための若手の任用を方針としている。これによって、30 代前半から LHD 実験のリーダーシップを取り、責任を担う機会が若手に与えられている。

また、海外にも LHD 計画は開かれており、実際、学位取得のため、あるいはポスドクのキャリアのために、長期滞在して LHD 実験研究に従事する例が複数出てきている。例えば、マックスプランクプラズマ物理研究所(ドイツ)との共同研究では、受熱板上の熱粒子負荷分布を計測するカメラシステムを LHD に設置し、分布の β 値依存性より、平衡計算の妥当性を検証するという試みを進めている。ここでは大学院生が、2 次元熱輸送コード THEODOR や、数百枚の特殊な反射鏡を用いた絶対位置較正のスキルを LHD グループに提供すると共に、将来的に平衡の検証結果を得るための研究を進めており、来年度に博士の学位につながる予定である。また、中央環境エネルギー技術センター CIEMAT(スペイン)からは、高速カメラを用いた周辺プラズマ揺動の研究を大学院生が行い、第 37 回欧州物理学会プラズマ物理会議において Itoh Project Prize の次点となる成果を上げている。他にも、Ballooning mode の安定性解析、3 次元 MHD 平衡の再構成、イオン温度計測などにも海外の若手が貢献するとともに、彼らのキャリアパスに LHD 計画が活用されている。

8. 将来計画

第2期の中期計画で、「大型ヘリカル実験装置（LHD）の性能を最大限に発揮させ、ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解に向け共同研究を活用し、学術研究を行う。このため、プラズマ制御、加熱及び計測機器の整備を進め、核融合炉を見通すことができる高性能プラズマを実現する。」と謳っているとおり、LHD計画は今後も、ヘリカル方式による核融合原型炉の設計に必要なデータベースを確立するため、および核融合炉心プラズマとしての環状プラズマの総合的理解のための体系的な学術基盤を確立するために、研究を推進していく。

このために加熱装置の増強、閉構造ダイバータの設置、そして重水素実験の3つを組み合わせ、最高性能化への向上を図っていく。図8-1にこれらの増強計画の両3年程度のあらましを示す。

CY		2011	2012	2013	2014
JFY		2011	2012	2013	2014
Exp. Camp.		15th	16th	17th	18th
NBI	Tangential	16 MW	←		
	Perpendicular	13 MW	←	→18 MW	
ECH	Max	3.7MW	4.5MW	→6 MW	
	CW	0.5MW	0.8MW	→1 MW	
ICH	Max	2 MW	3 MW	→6 MW	
	CW	1 MW	1.5 MW	→3 MW	
Divertor	Baffle & Dome	2/10	8/10	→10/10	
	Cryo-pump	0/10	1/10	→10/10	

図 8-1 LHD の増強計画

特に、来年度からは閉構造ダイバータの構造体がトーラス 10 周期中、8 周期の内側に設置され、1ヶ所ではあるが、クライオポンプの試験的運用を開始する予定である。段階的に両2-3年で、閉構造ダイバータ運転を確立していく計画である。加熱の増強も主加熱源であるNBIシステムのうち、垂直NBIの加速電圧を増加させること、およびECHとICHでは定常プラズマの高性能化に向けた整備を進める。

これらのプラズマ性能の拡大を目指す増強計画に合わせて、より精密な議論を可能とする計測および理論解析モデルの向上を鋭意進め、得られた正確なデータベースを基盤とした体系的理解の確立を進める。

図8-2に国際的な状況をも鑑み、我が国の核融合研究の推進における、LHD計画の

位置づけを時間軸に沿って示した。LHD 計画の目的成就を第 3 期中期計画の終了ごろをターゲットとして取り組み、その後の新しい段階への判断に決定的役割を果たすことを目指すものである。

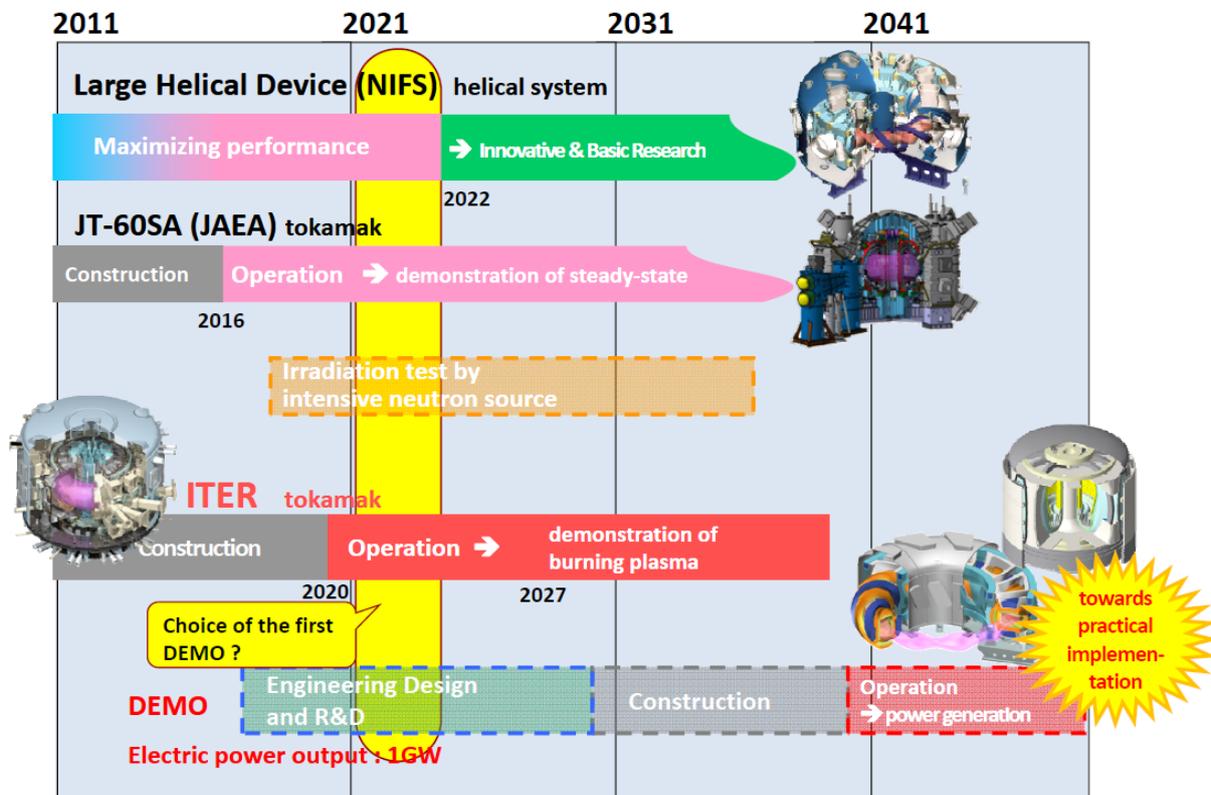


図 8-2 核融合研究開発の進め方

9. まとめ

LHD 計画は平成 10 年度の実験開始以来、14 年間順調に稼働し、核融合科学における大きな成果をあげてきた。計画当初、懸念されていたヘリカル系に固有のリップル損失や MHD 安定性に関する基本的な課題は研究の進展によってほぼ払しょくされ、プラズマ性能は所期の最終目標値に近づきつつあり、密度のように当初の予期を遥かに上回る成果を得たものもある。装置の整備を着実に進めるとともに、新たな発見がプラズマの理解を深め、これらが相乗的に働いてきている。ヘリカル方式における核融合原型炉を見通せるプラズマの実現という縦方向の展開と、環状プラズマの総合的理解という横方向の展開は、極めて相補的であり、共同利用・共同研究というアプローチにより第 3 章で述べたような世界水準の研究成果につながっている。

今後はさらに、ヘリカル方式によるプラズマの点火を確信できるだけのプラズマ性能を示すとともに、学術として体系化された、精密かつ正確な予測性能を備えた環状プラズマの理解を築くために、課題をより明らかにして、その解決に向けた取り組みに計画として集中していく必要がある。このための整備計画は第 4 章に述べたとおりである。一方、このような備えは、計画外の新たな発見や学際的展開の萌芽のために必要不可欠な土壌でもある。また、平成 22 年度に発足した新たなイニシアチブであるプロジェクト体制は流動性と集中を両方高められるものであり、目的の達成のために効率よい環境をもたらすものであると考えられる。

LHD 計画への参画は数だけでなく質も非常に高まってきており、これらのコミュニティからの要請に応えつつ、これらの多種多様な実験提案を問題解決につなげていくことが重要である。これらについての取り組みの実績は第 2、6、7 章で述べたとおりである。

今後の大型科学研究は、これまで以上に「社会の中の科学、社会のための科学」として問題解決への貢献を鮮明にしていくことが求められ、LHD 計画の今後もこれに沿ったものでなければならない。



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所
〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322-6
<http://www.nifs.ac.jp/>