

自然科学研究機構 核融合科学研究所  
平成30年度外部評価報告書  
NIFS Peer Review Reports in FY2018

2019年3月

March, 2019



核融合科学研究所 運営会議外部評価委員会

NIFS Advisory Committee External Peer Review Committee

# 目 次

第1章	これまでの経緯	1
第2章	項目別の評価	4
第3章	評価のまとめと提言	31
	[1] 評価のまとめ	31
	[2] 提言	37
第4章	おわりに	39

## 資料編

- 1 平成30年度 大型ヘリカル装置計画プロジェクト報告書

## 参考資料

- 1 平成30年度 外部評価「大型ヘリカル装置計画プロジェクト」の評価結果一覧
- 2 平成30年度 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会及び専門部会構成名簿
- 3 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則
- 4 平成30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章 これまでの経緯

核融合科学研究所（以下、「核融合研」とする。）は、大学共同利用機関として大学における核融合研究を推進するため、大型ヘリカル装置（Large Helical Device、以下、「LHD」とする。）を主装置として、1989（平成元）年に設立された。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ともに、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指して実験研究を進めている。一方、これと並行して、本質的に複雑性を持つ核融合プラズマの解析には、大規模シミュレーションを用いた理論的研究が必須である。そのため、核融合研では専用のスーパーコンピュータを導入し、これを全国の核融合理論研究者に対して共同利用を通じて提供することで、先導的な研究を進めてきた。そして、2010（平成22）年度からは、プラズマ・核融合研究分野でのCOE（Center of Excellence、以下、「COE」とする。）としての求心力を一層強化するため、LHD、理論シミュレーション、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て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。核融合研の研究組織を改編し、全研究教育職員を一つの研究部にまとめた上で、研究プロジェクトへ自由に参画する体制とすることで、LHD・理論シミュレーション・核融合工学の三つのプロジェクト間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できるようになっている。

この間において、国内学術研究体制の変化があり、核融合研は、2004（平成16）年度から大学共同利用機関法人自然科学研究機構（以下、「機構」とする。）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。法人化にあたっては、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度評価を受けるという制度が導入された。この毎年度の評価は主として管理運営面のものであるが、核融合研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、核融合研の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度実施している。評価項目は運営会議で決定し、評価は運営会議所外委員及び評価項目に対応した専門家で構成された外部評価委員会で行っている。外部評価委員会は評価結果を運営会議に報告し、核融合研は、その結果をWeb ページ等で公開するとともに、次年度以降の研究活動の改善に役立てている。

外部評価委員会の評価項目は運営会議で審議・決定され、年度毎に異なる。直近では、2015（平成27）年度に数値実験炉研究プロジェクト、2016（平成28）年度に共同研究、2017（平成29）年度に核融合工学研究プロジェクトの外部評価を実施した。そして、本年度においては「LHD 計画プロジェクト」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10名と外国人委員3名、さらに所外の専門部会国内委員2名と専門部会外国人委員1名を加えて外部評価委員会を構成し、

評価を行った。

まず、2018（平成30）年9月18日に第1回外部評価委員会及び専門部会を開催し、本年度の外部評価の進め方について審議の上、評価の観点を決定した。続いて、2018（平成30）年12月1日に第2回外部評価委員会及び専門部会を開催し、核融合研から、評価の観点を踏まえたビューグラフや活動報告書等の資料（資料編参照）を用いた詳しい説明を受け、質疑応答を行った。その後、2019（平成31）年1月25日に第3回外部評価委員会及び専門部会を開催し、核融合研と更なる質疑応答を行うとともに、評価の観点に沿った評価作業とその取りまとめ等を行った。ここでの議論を踏まえて外部評価報告書（案）を作成し、その後はメールによる持ち回り審議により確認・検討の上、報告書として取りまとめた。本年度の外部評価委員会及び専門部会の日程は参考資料4のとおりである。

なお、本年度に実施した「LHD計画プロジェクト」に関する外部評価では、その評価の観点を以下のように定めて実施した。評価の観点の各項目は、機構の定める中期計画において、核融合研が推進する「LHD計画プロジェクト」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している。

また、2011（平成23）年度に実施された「大型ヘリカル装置計画」の外部評価及び、2014（平成26）年度に実施された「重水素実験計画」の外部評価において、それぞれの報告書に「提言」として示された、次の点も今回の評価の参考とした。

#### 【平成23年度外部評価における提言】

- (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。

#### 【平成26年度外部評価における提言】

- (1) 重水素実験に伴う閉じ込め改善及び加熱機器や計測機器の整備を踏まえ、具体的な実験計画策定に向けた議論を更に深めるとともにモデリングを充実させることにより、トロイダルプラズマの包括的理解に貢献することを期待する。重水素実験に向けた共同研究により形成された中性子計測、トリチウム回収、プラズマ壁相互作用等の全国的な研究ネットワークを今後も継続・維持することを期待する。
- (2) 重水素実験を当初の予定通りに開始すべく、新たに設置された重水素実験推進本部の下で、重水素実験に向けた整備実施計画の策定並びに設備の整備、施設の改修、

安全管理体制の確立等を遅延なく完了させることを期待する。

- (3) 核融合科学研究所は大学における核融合科学の研究を取りまとめる立場であり、重水素実験を安全に成功裏に完結することはきわめて大切である。特に、法令の遵守、地元の意見の尊重、学術の発展のバランス良い感覚を維持しながら、柔軟に対応していくべきと思われる。また実際の安全管理に関しては、主任者の選任期間を重複させ適切に交代するなど、丁寧かつ堅実に進めることが望まれる。
- (4) 核融合科学研究所が長年にわたって行ってきた地元市民への説明、自治体との連携活動への努力は高く評価でき、今後も安全管理に対する実績と不断の実践を通じて、核融合に対する理解と支援を得るべく務めることが望まれる。

### 【平成30年度外部評価における評価の観点】

#### [実施体制・実施状況]

- (1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。  
(第三期中期計画より)
- (2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされ  
るとともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。(第三期中期計画より)

#### [初期実験の成果と今後の研究展開]

- (3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られている  
か。(第三期中期計画より)
- (4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。  
(第三期中期計画より)
- (5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器  
の整備等が進められているか。
- (6) LHD プロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討  
しているか。

#### [共同研究]

- (7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置  
研究における国内外のCOEとしての役割を果たしているか。
- (8) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄  
与しているか。(第三期中期計画より)

#### [人材育成、社会の理解へ向けた取り組み]

- (9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。
- (10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く  
社会の理解を得る取り組みを行っているか。

## 第2章 項目別の評価

本章では LHD 計画プロジェクトの活動実績について、第1章に示した評価の観点に従って、各委員から示された評価を項目別に集約して記述する。括弧内の数字は意見がほぼ同じであった委員の人数である。外国人委員からの意見については、原文のまま英文で記している。

### [実施体制・実施状況]

#### [Implementation system and the state of implementation]

- (1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。  
(第三期中期計画より)

**Is the implementation system built to achieve deuterium experiments with coordinating domestic and international researchers? (From the third mid-term plan)**

- LHD 実験会議を中心に、研究テーマごとのグルーピングを行い、所内外から委員長を入れた体制を運営している。従来の実績に立脚した運営体制とともに、新たに LHD 国際プログラム委員会を構築し、他国の機関との国際的な連携研究の推進も視野に入れた実施体制を構築している点は高く評価する。特に、LHD 国際プログラム委員会の発足により、国外からの共同研究者が増加しており、LHD 研究の国際的なプレゼンスが向上していることは、高く評価することができる。(12名)
  - ・ 約10名の実験責任者、トピカルグループの所内外のリーダー8名、所外サブリーダー、技術部長、各課長等の所内スタッフで構成される LHD 実験会議が実験計画を策定し、実施する体制を構築している。装置状況、実験及び理論研究領域、情報通信、安全管理等の総合的な視点で、取り組む体制が構築されていると言える。さらに、LHD 国際プログラム委員会を立ち上げ、海外研究機関との共同研究の活性化を図るとともに、世界の最新の動向が反映できるものとなっており、高く評価できる。
  - ・ LHD 実験会議を中心に、所内、所外リーダーを有する四つのトピカルグループと LHD 国際プログラム委員会が密に連携して、国内外の研究者を取りまとめて重水素実験が実施されていることは、高く評価できる。
  - ・ 欧州、米国、中国などの研究者も加えた LHD 国際プログラム委員会を組織し、LHD の重水素実験を国際的な議論の下で推進していることは、非常に高く評価できる。今後もヘリカル系の世界的な COE として頑張りたい。特に2016年度より国際共同研究が急増(今まで20件程度だったのが60~70件に)しており、これは大

変良いことであり特筆に値する。

- ・ 国内の大学の研究者を実験リーダーとすることで、LHD の全国共同利用機関としての役割を明確化している。
- ・ 新たに設定された LHD 国際プログラム委員会により、国際共同研究が大きく増加していることは評価できる。国内共同研究も従来の枠組みの中で重水素実験に関わる共同研究を多く採択しており、重水素実験を実施する体制が構築されていると言える。
- ・ LHD 実験グループ体制を改めて整備し、重水素実験を実施する体制が構築されている。また、重水素実験開始に合わせて LHD 国際プログラム委員会を新たに立ち上げ、マシントイムやテーマ設定を議論し、国際共同研究を強化していることは高く評価される。
- ・ 十分な外部からの意見を獲得できる共同研究体制が構築されており、国内外からの意見に基づいた研究の推進が可能な体制が確立されている。
- ・ 国内の共同研究体制は従前と変わらず充実していることに加え、新たに LHD 国際プログラム委員会を組織して海外との共同研究をより有効にする取り組みを始めていることなど、大いに評価できる。
- ・ 着実に共同研究等を通じた実施体制が構築されている。重水素実験開始に伴い、国外研究者の関与するシステムが整備され、実際に国外共同研究者の人数が倍増したことは高く評価できる。
- ・ アジア、欧米との国際共同研究が組織的進められており、LHD の重水素実験が国際的な議論の下で進められており、高く評価できる。
- ・ LHD 国際プログラム委員会の設置に始まり、国際ワークショップの開催など、LHD 重水素実験を国際協力の体制の下で進めており、高く評価できる。
- マシントイムや日々の研究レポートなど英語化された Web 発信を進めており、開かれた研究体制の構築が行われている。(3名)
  - ・ ポータルサイトの運営による情報発信・広報活動等、その体制構築について非常に高く評価できる。
  - ・ 実験状況も Web ページに公開され、適切にワークショップなども実施されて、精力的に国内外からの情報を収集し、研究計画へのフィードバックが可能となるよう組織的に運営されている。
- 国際熱核融合実験炉 (ITER) や核融合原型炉に向けた新たな知見を拡充するために、量子科学技術研究開発機構 (QST) の研究者を積極的に活用することが望ましい。(1名)
- 国際原子力機関 (IAEA) 会議等における国際共同研究成果の発信においても、協力体制を有効に機能させていくことを期待する。(1名)
- 国内においても連携体制の下で重水素実験が進められているが、他分野からも見えるようにすることが、今後望まれる。(1名)

- LHD 実験会議と LHD 国際プログラム委員会との関係がやや不透明。(1名)
- 共同研究を通じて得られた知見や成果について取りまとめていく場を設定する必要があるのではないか、と感じる。共同研究で得られた成果は個々には優れていても、それをきちんと全体の成果の中に組み入れていく作業が必要であり、それをどこが行うのか明確ではない。世界でも有数の実験装置で得られた新たな知見について、きちんと取りまとめながら今後の研究を進めていくことが重要と考える。また、LHD 国際プログラム委員会の実験提案と国内共同研究の提案の整合を取る場が設定されていないように思う。(1名)
- LHD management has well organized and prepared plan for the D-D experiment considering optimum use of the domestic and international leverages in knowledge, experience and resources. The plan also has been well executed and clearly demonstrated in a series of initial successful experiment. As an example, initial result of the isotope scaling study which incorporated with domestic and international expertise has revealed already an interesting scientific results.
- The NIFS has successfully operated in Deuterium plasma now for two years. The first year they achieved record-breaking ion temperatures and the second they expanded the operating regime in order to provide a data set of sufficient breadth to allow the analysis of the isotope effect. Precise profile measurements have enabled detailed analyses of the confinement properties of the plasma as well as the energetic particle population. The Deuterium experiments have also allowed an analysis of the Tritium exhaust and retention problem that is an important topic for future fusion reactors as well as for the social acceptance of present-day fusion research. Last but not least, the strong theory and simulation team at NIFS, organized under the NSRP, has been able to analyze promptly the new data, producing gyrokinetic simulations of deuterium transport in LHD and high energy particle tracing using extended VMEC equilibria. Analysis is ongoing.
- LHD experiments have been nicely carried out with the guidance of board which consists of domestic task force leaders, and international advice committee.
- The central body for the coordination and planning of LHD experiments as well as domestic collaboration activities is the “LHD experiment board” with four topical groups in charge. The international program committee (LHD-IPC) supervises the international collaboration activities. International workshops have been organized and a (English language) web portal has been set up. This all complies with international standards and should well serve the goal.

以上、評価項目「国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されて

いるか」に対して、極めて高く評価するが10名、高く評価するが5名、評価するが1名であった。

(2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされるときともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。(第三期中期計画より)

**Is preparations of safety management equipment and of facilities and their countermeasures done appropriately for starting the deuterium experiments? Was the safety management system built as planned? (From the third mid-term plan)**

- 重水素実験を開始するための準備段階に重水素実験推進本部を立ち上げ、組織的に装置改造や放射線管理及び監視システムの構築を進めるなど、安全に実験研究を進める体制構築を進め、予定通り重水素実験を開始、運用できた点は高く評価する。(11名)
  - ・ 管理区域への入退室管理及び出入り口のTV監視、汚染検査、放射線総合監視システム、敷地境界線量測定、トリチウム除去システムなどの整備及び運用が適切になされており、安全管理体制が確立されている。
  - ・ 安全衛生推進部を中心とした労働安全衛生管理体制並びに放射線安全管理体制が整備されて、複数の放射線取扱主任者と連携して、計画通りに運用されていることは高く評価できる。
  - ・ 安全管理機器・設備の整備や対応策が当初の計画通り適切に進められ、重水素実験が安全かつ適切にスタートしたことは非常に高く評価できる。
  - ・ 安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切に行われ、重水素実験が安全かつ適切に実施されていることは高く評価できる。
  - ・ 重水素実験の開始にあたり、中性子・トリチウム等の計測システムが充実しており、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされている。
  - ・ 安全管理機器・設備等の整備は、当初の計画通り進められており、重水素実験推進支援グループの結成等、適切かつ精力的に行われ、これらによってスムーズに重水素実験が安全に開始できたことは非常に高く評価できる。
  - ・ 安全管理機器・設備の整備は適切に行われている。
  - ・ ハードウェア面では十分な対応がなされている。さらに、詳細な作業手順テーブル・チェックリストなども作成され、十分な対策が講じられている。
  - ・ 365日24時間体制で安全管理にあたっているのは大いに評価できる。
  - ・ 大きな事故やトラブルなく重水素実験を2期にわたり実施したことは、高い評価に値する。
  - ・ 安全管理については十分な検討の上で適切になされており、今後もこの安全管理体制を続けていくことが必要である。

- ・ 重水素実験に向けて多岐にわたる数多くのマニュアルが整備されていることも高く評価できる。
- 中性子発生量管理のための中性子フラックスモニター、中性子放射化箔システム、垂直中性子カメラが導入され、これらの計測機器が適切に運用されている。また、発生したトリチウムの管理も厳格に行われていることは高く評価することができる。(8名)
  - ・ トリチウムモニターや環境放射線の監視体制、緊急時への対応なども十分検討され、実施されている。
  - ・ 技術的にはトリチウム除去装置のトリチウム除去率99.8%が達成できたことは特筆に値する。
  - ・ トリチウム除去装置のトリチウム除去率が当初設計値の95%を超え、99.8%を達成したことは特筆に値する。
  - ・ トリチウム除去装置において、計画よりもはるかに高いトリチウム回収効率(99.8%)を得ていることは特筆に値する。
  - ・ 管理区域への入退管理の徹底、LHDの運転を制限する総中性子発生量のモニターの整備、トリチウム除去装置の整備など、安全対策は十分に行われている。
  - ・ 重水素実験実施にあたり懸念事項であった、各種計測機器、制御機器に及ぼす中性子の影響については事前の対策もあり、概ね想定内に収まっている。
- 地元自治体と締結した協定書・覚書に基づき、核融合科学研究所安全監視委員会が設置され、適切に運用されていることは高く評価できる。(5名)
  - ・ 放射線モニター結果などを地元適切に公開している点は高く評価できる。
  - ・ 重水素実験開始にあたり、地元自治体との協定に基づき、十分な安全管理体制が確立され、安全管理区域の設定や入退室管理、監視設備なども整備され、また地元自治体との協力で環境放射線を継続的にモニターしていることも高く評価される。
  - ・ 住民に対しても精力的に説明会を行っているようで、この点についても評価できる。
  - ・ 外部の安全監視委員会なども活用し、外部の視点も踏まえた安全管理体制を進めていくことを期待する。
- 安全対策に関して、核融合研の職員に対する過度な負担が懸念される。合理的な管理方法を考案することも必要である。(6名)
  - ・ 安全対策に関して、外部委託を含め、研究者の負担を軽減することも重要と考えられる。
  - ・ 人的資源についての説明が必ずしも十分でないためか、一部の研究者に対してかなりの負荷になっているのではないかと感じる。機構の人的資源の割り当ての問題と言えるかもしれないが、膨大な安全対策のための作業量に対して、十分な人的資源が投入されているのかという部分に不安を感じる。
  - ・ 安全管理においても、技術の進展や知見の高度化に伴い、必要な事項の見直しは常

に図られるべきである。

- 真空容器内作業が増える可能性もあり、作業員の被ばく線量についても適切な管理が必要であると思われる。
- 管理を怠り汚染が広がるようなことがあってはならないが、過度な規制による不必要な研究の制約や遅延が生じないよう務めていただきたい。
- トリチウム発生量の把握、回収量の計量とともに、その収支を正しく評価することは重要である。一方、LHDの真空容器内に生成されたトリチウムの一部が残留しているとされており、今後より詳細な評価が待たれる。(1名)
- 全排気系統からのガス中のトリチウム濃度がモニターできる体制は、安全性の担保に加え、トリチウムバランスを評価する上でも有意義であり、今後の研究面での発展も期待できる。実験で生成されたトリチウムの一部が真空容器の中に残存していることが分かっており、今後、その確認のためステンレス保護板や炭素タイルのトリチウム濃度分布測定が実施されるものと推察する。高エネルギー粒子の閉じ込めの観点からも重要な測定である。予想される中性子発生量に対して適切な管理を行い、速やかに評価が進むことを期待する。(1名)
- Safety management is extremely important in nuclear facility. The preparation in monitoring equipments and implemented countermeasures has been executed well. As a result, the initial D-D experiment was carried out without much issues in safety.
- The safety management system was built as planned and has operated well. The division of Deuterium experiments management is responsible for enforcing safety rules and promoting a culture of safety and openness. A radiation monitoring system is operating well and information is available on the web. The system shows that external radiation levels do not change during LHD operation.
- Safety system built for D experiments is excellent which meet all safety requirements
- LHD is well prepared for deuterium operation and the necessary upgrades were made. The actual deuterium operation is managed by a high-level body (“deuterium experiment management division”) supported by a working-level task force (ATFDE). Tritium monitoring via calibrated neutron diagnostics and exhaust tritium recovery are in operation and seem to work reliably. A comprehensive access control system was established. As a result, the required legal certificate was issued in early 2017. Also, the required regular fire drills and documentation levels seem to be well established.

以上、評価項目「重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされるとともに、安全管理体制が計画通り確立されているか」に対して、極めて

高く評価するが12名、高く評価するが3名、評価するが1名であった。

[初期実験の成果と今後の研究展開]

[Results of initial experiments and future research development]

(3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られているか。(第三期中期計画より)

**Does the LHD project obtain high-performance plasma by the deuterium experiments and produce excellent research achievements with high academic value? (From the third mid-term plan)**

- 初期の重水素実験において、当初目標のイオン温度 10 keV が達成されたことは評価できる (11名)。
  - ・ プラズマの高性能化に伴うイオン温度 10 keV の達成、同位体効果やトリトン燃焼に関する知見の蓄積など、学術的価値が高い成果が得られている。
  - ・ 重水素実験開始初年度から、ヘリカル系において初めて同位体効果による閉じ込め改善を明確に同定したことは高く評価される。
  - ・ 同位体効果の学術的理解についても確実に知見が得られており、実験結果に対する計算機科学・理論の適用により、理解が進んでいる。
  - ・ 高エネルギー粒子挙動も含め、まだ未解明な点や実施すべき点も多く残されているため、今後も継続的に研究を進め、高い成果が得られることを期待する。
  - ・ 大きく領域が広がったとは言えず、今後の継続した研究が必要である。
  - ・ 今後ヘリカル炉プラズマパラメーター領域に向けた研究の進展に大いに期待する。
  - ・ The experimental goal is to achieve performance of the plasma at ~8.5 keV of ion and electron temperature at high density and LHD will have to problem in achieving this goal within the scheduled time scale, since gyrotron system for ECH will be delivered in time. Based on this progress, a long pulse operation of high performance plasma will be achieved as planned.
- エネルギーや粒子の閉じ込めに関して同位体効果を示す結果が出ていることは、重水素実験の当初目的の一つに関する重要な成果である (9名)。
  - ・ 同位体効果に関するスケーリング則が得られつつあるとともに、乱流理論解析との比較によりゾーナル流による乱流抑制が関連していることを提示しており、学術的価値は高い。
  - ・ 系統的な研究を継続して、磁場閉じ込めプラズマの総合的な理解を深めて欲しい。電子の閉じ込めが重水素の同位体効果で良くなっているという結論は、もう少しデ

ータを積み重ねて議論をした方が適切だと思う。

- 学術的な理解に関しては、十分解明されたとは言い難いので、今後の更なる研究の深化を期待する。
- 重水素プラズマにおける乱流輸送低減が、ジャイロ運動論的シミュレーションを用いた理論研究により重水素実験開始に先立って予測されていたことは、学術的にも極めて高い成果であり、国際的にも高く評価される。今後、更に実験結果を積み上げるとともに、シミュレーションの検証と理論モデルの改善を目的とした実験計画立案も望まれる。
- 単なる水素データからの延長でなく、「重水素実験で無ければ明らかにできない」結果も得られつつあり、学術としての「核融合学」に大きく寄与している。特に、数値シミュレーション実験との対応によりプラズマ物理・核融合科学に対する理解が深められつつあり、国内大学の研究者にとっても挑戦すべき多くの研究テーマが創成され、学術の進展に寄与するものと期待される。
- New findings of this study may add a new piece of physics in isotope scaling. However, it would be difficult to make a conclusive results, since there are many experimental results performed in various devices and the outcome is wide spread. LHD may have to focus on concrete evidence to sort out the wide range of differences.
- 重水素実験において、低い電子サイクロトロン加熱パワーで、10keV の電子温度が得られたことは高く評価することができる（1名）。
- トリトン燃焼実験により、LHDにおける高エネルギー粒子の閉じ込めが評価され、同規模のトカマク装置と同等の閉じ込め特性を示したことは評価できる（2名）。
- 成果の意義が一般の国民にも十分伝わるよう、丁寧な広報活動を実施することが望まれる。また、IAEA Fusion Energy Conferenceでは順調に成果が発表されている（1名）。
- 大型予算を使う研究を推進するためには他分野の研究者からも認められることが必要不可欠である。核融合関連の学会及び学術誌のみならず、分野を超えて評価の高い学術誌に成果を公表し、その価値を問うことが必要である（1名）。
- The LHD project definitely produces high-performance plasmas, both from the point of view of plasma temperature and pulse duration. Scientifically, it is at the beginning of its operation phase with Deuterium and, while it has a strong program of research, it is still early for this program to have yielded its results. Nevertheless the work on isotope scaling of the confinement time, effect of Deuterium on turbulent transport, and its effect on fast particle dynamics is very good. It should be noted that the exploitation of the LHD machine has been significantly impeded both by repeated budget cuts and by the apparent lack of long-term governmental support for helical fusion research beyond the present mission of LHD.

- First D experimental results showed very promising data. Future plan is going on. Better results will be produced.
- Certainly a milestone is the ion temperature of 10 keV, achieved for the first time on LHD, albeit at relatively modest densities  $\leq 1.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ . The physics reasons for performance improvement is multi-causal and a number of interesting and relevant investigations have been performed during the recent campaign. The picture on confinement improvement by using deuterium instead of hydrogen (“isotope effect”) is not yet clear but gyrokinetic simulations suggest zonal flow enhancement as a cause. This is still to be confirmed in the experiment.

以上、評価項目「重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られているか」に対して、極めて高く評価するが9名、高く評価するが5名、評価するが2名であった。

(4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。  
(第三期中期計画より)

**Does the LHD project obtain prospects for development of academic research toward a comprehensive understanding of toroidal plasmas? (From the third mid-term plan)**

- LHD での実験と理論・シミュレーションとの相補的な研究により、環状プラズマの総合的理解に向けた学術展開の見通しが得られると期待される (13名)。
  - ・ これまでの水素実験における高い成果だけでなく、LHD での重水素実験結果を提供しつつあり、閉じ込め則や輸送における同位体効果や高エネルギー粒子のふるまいなど、環状プラズマの理解に寄与する研究が進められつつあり、今後の展開が大いに期待できる。今後はトカマク装置との相違点などからその原因を探りつつ、より明確なビジョンを持った学術研究を進めて欲しい。
  - ・ トカマクのディスラプションや高エネルギー粒子駆動抵抗性モードと類似した低周波 MHD モードが観測されており、その物理機構の理解、安定化に関する研究が進んでいる。今後の展開が期待される。
  - ・ 同位体効果を決定付けるような実験結果は得られているとは言えず、更にデータを蓄積することにより、同位体効果の全貌を明らかにすることが望まれる。
  - ・ 計算機シミュレーションで得た知見を活かした実験計画が練られているとは言えず、同位体効果の学術的理解について更なる飛躍を期待したい。
  - ・ 加熱・計測機器の更なる充実とともに、今後、高温領域の拡大、同位体効果の定

量的検証、不純物輸送機構の同定、高エネルギー粒子と MHD 揺動の相互作用、プラズマ・壁相互作用などにおいて、学術研究の展開が期待される。

- 今後も計測機器の高度化を図るとともに、理論・シミュレーションとの比較・検証がより一層強く求められる。
- One recommendation would be to add more comprehensive physics programs to improve the performance of Stellarator so that the results can be used for the future Stellarator based fusion reactor. Successful results will contribute to the understanding of toroidal plasmas and will also help to formulate the next proposal as well.
- ヘリカル装置におけるトリチウムのインベントリに関するデータが取得・検証できるようになったことは、高く評価できる（4名）。
  - 工学的には真空容器や排気系などのプラント全体としてのトリチウム残存について、更なる研究の深化が求められよう。
  - これらのデータがトカマク装置と比較して、どのように長所や問題点を検証しているか、今後の進展に期待する。
  - LHD 内のインベントリの評価を含め、トリチウムの装置内の挙動に関する研究は緒に就いたところである。
  - 中性子生成による放射化やトリチウム発生などの対応が必要となるため、実験の自由度に一部制約が生じる場合もあろうが、一部の研究テーマについては時間をかけて計画を練る必要が生じており、一通り初期データが得られたこの時点で、コミュニティ内でチェックアンドレビューを行う良い機会かも知れない。中性子発生量の制限される状況下でも可能な研究を効率的に深め、展開する範囲を議論する必要がある
- The LHD project has impressive breadth, addressing most of the issues in toroidal plasma physics that can be studied without realizing a burning plasma. Many of the issues that fall out of the scope of the LHD facility are addressed in collaboration with universities.

The principal thrust of LHD research is the isotope effect in the scaling of plasma confinement. This is an important topic with fundamental resonance, but it should not be allowed to overshadow the many other fundamental phenomena being elucidated at NIFS, such as the interactions between energetic particles (EP) and MHD modes (of critical importance to any fusion concept as well as to many issues in space and astrophysics). The installation of the neutron diagnostic as well as the increased ion temperature provides new capabilities for EP studies. The change from H to D also offers significant opportunities for progress in the understanding of the divertor/Scrape-off layer (SOL) region due to the increased carbon impurity

produced through sputtering by deuterium.

Perhaps the most exciting new research thrust, however, is the investigation into the connection between neoclassical and turbulent transport. Although the possibility of this connection has been contemplated before, I am not aware of any organized effort to clarify this connection despite growing evidence of its importance not only for heliotrons, but in all long-pulse fusion schemes. In particular, the neoclassical-turbulent transport connection is likely to be key in such processes as ELM-stabilization by RMP in tokamaks, internal transport barrier formation, etc. The tools and expertise developed through the NSRP project will be key to the success of this investigation, and in this respect NIFS is exceptionally well positioned to complete it successfully.

- The first results showed isotopic effect and higher  $T_i$  were achieved which is within the prediction.
- Clearly yes. In addition to what is written under point (3), the first investigations on fast particle confinement (via tritium burnup) and the drive of instabilities by fast particles are very interesting and academically valuable. With that LHD contributes significantly to the general understanding of toroidal plasma confinement.

以上、評価項目「環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか」に対して、極めて高く評価するが5名、高く評価するが11名であった。

(5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められているか。

**Is preparation of necessary devices and facilities for the main device, heating systems, diagnostics, and others advanced appropriately according to the research plan of the deuterium experiments?**

- 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められている（12名）。
  - ・ 重水素実験に向けた機器整備に対して、真空内機器、ガスバフ・固体水素ペレット入射装置、排気装置、冷却水供給システム、プラズマ加熱装置、計測機器が適切に整備されており、高く評価することができる。
  - ・ 理論グループとの協力により、プラズマ解析コードが実験解析に活発に応用されている点も高く評価される。

- ・ 閉ヘリカルダイバータの設置やNBI、ECH等の加熱機器整備を計画的に進めている。特にNBIは重水素化に伴う利点や欠点があるため、全加熱入力として不足する場合などの対応も今後必要であろう。また、重水素実験に伴って新しく導入した計測機器もあり、特に中性子モニターは重水素実験に不可欠な計測であり、較正も含め準備が進められている点は評価する。中性子発生環境下では様々な制御部が誤動作する可能性があり、フェイルセーフでの運用を今後も実施して欲しい。
  - ・ 新しいジャイロトロンの導入が進められているが、低磁場実験でのプラズマ生成が可能かどうかの定量的解析がなされているか。重水素実験での高ベータ研究に期待する。
  - ・ H/D比の詳細な計測や周辺/ダイバータ部における計測の強化は、今後の同位体効果の解明に向けての重要なサポートとなるので、今後のデータ解析の進展に大いに期待する。
  - ・ 今後、ICRF加熱装置の整備により、より有効なイオン加熱が働き、プラズマ性能向上に資することを期待する。
  - ・ 生成されたトリチウムの一部が真空容器中に残留しており、今後は保護壁や炭素タイル上のトリチウム分布の測定と、トリチウム捕捉メカニズムの調査が必要となるであろう。そのためには、試料片採取のための切断作業、表面組成・構造の分析、トリチウム測定などが必要となるが、例えば、X線光電子分光装置や加速器が設置されている部屋が試料の持ち込みに対応していない、 $\beta$ 線誘起X線を測定する装置がないなど、いくつか未整備な点がある。タイル試料の放射線リスクを適切に管理しつつ、効率的に分析を進める体制を整備する必要がある。
- 所員の努力から言えば当然5（「極めて高く評価する」の評価）であるが、適切な予算措置がなされていない。ECHや正イオンNBIは改善があったが、負イオンNBIは水素用に最適化されたものを運転だけで重水素に適用させており、当然、大きな性能劣化を伴った運転となっている。負イオンNBIはLHD実験の一つの特徴となってきたので、目立った増強・整備がなされなかったことは残念に感じる。中性子計測など、他のシステムが充実したこともあり、余計に目立つ結果となった。（1名）
- The necessary devices and facilities are available according to research plans. In particular, all heating systems have been upgraded for Deuterium operation, specifically the electron and ion cyclotron heating systems (ECH and ICH) as well as the Neutral Beam Injection (NBI) system (Note that the ICH antennae were tentatively removed but will be reinstalled for the next, 2019 campaign). Other new systems necessary for Deuterium operation have been installed including a neutron diagnostic system, an integrated radiation monitoring system, an exhaust detritiation system and an access-controlled legal radiation control area. The neutron diagnostic system will support the energetic particle studies on LHD: this

is a topical area of continuing strength at NIFS. Two types of exhaust detritiation systems were installed: a molecular sieve for exhausted gas in the vacuum pumping and a Polyimide membrane for purged gas during maintenance operations. During initial operations, the Tritium recovery rate was a remarkable 99.8%.

- Diagnostics are excellent. Heating power could be increased further in future
- A number of new diagnostics was installed, which further extends the experimental capabilities of LHD. The divertor is now closed and partially equipped with high performance cryo pumps. This has proven to have a positive effect on divertor operation, notably the neutral pressure in the divertor room. In deuterium, the negative ion neutral beam injectors (NBI) have lost performance by 50% due to the increased heat loads on the grids, whereas the positive ion NBI has increased by 30%. All together, the NBI power of LHD remains about the same. The electron cyclotron resonance heating was slightly extended and the ion cyclotron resonance heating is planned to be re-installed in the near future. In summary, the diagnostics and heating systems are fully appropriate for the scientific goals of LHD with more to come.

以上、評価項目「重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められているか」に対して、極めて高く評価するが9名、高く評価するが4名、評価するが3名であった。

(6) LHDプロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか。

**Will the LHD project consider further research development towards the realization of a fusion reactor based on the achievements of the LHD project?**

- LHDでの高い成果の下で、ヘリカル型核融合炉に向けた輸送解析や定常実験が実施されており、デモ炉設計としてFFHR-d1などの検討が進められている。核融合炉実現に向け、LHDの今後の研究展開を検討している点は評価できる（7名）。
  - ・ 重水素実験で得られた高性能プラズマを活用して、プラズマの閉じ込め特性、プラズマの不安定性や高エネルギー粒子の振る舞いなどに関する学術的な研究を推進し、将来のヘリカル型核融合炉の設計・製作に必要な物理データベースの構築を進めること、また、高熱負荷環境下でのダイバータ等のプラズマ対向材料研究や同材料中における水素同位体の振る舞いに関する研究を重点的に進め、将来の核融合炉におけ

る水素同位体収支に対する理解を加速し、核融合炉実現に必要な工学的なデータベースの蓄積を図るという取り組みは評価できる。

- 重水素実験の開始に伴い、新たな実験の自由度が得られ、核融合プラズマパラメータを視野に入れた研究実験と、それに対応する数値計算研究が行われており、特に、長時間放電に伴う粒子リサイクリングや PWI 研究などの研究計画が提案・実験が実施され、研究の進展が見られる。
- LHDでの高い成果の下で、ヘリカル型核融合炉に向けた輸送解析や定常実験が実施されており、デモ炉設計としてFFHR-d1などの検討が進められている。今後期待される重水素研究の成果を含め、より具体性のある炉設計の推進と関連開発事項の研究推進に尽力して欲しい。
- 核融合研究全体を俯瞰して、炉型に関わらず、核融合炉実現のために LHD 実験が学術的・工学的に果たすべき役割をより明確化して、研究を進めることが望まれる。
- PWI の分野における壁排気の現象解明は、核融合炉実現にとって非常に重要な課題となっており、今後 LHD プロジェクトを推進する重要なモチベーションとなり、大いに期待できる。
- 核融合炉の実現に向けた重要な知見がいくつか得られている。今後、炉工学の成果も含めた研究計画を具体的に立案していく必要がある。
- The current D-D experimental plan on LHD is certainly the right step toward the fusion reactor development. Certainly there is a gap between the current LHD plan and a fusion reactor based on Stellarator and it is important to lay out the deficiencies and develop a plan to include the subject that can be resolved in the current LHD experimental plan. An example can be search of new operating regime for improved performance with minimum instabilities. Also new heat exhaust method via divertor will be another issue to be resolved for the fusion device based on Stellarator. The current LHD project is on the right track for this direction.
- LHDの新たな展開としては、all Tungsten wall化を精力的に進める方向性が良いのでは無いかと考えられる。特に、LHDでは数時間レベルでの定常運転が可能であるので、そのような超長時間でのタングステン壁の研究は、トカマクでも大変重要な課題であり、核融合炉開発でのアクションプランを担える重要な装置としてLHDが位置付けられる（1名）。
- 本項目のプレゼンで示されたのは、ヘリオトロン型ヘリカルでの磁気軸位置の重要性和新古典輸送と異常輸送がリンクする領域の研究が今後重要であるということ、及び、超長時間での粒子挙動の重要性和その研究におけるヘリカル装置の優位性であった。特に、超長時間の粒子挙動、壁—プラズマ相互作用の結果は、ヘリカル型核融合炉のみならず、トカマク型原型炉でも重要な課題であり、今後の研究展開が期待される（1名）。

- 新古典理論から予測される粒子閉じ込めの良さがバルクイオンの輸送と関連していることは興味深い。異常輸送との関連を、今後どう取り組むかの検討を期待する。今後の研究展開として、High Ti/High Teという目標への対応策をより具体化して欲しい。高性能定常化を目指す後継計画と整合性のよい今後の研究展開を期待する（1名）。
- これまでLHD研究で得られた知見と重水素実験の結果を比較することで、ヘリカル型核融合炉を見据えた検討が始まったと認識している。現状では核融合炉実現に向けた研究展開を加速すべきである（1名）。
- 本評価項目である「LHDプロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開」について、高エネルギー粒子閉じ込め特性、プラズマ壁相互作用における水素同位体効果、トリチウム収支の問題について、今後の研究展開が検討されている。一方、磁気軸位置と新古典及び乱流輸送の問題は、既に軽水素で長年研究されているはずの課題であり、「核融合炉実現に向けた今後の研究展開」としては必ずしも十分とは言えない。むしろ、重水素実験の機会を活かした輸送研究（例えば、燃料混合比と粒子輸送の関連など）について、より重点的に検討すべきではないだろうか（1名）。
- 高エネルギー粒子の挙動解明、PWI研究など個々の課題では進展がみられるが、「核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか」の観点からはやや物足りない感がある。当日の説明では、大型の核融合実験装置や核融合炉の設計に用いられる計算コードの実験的検証を通じた貢献を主張されていたが、直接的な成果をアピールし、今後の研究展開に活かしてはいかがであろうか（1名）。
- The LHD project is primarily focused on the operation and scientific utilization of the machine itself, and on the interpretation of the observations made on it. Development towards the realization of a helical fusion reactor is concentrated in the FERP. The program of the FERP is extensive but its innovation efforts are directed towards technology: superconducting magnets, blanket and structural materials. Even in the area of divertors, where plasma physics is important, the focus seems to be on the condensed-matter side of the problem, such as the W/Cu alloys or liquid metal showers used to absorb the thermal and particle fluxes. Given the handicap of the heliotron compared to the tokamak (mainly low power-density) one might expect NIFS and collaborators to have a more coordinated program of helical confinement concept innovation. This could be aimed at increasing beta, for example, or reducing reactor size (and thus cost). One could expect such a program of concept innovation to propose a next-generation device that would carry forward the helical fusion program in Japan during ITER operation. Examples of concept innovation studied elsewhere include the various families of quasi-symmetric concepts or the single helical axis RFP.
- There are still large gaps for helical reactor. Further simulation and large-scale R&D

are needed.

- LHD allows one to control the helical ripple via the shift of the magnetic axis. This is an important tool to disentangle neoclassical and turbulent particle and heat transport, which is a key aspect for fusion plasma confinement. Also fast particle studies and plasma-wall interaction physics are of great importance. In the latter, the migration from a carbon to a tungsten divertor is clearly an important way to go for LHD.

以上、評価項目「LHDプロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか」に対して、極めて高く評価するが1名、高く評価するが8名、評価するが7名であった。

#### [共同研究]

#### [Promotion of collaboration]

- (7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置研究における国内外のCOEとしての役割を果たしているか。

**Does the LHD project play the role of a global COE in the research with helical devices by constructing and using the research network among domestic and international universities and research institutes?**

- 国内では、一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究等を通して共同研究のネットワークが構築されており、国内のCOEとしての役割を果たしていると高く評価される。また、日米、日韓、日中などの2国間共同研究を積極的に進め、国際エネルギー機関（IEA）ステラレータ協定等の下で国際共同研究が進められており、国際的にもCOEの役割を果たしていると評価できる。（11名）
  - ・ 国内共同利用体制は整っており、数多くの共同研究が進められ、その拠点研究所としての機能を十分果たしている点は評価する。国際共同研究もLHD実験会議にLHD国際プログラム委員会を加えたり、EuroFusionへの公開などを経て大きく増えている点は評価できる。
  - ・ 一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究といった多様な共同研究体制が構築され、極めて広範囲の共同研究が行われていることは非常に高く評価される。
  - ・ 一般・LHD計画・双方向型共同研究を有機的に活用して、国内の核融合コミュニティの活性化を支援するとともに、トリチウム取扱い技術などでLHDの重水素実験に対しても有機的に活用している点は高く評価できる。

- ・ ヘリカル型装置研究における国内のCOEとしての役割を果たしている点は評価できる。また、海外との連携も進められており、今後、国際的な主導権を持つことでヘリカル装置に関する国際的なCOEとして期待できる。
- ・ これまでに進めてきた3種類の共同研究（一般、LHD計画、双方向型）を通して、国内の大学、研究機関におけるアクティビティの維持と進展に貢献してきたことは高く評価できる。特に、双方向型共同研究、LHD計画共同研究では、その利点を最大限に利用しており、国内COEとしての役割を十分に果たしている。海外とのネットワークとしては、中国、韓国、米国との2国間国際協力を進めていることは高く評価できる。また、追加資料で示されているLHD国際プログラム委員会が設立されてからの大幅な国際共同研究の増加は特筆すべきものである。中国・韓国・米国との2国間国際協力も精力的に推進している点も高く評価できる。
- ・ これまで培われてきた共同研究の枠組みを有効に活用し、LHDにおける同位体効果の研究をCOEとして先導している。
- ・ 一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究の枠組みを活かして、有機的な共同研究ネットワークが構築されており、国内のCOEとしての役割を果たしている点は評価される。また、重水素実験開始に伴って、件数の増加とともに国際共同研究が活性化されている点は評価に値する。
- ・ 核融合研は「核融合科学の研究拠点」としての役割を十分果たしている。共同研究としても、一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究に分類して大学との共同研究の利便性を高めるのみでなく、プラズマ・核融合分野の研究者が核融合研に実際に来て議論し、学生を育てる基礎を作り上げている。当該研究分野のコミュニティ形成を行い、大学の研究者間の自由闊達な議論の場を形成して意見を良く吸い上げている。国際連携も十分に展開しており、国内大学研究者に対する国際共同研究のハブ機能も果たしている。大学研究者からの信頼も厚く、領域の学術研究高度化に大きく貢献している。
- ・ 国内については間違いなくCOEの役割を果たしている。
- ・ 着実に共同研究等を通じた実施体制が構築されている。重水素実験開始に伴い、国外研究者の関与するシステムが整備され、実際に国外共同研究者の人数が倍増したことは高く評価できる。
- ・ 国内の核融合全体のCOEとして幅広い取り組みと一層の支援を期待する。
- 研究ネットワークとそれにより創出される研究成果の見える化を進めるとともに、COEである核融合研からの大学の成果の発信は必要不可欠である。（5名）
  - ・ この項目を評価するにあたって必ずしも十分な情報を得ることができなかった。国内外の組織横断的なCOEかどうかを評価するにあたっては、LHDの共同研究の数の分析、LHDの結果から生まれた論文数の分析、LHD実験に参加した人員の分析など、目に見える形での情報を期待していたが、送付されたものは、国際共同研究の数の増加、

学生数やインターシップ学生数の年次変化、IAEA-FEC論文の年次変化、論文数の年次変化のみであった。平成29年度外部評価報告書では、大学や他研究機関の研究者が発表した国際会議講演数、国内学会講演数、論文数が報告されており、論文数では年間約40件程度が継続して投稿されており、全体の論文数から見ても相当な割合だと考えられ、全てがLHDに関連した論文ではないにしても、COEとなっていることが示されている。このことは評価されるべきである。今後、この観点での核融合研の重要性を強くアピールすることが望まれる。

- 重水素実験の成果に個々の大学がどのように貢献したかは、少なくとも今回のプレゼンからは伝わらなかった。大学における核融合研究の活性化のためにも、COEである核融合研からの大学の成果の発信は必要不可欠である。そのような発信がなければ、大学が核融合研をサポートすることに、社会や大学経営層から理解が得られない。共同研究の件数等のみで協力関係をアピールするだけではなく、マスメディアを通じた個々の大学との連携の「見える化」を意識すべきである。
- 海外に目を向けると、共同研究は行っているが、COEとして機能しているかどうかは説明だけからは確実な判断ができない。LHD国際プログラム委員会が本格的に機能することを期待する。
- 国際共同研究の例としてW7-XやUWが挙げられているが、全体の概要がやや見えづらい。加熱機器などの開発もあるようなので、全体的にどのような方向で国内外のCOEとしての役割を果たすのかを明確に示してはどうか。
- 戦略的に国際共同研究の展開を図り、核融合研の研究者が主体となって、ヘリカル系核融合研究のリーダーとして装置・炉工や計測／加熱機器開発など多方面での研究を進展させ、併せて国際共著論文数の増加を図ることが必要である。（3名）
  - W7-XとはTESPELなどの実験機器を持ち込むなどして研究協力が立ち上がっている点は高く評価できるが、今後はW7-Xや中国・韓国・米国などの世界的なヘリカル系研究グループとの包括的な国際協力体制を構築することを期待する。
  - 国際共著論文としての成果に結実することを期待している。
- 新たに構築したLHD国際プログラム委員会や国内共同研究で得られた成果をどのようにまとめて、統一された知見とするか、開かれた議論の場を設定すべきではないか。また、今後の実験の方針を決めるLHD実験会議での議論を広く発信し、多くの研究者の英知を集める場を設定すべきである。（1名）
- 研究ネットワークを活用して、若手研究者の国内外大学・研究機関への派遣を積極的に進め、今後の核融合研究を牽引する若手人材の育成を行う必要がある。（1名）
- There two large helical devices that are operational and LHD project is one them. While the other device is just starting up, long experience in Stellarator research on LHD warrants to be most productive in long pulse operation of the high beta plasmas. The leading experience in operation of the LHD will be beneficial for the other

Stellarator program as well as the next step fusion reactor based on Stellarator. As presented at the review, LHD project has fully utilized the leverage of domestic as well international network. Successful execution of the present research plan will lead the fusion science research in helical devices.

- The LHD project is unquestionably viewed as a COE in the world fusion program: its results are examined and analyzed worldwide, and they inform the priorities and strategic directions followed by the principal ITER parties. The NIFS network of collaborators has little competition, bringing together an astonishing 154 universities and research institutes nationally including four facilities with international renown (Heliotron-J, Gamma 10, QUEST and GEKKO-XII). It also has a strong international collaboration program structured according to six bilateral agreements and three multilateral agreements. A striking illustration of the vitality of the collaborations is NIFS' important role in MIT's youthful HTS research program and the SPARC project in particular.
- Very good coordination work on LHD have been done, both domestic and international.
- LHD has a very well developed network of domestic collaborations, notably with Japanese universities. The international collaboration network is growing, in particular the collaboration with the German stellarator Wendelstein 7-X and more recently also with the Chinese fusion program. This all looks very promising and the LHD management is encouraged to further develop especially the international relationships.

以上、評価項目「国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置研究における国内外のCOEとしての役割を果たしているか」に対して、極めて高く評価するが3名、高く評価するが12名、評価するが1名であった。

- (8) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄与しているか。(第三期中期計画より)

**Does the LHD project promote cooperation with and contribute to ITER/BA? Further, does the LHD project contribute to the research and development of a reactor? (From the third mid-term plan)**

- 中性子計測、イオンサイクロトロン放射計測、ディスパージョン干渉計、ICRF 発振器、NBI、低温機器、JT-60SA の超伝導マグネット、ITER 導体接続サンプルの接続抵抗測定、

JT-60SA リサーチプラン作成など、多くの共同研究、連携を行っており、貢献している。JET の真空容器内タイル・ダスト分析 (BA 共同研究) は欧州でも高く評価されている。ディスペーション干渉計に関する研究は、JT-60SA における先進的電子密度計測に関する共同研究に引き継がれ、平成 29 年度 JT-60 共同研究優秀賞を受賞し、高く評価されている。QST の原型炉設計合同特別チーム員として核融合研から 3 名が参加しており、大きく貢献している。(11 名)

- ・ ITER 計画・BA 活動への貢献事例が見受けられ、両計画の進展に貢献している。
  - ・ 核融合研の大型超伝導体試験装置を活用して、JT-60SA の超伝導マグネットに関して、プラズマ平衡磁場(EF)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の特性評価が行われ、また、ITER のトロイダル磁場(TF)コイルの導体接続サンプルの接続抵抗を測定する試験が行われたことは、高く評価できる。さらに、ITER/BA 活動の国内装置である JT60-SA のリサーチプラン策定においても、共同執筆者として多くの貢献がなされていることは、高く評価できる。
  - ・ ITER 計画や BA 活動の機器開発では、核融合研及び LHD での機器を活用しての貢献は評価できる。
  - ・ ITER 計画や BA 活動における機器開発への貢献は評価できる。
  - ・ ITER の TF ジョイントの開発や JT-60SA への参画などを通じて、ITER 計画・BA 活動との連携、貢献が行われている。DEMO 炉の設計など、原型炉研究開発にも寄与している。
  - ・ ITER 計画及び BA 活動における機器開発や試験・検査の分野で示されている貢献について、一定の評価はできる。
  - ・ ITER や ITER/BA 活動で必要とされる超伝導コイルに関する試験を、現有設備の活用により実施していることは評価できる。
  - ・ ITER 計画関連の共同研究として、中性子計測、イオンサイクロトロン放射計測、ディスペーション干渉計開発、ICRF 発振器開発、NBI 開発、冷却システム研究などの共同研究が活発に展開されている点は高く評価される。
  - ・ ITER 計画・BA 活動については、コイルや加熱技術の開発において具体的な連携及び貢献が見られる。
- ITER 計画・BA 活動に対する戦略的・積極的なアプローチも必要である。磁場核融合における原型炉開発での共通点を見据え、原型炉開発に向けた文部科学省のアクションプランに則った研究開発への一層の貢献が期待される。(9 名)
- ・ 核融合研は、来年度からは原型炉アクションプランに沿った大学等が中心となって行う炉工学関連の共同研究の窓口としての役割を担う議論を行っており、今後一層、ITER 計画・BA 活動及び原型炉開発に貢献していくことが期待される。
  - ・ 原型炉アクションプランで核融合研に実施が期待されている原型炉研究開発項目に関しては、今後、核融合研としてどのように取り組むべきか、予算を含め議論を行

い、その所掌範囲を明確にする必要がある。

- 原型炉開発に向けたアクションプランに記載されている核融合研及び大学の分担課題について、どのように開発研究を進めるか、中長期的視野に立った具体策の立案が望まれる。
- 原型炉研究開発においても、ヘリカルデモ炉設計など進められているが、将来展望についてはまだ検討途中の感がある。これらの計画や連携に対して、核融合研でなければできない貢献は何かなど、不明確なところもあり、今後はより特徴のある連携、貢献に尽力して欲しい。
- ITER 計画及び BA 活動に対して、系統だった寄与ができていたとは言い難いが、高性能な計測機器技術や3次元シミュレーションなどを通じた更なる貢献を期待したい。それ以外にもトカマクとヘリカルでは原型炉開発での共通点が多々あるので、今後は原型炉開発に向けたアクションプランに則った研究開発を系統的に進めるのが良い。
- 装置の活用に留まらず同位体効果の学術的理解が進めば、トカマクとヘリカル共通の知見として原型炉研究活動に大きく貢献できる。その意味で、同位体効果の学術的理解を今後 ITER 計画・BA 活動とどのように連携して進めていくのかについて、もう少し詳しい検討が必要だと思う。
- LHD プラズマ実験から ITER 計画への間接的な貢献を意識した取り組み（例えば、汎用的な輸送モデル構築への寄与など）も検討の余地があるのではないか。
- 貢献の程度を評価する目安（数値的指標）が見えにくいので、今後は、LHD プロジェクトでしか行えないような貢献が見える化して評価することを期待する。
- 十分な貢献を行っていると感じるが、同時に PR 不足との印象も否めない。恐らく所員が忙しすぎて、上手く報告ができていないのだろうと思われる。「ITER 関連活動」のまとまった報告があっても良いかもしれないが、所員のロードとの兼ね合いだと感じる。DEMO 炉については特に断らなくとも、核融合学の進展を通じて寄与していると考えられるので、ITER と同様、研究成果の発信時にキーワードを付すシステム作りをすれば良いように感じる。（1名）
- 大型の核融合実験装置や核融合炉の設計に用いられる計算コードの実験的検証を通じた貢献を主張されていたが、直接的な成果をアピールし、今後の研究展開に活かしてはいかがであろうか。（1名）
- Considering many common factors of physics and engineering of the fusion reactor based on Tokamak and Stellarator, the presented contribution of the LHD project to the ITER/BA programs will be mutually beneficial. As examples, the first wall material development is a common issue for both devices. The core plasma confinement, stability and heat exhaust issues are also common factors. The presented contribution and collaboration works of LHD project with ITER and BA

program will be beneficial for the research and development of the future fusion reactor.

- The LHD project conducts several collaborative activities with the ITER/BA, such as DEMO design, a study of reduced-activation ferritic steel, research on the JET ILW, an IFMIS/EVEDA collaboration and the low-temperature superconductivity tests. NIFS also contributes to the management of the BA. In addition it conducts performance examinations on the ITER-TF coil connection under contract with JA-DA and performs several additional tasks under contract with the ITER-IO including tests for the ICH system, work on the negative ion source for the NBI system, a Cryo-plant process study and the design of the dispersion-interferometer for ITER. Regarding reactor studies, the FERP has produced a reactor design, the FFHR, based on an extrapolation of LHD experimental data. Their design shows the possibility of a fusion gain of 15. The design work led to innovative solutions in the areas of liquid blankets, structural material, divertors and superconducting magnets.
- Better results have been achieved compared with 2017.
- LHD transfers successfully specific know-how to the ITER-IO and the JA-DA, e.g. in cryogenic technologies, superconductivity and heating systems. There is also considerable activity in support of the ITER BA notably JT-60 SA and DEMO studies. All together, the LHD project clearly contributes to fusion reactor development, also via its own heliotron-based reactor studies (not subject of the present review).

以上、評価項目「ITER計画・BA活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄与しているか」に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが7名、評価するが5名であった。

[人材育成、社会の理解へ向けた取り組み]

[Human Resource Development and Efforts toward Understanding by Society]

(9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。

**Does the LHD project contribute to the human resource development of researchers who are active internationally and lead the domestic and international fusion research?**

- LHD プロジェクトを通じて、国内外で活躍する人材が育成されており、高く評価するこ

とができる。総合研究大学院大学（総研大）物理科学研究科核融合科学専攻、連携大学院として、名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科、九州大学大学院総合理工学府、東京大学大学院新領域創成科学研究科で学生教育が行われている。また、特別共同利用研究員としても、多くの大学から学生を受け入れており、高く評価できる。さらに、インターンシップ学生受入れが行われ、受け入れ数も年とともに大きく増加しており、高く評価できる。（11名）

- ・ 総研大活動をはじめ、核融合研で研究を進めた経験を持って各国の研究推進役に育ってきている点などを含め、次世代の核融合研究を担う若手人材育成に寄与している姿勢は評価できる。
  - ・ 総研大などでの卒業生が帰国後に主要な役割を果たしているようになっており、国内外の若手育成としての成果を挙げている点は評価できる。インターンシップの学生が2014年度以降大幅に増えている。特に海外からの学生も増えており、大変良いことである。
  - ・ 総研大を中心に国内外の若手人材育成を行っている点は評価できる。
  - ・ 総研大等との連携により、若手研究者の人材育成に貢献している。
  - ・ 人材育成に関しては、総研大の寄与が大きく、その海外留学生の帰国後の活躍が見えてきていることは、国内における若手育成にも良い影響を与えていると考えられ、高く評価できる。インターンシップ学生受入れの推移も、年とともに大きく増加しており、特筆に値する。
  - ・ 大学院教育への貢献は継続的になされており、加えて、インターンシップという新たな取り組みを始めた点は評価される。また、核融合研を離れた後、海外の大学・研究所などに所属する研究者も育っている。
  - ・ LHD 規模の装置が一般の大学に存在する訳では無いので、若手研究者や大学院生が核融合研を訪問する良い理由になっており、自然とその場で国外からのビジターとの交流も生まれ、若い世代に対して良い刺激を与えていると考える。
  - ・ 総研大の大学院生はもとより、国内外からインターンシップ生や若手研究者、学生を受け入れたりするなど、人材育成には大いに貢献していると認められる。
  - ・ 総研大への入学やインターンシップを通して国内外から積極的に学生を受け入れ、人材育成に貢献している。
  - ・ 国際的な JT-60SA のリサーチプランの策定、ITER の ITPA 活動など、国際場で核融合研の研究者が多く活躍していることは評価される。30件を超える IAEA-FEC 会議の報告は、国際的に活躍する人材の育成に貢献していることを示している。
- どのような制度によってどのような人材をどのくらい育成するのかを明確にすることが必要である。大学からの貢献や共同研究を通じた人材育成にきちんと役割と数値目標を与えて、実現するためにはどのような取り組みを行うのかを主導する必要がある。特に、大学での核融合人材育成が困難になりつつある現在、コミュニティからの要請を

取りまとめて、大学の核融合研究の支援を行うことも重要である。(9名)

- ・ 「国内外の核融合研究を牽引し、国際的に活躍する人材の育成」にどれだけ貢献したか、より定量的な実績を基に評価がなされるとよい。特に、核融合研に所属する若手研究者については、核融合研での若手研究者の構成比率に基づき、若手研究者による受賞、論文数、IAEA 会議での口頭発表、国際会議招待講演数などの指標をまとめるとよいのではないか。
  - ・ 今後は我が国の研究活動だけでなく、世界的な核融合事業のリーダー役として活躍できる若手人材育成に対し、QST とも協力し、更に注力して欲しい。
  - ・ 教育及び人材育成は継続が重要であるので、今後も不断の努力を期待する。
  - ・ 国内他大学の学生をもっと取り込むことも重要である。
  - ・ 育成した人材が ITER や国内外の大学・研究機関等、どういう場で活躍しているか追跡してはどうか(追跡が難しいのであれば、どういう大学・研究機関、企業に職を得たかでもよいかもしれない)。
  - ・ PD 受入れについても、広い意味で人材育成ととらえられるので、このことについても積極的に推進し、COE 研究員が LHD プロジェクトにおいて実力を身に付けて、更に成長していつてもらいたい。
  - ・ 核融合研の取り組みが高校生、大学生を含め一般に周知されていないことは残念である。全体の取り組みを有機的に連携し、全国規模の核融合分野の連携教育システムとして見える化することが必要であると考えられる。さらに、国際的にも活躍する人材の育成には、海外研究者との交流が必要不可欠である。COE ポジションを活用した若手人材の長期の派遣などの仕組みの構築が必要である。
  - ・ COE として核融合研には関連大学における学部及び大学院教育の支援や連携教育プログラムの牽引が要望される。今後、具体策の検討を期待したい。
- 所員による国内外での研究活動・研究指導活動により、国際協力の形で研究が進められており、国際的な人材育成ミッションが達成されている。ただ、一定数の欧米の研究者が常に制御室にいる訳でも無いので、もう少し招聘研究者数を増やしても良いかも知れない。(1名)
  - In a long term science program such as fusion energy development, continuing human resource development is critical, since the know-hows, technology and accumulated knowledge base have to be relayed for a long period of time. In this regard, LHD project demonstrated production of excellent scientists and engineers who are active on international stage. For the domestic future fusion reactor research, it is desirable to keep excellent young generation of scientists and engineers in domestic program.
  - As a component of NIFS and by virtue of the latter's close relationship to the University community, the LHD project is an active contributor to the development

of the international scientific workforce for fusion research. In particular, it participates in graduate programs at several universities, in cooperation with high schools science education programs, and in the organization and operation of several summer and winter schools. The steady increase in applications and participation in the schools by foreign students bears vivid testimony to its success. The success of NIFS in the area of human resource development is also demonstrated by the several alumni who have ascended to positions of leadership in the international fusion program.

- NIFS and LHD play very good role for training young domestic and international Scientists.
- Especially via the SOKENDAI scheme, LHD has a strong impact on human resource development. This is not only evident by figures (both domestic and international) but also by successful career path of former long-term guest scientists from abroad. The answer is yes.

以上、評価項目「国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか」に対して、極めて高く評価するが4名、高く評価するが9名、評価するが3名であった。

- (10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか。

**Does the LHD project cooperate with local governments and engage in deepening the understanding of the deuterium experiments by local residents? Does the project also contribute to achieving a broad social understanding of fusion research?**

- 地元三市及び岐阜県への定期的な説明会、自治体が共同設置した核融合科学研究所安全監視委員会、オブザーバーの自治体も含めた外部有識者で組織する核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会などを通じた連携、土岐市プラズマ研究委員会との共同研究、自治体との衛星電話システムの整備、地域連携室の設置などに加え、対外協力部の様々な活動、施設見学受入れ、理科教育への貢献、市民説明会など、自治体との連携や地域住民の理解増進に努めていることは高く評価される。(12名)
  - ・ オープンキャンパス、Fusionフェスタ、広報誌やWeb等を通じて広報活動を行っている点は評価できる。また、地域住民に対して重水素実験の安全性や実験計画など丁寧に説明を行っている。

- ・ 重水素実験を実施するために、地元自治体と連携して、多くの市民説明会が実施され、地元住人に方々の理解が得られた成果は特筆すべきものとする。
- ・ 重水素実験の理解を得るための地元への多大な努力は高く評価できる。
- ・ 重水素実験を実施する上での必要条件として、地元の理解に対する尽力は高く評価できる。
- ・ 広報誌、Web、説明会等によって、地域住民の理解を深める取り組みや、広く社会の理解を得る取り組みを実施している。
- ・ これまでに重水素実験に向けて地元の住民への理解に努めてきたことは、非常に高く評価できる。
- ・ 地元住民に対する説明を丁寧に行っている。
- ・ オープンキャンパスなどの種々のイベントを地域住民に公開し、社会の理解を得る取り組みを行っている点は高く評価される。地元自治体との協定に基づく核融合科学研究所安全監視委員会での活動や、土岐市プラズマ委員会との協力など、情報公開にも積極的に取り組んでいる。
- ・ オープンキャンパスなど、地域を大事にする取り組みを行っていると思う。
- ・ 地元自治体との連携もしっかりとれている。
- ・ 積極的に施設を公開するとともに、市民説明会や重水素実験安全評価委員会を開催しており、適切な努力がなされていると判断する。
- 「広報委員会」が設置され、研究力強化戦略室の広報力強化タスクグループと連携を取りながら広報活動が行われていることは高く評価することができる。(4名)
  - ・ SSH校を含め高校生など若い世代の講演や見学を積極的に受け入れ、科学研究への興味関心を促進している点も評価する。
  - ・ 多くの見学者を受け入れており、啓蒙活動も実施している。
  - ・ 従前より、広く一般の方々に核融合そのもの、並びに実験に際する安全性などを伝える努力を続けており、それらの取り組みは大いに評価できる。
- 地元に限定することなく、重水素実験の重要性についてより広く一般社会から理解と支持を得られることも重要である。(5名)
  - ・ アウトリーチ活動がやや地元偏っているため、今後は、より幅広く核融合を一般社会からの理解と支持が得られるよう、活動の方向性を広げることを期待する。
  - ・ 更に幅広いアウトリーチ活動を進めていってもらいたい。
  - ・ 今後は地域に限らず、より広く核融合研究の意義と将来展望について広報を行って欲しい。
  - ・ 平成30年3月に、核融合科学技術委員会に取りまとめられた「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」では、アウトリーチ活動の重要性が指摘されている。核融合研がこれまで行ってきた広報活動をベースに、QST、大学と連携してアウトリーチヘッドクォーターを設置し、核融合研が主導して当該活動を

先導することが望まれる。

- 重水素実験についても十分な説明活動を行っていると思うが、本当の意味での理解には時間がかかるので、常に何らかの情報を流しておくことが必要となろう。所員に更なる研究以外のロードが発生することになるが、頻繁に地域住民・地方自治体職員と会う機会を設けてもらい、活動をWeb等で情宣することが肝心であろう。現在のペースを維持するのは大変かもしれないが、活動の継続を期待したい。(1名)
- As a part of the D-D experimental preparation, LHD project has had a close interaction with the local government and resident to inseminate the purpose, benefits and safety of the D-D experiment on LHD. In the course of interaction, LHD project successfully shared the knowledge of nuclear fusion, benefits of the research and most importantly, the safety of D-D experiment.
- The LHD project interacts and cooperates with local governments principally through two parallel paths. First, it reports to a government-established safety surveillance commission that represents the local populations. Second, it interacts with a Toki city plasma research committee that helps to coordinate information flow to the citizenry through lectures and measurement of radioactivity at 18 locations in the area.

The LHD project has a vigorous program of public relations consisting of NIFS tours, an annual open campus event, and participation in a fusion fest in Tokyo. It also has a mature program of public communications mediated by educational contributions (in partnership with schools and high schools), and public forums in the townships surrounding NIFS (Toki, Tajimi, Mizunami). The Institute has assembled a portfolio of publications about NIFS, Fusion, LHD, deuterium experiments and safety, that it distributes to local residents and visitors.

In summary, the project does an excellent job of cooperation with local governments.

- Very good public relation with local governments and citizen.
- The LHD project is making big efforts in public outreach and information dissemination. Also, the cooperation with the local authorities, in particular with regard to radiation protection, seems to be intense and professional.

以上、評価項目「自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか」に対して、極めて高く評価するが10名、高く評価するが6名であった。

## 第3章 評価のまとめと提言

第2章に示した意見及び外部評価委員会での論議を基に、評価の要点をまとめ、今後のLHD計画プロジェクトの推進に関する提言を記述する。

### [1] 評価のまとめ

[実施体制・実施状況]

[Implementation system and the state of implementation]

- (1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。  
(第三期中期計画より)

**Is the implementation system built to achieve deuterium experiments with coordinating domestic and international researchers?**

**(From the third mid-term plan)**

LHD 実験会議を中心に、4つのトピカルグループが設置され、国内の大学の研究者を委員長に入れた体制を運営している。従来の実績に立脚した運営体制とともに、新たに LHD 国際プログラム委員会を構築し、他国の機関との国際的な連携研究の推進も視野に入れた実施体制を構築している点は高く評価できる。特に、LHD 国際プログラム委員会の発足により、国外からの共同研究者が増加しており、LHD 研究の国際的なプレゼンスが向上していることは、高く評価することができる。マシンタイムや日々の研究レポートなど英語化された Web 発信が進められており、開かれた研究体制の構築が行われている点も評価できる。

一方、今後、国内共同研究提案と LHD 国際プログラム委員会の実験提案との整合性を議論する場の設定、並びに共同研究成果を取りまとめる場の設定が必要だと思われる。

- (2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされるときともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。(第三期中期計画より)

**Is preparations of safety management equipment and of facilities and their countermeasures done appropriately for starting the deuterium experiments? Was the safety management system built as planned?**

**(From the third mid-term plan)**

重水素実験を開始するための準備段階に重水素実験推進本部を立ち上げ、組織的に装置改造や放射線管理及び監視システムの構築を進めるなど、安全に実験研究を進める体制構築を進め、予定通り重水素実験を開始、運用できた点は高く評価する。また、放射線安全管理体制としても、中性子発生量管理のための中性子フラックスモニター、中性子放射化箔システム、垂直中性子カメラが導入され、これらの計測機器が適切に運用されている。また、発生したトリチウムの管理も厳格に行われていることは高く評価できる。特に、トリチウム除去装置における除去率が当初設計値の95%を超え、99.8%を達成したことは特筆に値する。さらに、地元自治体と締結した協定書・覚書に基づき、核融合科学研究所安全監視委員会が設置され、適切に運用されていることは高く評価することができる。

今後も、真空容器や排気系でのトリチウム残存への配慮や真空容器内での作業員の被ばくへの適切な管理に留意して、安全確保に心がけていただきたい。

一方、安全対策に関して、核融合研の職員に対する過度な負担が懸念される。継続的な安全管理を行うためにも、技術の進展や知見の高度化に伴い、必要な事項の見直しは常に行い、合理的な管理方法を考案することも必要である。

#### [初期実験の成果と今後の研究展開]

#### [Results of initial experiments and future research development]

- (3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られているか。(第三期中期計画より)

**Does the LHD project obtain high-performance plasma by the deuterium experiments and produce excellent research achievements with high academic value? (From the third mid-term plan)**

重水素実験の初期において、当初目標であるイオン温度10keVが達成されたこと、低い電子サイクロトロン加熱パワーで、10keVの電子温度が得られたことは高く評価できる。同位体効果の学術的理解についても確実に知見が得られており、実験結果に対する計算機科学・理論の適用により理解が進んでいる。重水素プラズマにおける乱流輸送低減が、ジャイロ運動論的シミュレーションを用いた理論研究により重水素実験開始に先立って予測されていたことは、学術的にも極めて高い成果であり、国際的にも高く評価される。また、トリトン燃焼実験により、LHDにおける高エネルギー粒子の閉じ込めが評価され、同規模のトカマク装置と同等の閉じ込め特性を示したことは評価できる。

一方で、同位体効果を含め、まだ未解明な点や実施すべき点も多く残されているた

め、今後も継続的に研究を進め、高い成果が得られることを期待する。また、大型予算を使う研究を推進するためには、他分野の研究者からも認められることが必要不可欠であり、分野を超えて評価の高い学術誌に成果を公表し、その価値を問うことが必要である。

- (4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。  
(第三期中期計画より)

**Does the LHD project obtain prospects for development of academic research toward a comprehensive understanding of toroidal plasmas?**

**(From the third mid-term plan)**

D/H 比計測手法の高度化などの計測系の高度化や重水素核融合反応で発生する高エネルギーイオンの振舞いなどの精緻な実験研究を通して、D と H のプラズマ特性の違いを学術的に解明しようとしている研究の方向性は妥当であり、高く評価できる。閉じ込め特性に対する同位体効果や高エネルギー粒子と MHD モードの相互作用などについて、LHD での実験と理論・シミュレーションとの相補的な研究により、環状プラズマの総合的理解に向けた学術展開の見通しが得られると期待される。トリチウムのインベントリに関しては、データが取得・検証できるようになったことが高く評価できる。

同位体効果については、その効果を結論付けるだけの実験結果は得られているとは言えず、更にデータを蓄積することにより、同位体効果の全貌を明らかにすることが望まれる。計算機シミュレーションで得た知見を活かして実験計画を練ることで、同位体効果の学術的理解について更なる飛躍を期待したい。中性子生成による放射化やトリチウム発生などの対応が必要となるため実験の自由度に一部制約が生じる場合もあろうが、中性子発生量の制限される状況下でも可能な研究を効率的に深め、展開する範囲を議論する必要がある。工学的な課題、理論・シミュレーションとの比較など総合的な見通しをもう少し明確にすることが求められる。

- (5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められているか。

**Is preparation of necessary devices and facilities for the main device, heating systems, diagnostics, and others advanced appropriately according to the research plan of the deuterium experiments?**

重水素実験に向けた機器整備に対して、真空内機器、ガスパフ・固体水素ペレット入射装置、閉ダイバータ排気、冷却水供給システム、プラズマ加熱装置、計測装置、関連する解析コードが適切に整備されており、高く評価できる。また、H/D比の詳細な計測や周辺/ダイバータ部における計測の強化は、今後の同位体効果の解明に向けて重要なサポートとなるので、今後のデータ解析の進展に大いに期待する。全排気系統からのガス中のトリチウム濃度がモニターできる体制は、安全性の担保に加え、トリチウムバランスを評価する上でも有意義であり、今後の研究面での発展も期待できる。

中性子発生環境下では様々な制御部が誤動作する可能性があり、フェイルセーフでの運用を今後も実施して欲しい。負イオンNBIに関しては、水素用に最適化されたものを運転だけで重水素に適用させており、大きな性能劣化を伴った運転となっているため、今後の増強・整備が望まれる。また、生成されたトリチウムの一部が真空容器中に残留しており、今後は、保護壁や炭素タイル上のトリチウム分布の測定と、トリチウム捕捉メカニズムが調査できる体制を整備する必要がある。

(6) LHD プロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか。

**Will the LHD project consider further research development towards the realization of a fusion reactor based on the achievements of the LHD project?**

重水素実験で得られた高性能プラズマを活用して、プラズマの閉じ込め特性、プラズマの不安定性や高エネルギー粒子の振る舞いなどに関する学術的な研究を推進し、将来のヘリカル型核融合炉の設計・製作に必要な物理データベースの構築を進めること、また、高熱負荷環境下でのダイバータ等のプラズマ対向材料研究や同材料中における水素同位体の振る舞いに関する研究を重点的に進め、将来の核融合炉における水素同位体収支に対する理解を加速し、核融合炉実現に必要な工学的なデータベースの蓄積を図るという取り組みは評価できる。

今後の重水素実験での成果を取り入れ、次のステップとして、ヘリカル系核融合炉の実現に向けた高性能放電の定常維持を目指して欲しい。また、LHD での高い成果の下で、デモ炉設計として FFHR-d1 などの検討が進められている。今後期待される重水素研究の成果を含め、より具体性のある炉設計の推進と関連開発事項の研究推進に尽力して欲しい。核融合研究全体を俯瞰して、炉型に関わらず、核融合炉実現のために LHD 実験が学術的・工学的に果たすべき役割をより明確化して、研究を進めることが望まれる。

[共同研究]

[Promotion of collaboration]

- (7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置研究における国内外の COE としての役割を果たしているか。

**Does the LHD project play the role of a global COE in the research with helical devices by constructing and using the research network among domestic and international universities and research institutes?**

国内では、一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究等を通して共同研究のネットワークが構築されており、国内の COE としての役割を果たしていると高く評価される。また、日米、日韓、日中などの 2 国間共同研究を積極的に進め、IEA ステラレータ協定等の下で国際共同研究が進められており、国際的にも COE の役割を果たしていると評価できる。今後、戦略的に国際共同研究の展開を更に図り、核融合研の研究者が主体となって、ヘリカル系核融合研究のリーダーとして多方面での研究を進展させ、併せて国際共著論文数の増加を図ることが必要である。

一方、国内外の研究ネットワークとそれにより創出される研究成果の見える化を進めるとともに、大学における核融合研究の活性化のためにも、COE である核融合研からの大学での成果の発信は必要不可欠である。

- (8) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄与しているか。(第三期中期計画より)

**Does the LHD project promote cooperation with and contribute to ITER/BA? Further, does the LHD project contribute to the research and development of a reactor? (From the third mid-term plan)**

中性子計測、イオンサイクロトロン放射計測、ディスパーション干渉計、ICRF 発振器、NBI、低温機器、JT-60SA の超伝導マグネット、ITER 導体接続サンプルの接続抵抗測定、JT-60SA リサーチプラン作成など、多くの分野で多大な貢献していると評価できる。また、QST の原型炉設計合同特別チーム員として核融合研から 3 名が参加しており、大きく貢献している。

なお、これらの成果及び貢献を統計的にまとめ、情報発信する努力がやや弱いと言えるので、改善を期待する。また、同時に、ITER 計画・BA 活動に対して、今後は戦略的・積極的なアプローチが必要である。磁場核融合における原型炉開発での共通点を見据え、原型炉開発に向けた文部科学省のアクションプランに則った研究開発へ

の一層の貢献が期待される。

[人材育成、社会の理解へ向けた取り組み]

[Human Resource Development and Efforts toward Understanding by Society]

(9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。

**Does the LHD project contribute to the human resource development of researchers who are active internationally and lead the domestic and international fusion research?**

LHD プロジェクト研究を通じて、国内外で活躍する人材が育成されており、高く評価することができる。総研大物理科学研究科核融合科学専攻、各連携大学院で学生教育が行われている。また、特別共同利用研究員としても、多くの大学から学生を受け入れており、高く評価できる。さらに、インターンシップ学生受入れが行われ、受け入れ数も年とともに大きく増加しており、高く評価できる。

一方、「国内外の核融合研究を牽引し、国際的に活躍する人材の育成」にどれだけ貢献したか、より定量的な実績を基に評価が必要である。また、大学からの貢献や共同研究を通じた人材育成にきちんと役割と数値目標を与えて、実現するためにはどのような取り組みを行うのかを主導する必要がある。

(10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか。

**Does the LHD project cooperate with local governments and engage in deepening the understanding of the deuterium experiments by local residents? Does the project also contribute to achieving a broad social understanding of fusion research?**

地元三市及び岐阜県への定期的な説明会、自治体が共同設置した核融合科学研究所安全監視委員会、オブザーバーの自治体も含めた外部有識者で組織する核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会などを通じた連携、土岐市プラズマ研究委員会との共同研究、自治体との衛星電話システムの整備、地域連携室の設置などに加え、施設見学受入れ、理科教育への貢献、市民説明会など、重水素実験を実施する上での自治体との連携や地域住民の理解増進に努めていることは高く評価される。また、「広報委員会」が設置され、研究力強化戦略室の広報力強化タスクグループと連携を

取りながら広報活動が行われていることは高く評価することができる。

一方、アウトリーチ活動がやや地元に限られているので、今後は地域に限らず、より広く核融合研究の意義と将来展望について広報を行うことが必要である。核融合研がこれまで行ってきた広報活動をベースに、QST、大学と連携してアウトリーチヘッドクォーターを設置し、核融合研が当該活動を先導することが望まれる。

## [2] 提言

今回の評価において、核融合研における LHD 計画プロジェクトについて議論した。その内容を踏まえて、LHD 計画プロジェクトの今後の進め方に関する提言を、以下に記述する。

- (1) LHD の重水素実験により、ヘリカル系を含むトラスプラズマでの同位体効果に関する系統的な研究が飛躍的に進展している。今後も継続的にデータを積み重ねることで学術的な理解を深め、定量的な見通しを示すことができる核融合科学分野を構築することが望まれる。
- (2) 重水素プラズマの実験結果を踏まえて、LHD 計画の新たな展開に精力的に取り組むべきである。特に、LHD の最大の特長である高温プラズマの定常維持を活かして、物理的及び工学的な視点を包含した定常研究計画の立案を加速する必要がある。
- (3) 定常核融合炉として魅力を有するヘリカル型核融合炉に向けた展開シナリオの検討を期待する。核融合炉に関連した研究課題を抽出するとともに、これまでの炉工学研究の成果を含めた総合的な研究の推進が望まれる。
- (4) 安全対策に関しては、LHD 装置システム内のトリチウム残存への配慮や真空容器内作業に伴う被ばく管理に十分配慮しつつ、現在の安全安心な実験環境を維持することが求められる。そのためにも、技術の進展や知見の高度化に伴い、必要な事項の見直しを行い、合理的で持続可能な安全体制を構築することが望まれる。
- (5) ITER 計画・BA 活動に対する戦略的な取り組みを行うとともに、原型炉開発での共通点を見据え、原型炉開発に向けた文部科学省のアクションプランに則った研究開発への貢献を行う必要がある。併せて、ITER 計画・BA 活動に対する成果及び貢献を統計的にまとめ、情報発信する努力が弱いので、改善を期待する。
- (6) 核融合研がこれまで行ってきた広報活動をより発展させ、全国を対象に広く核融合研

究の意義と将来展望について広報を行うために、QST、大学と連携してアウトリーチ活動を戦略的に先導することが望まれる。

## 第4章 おわりに

プラズマ・核融合分野での COE としての求心力を一層強化するため、核融合研では、2010（平成22）年度から LHD・理論シミュレーション・核融合工学の三つの研究プロジェクトを構成し、核融合炉実現に向けて、これらの成果を統合していく研究計画を開始した。併せて、核融合研の研究組織を改編し、全研究教育職員が一つの研究部にまとめられ、三つの研究プロジェクトへ自由に参画する体制とした。これにより、LHD・理論シミュレーション・核融合工学の連携が推進され、課題に対して臨機応変に対応できることが期待される。

核融合研の外部評価委員会では、2015（平成27）年度に数値実験炉研究プロジェクト、2016（平成28）年度に共同研究、2017（平成29）年度に核融合工学研究プロジェクトの評価を実施した。そして、本年度は運営会議において「LHD 計画プロジェクト」を対象として外部評価を実施することとした。外部評価委員会は運営会議の所外委員10名と外国人委員3名、さらに国内外の専門委員3名を加えて構成され、以下の観点で評価を行った。

### 【平成30年度外部評価における評価の観点】

#### [実施体制・実施状況]

- (1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。  
(第三期中期計画より)
- (2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされ  
るとともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。(第三期中期計画より)

#### [初期実験の成果と今後の研究展開]

- (3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られている  
か。(第三期中期計画より)
- (4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。  
(第三期中期計画より)
- (5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器  
の整備等が進められているか。
- (6) LHD プロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討  
しているか。

#### [共同研究]

- (7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置  
研究における国内外の COE としての役割を果たしているか。
- (8) ITER 計画・BA 活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄  
与しているか。(第三期中期計画より)

[人材育成、社会の理解へ向けた取り組み]

- (9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。
- (10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか。

外部評価委員会は、2018（平成30）年9月から2019（平成31）年2月にかけてメール審議も含め4回開催され、核融合研からの評価項目に沿った詳しい説明及び質疑応答等が行われた。委員会での審議を踏まえ、外部評価委員の評価結果を取りまとめることで、本報告書を作成した。

本年度実施した「LHD 計画プロジェクト」に対する外部評価の結果としては、上記の評価項目に対して、概ね「極めて高く評価する」から「高く評価する」のレベルであるとの結論となった。特に重水素実験を開始するにあたり、国内外との連携を図った実施体制や安全管理機器・設備等の整備と安全管理体制の構築、更には地域住民の理解を深めるための努力に対して、大変高く評価されており、重水素実験に向けた核融合研の真摯な努力に敬意を表す。重水素実験でのプラズマの高性能化も着実に図られており、ヘリカル系を含む環状プラズマの総合的な理解への貢献も高く評価されている。一方、核融合炉実現に向けた今後の研究展開に関して、現時点では必ずしも高い評価とは言い難い。提言でも言及してあるように、ヘリカル系の最大の特長である高温プラズマの定常維持を活かした LHD 計画の新たな展開に精力的に取り組むとともに定常ヘリカル核融合炉に向けた課題抽出と開発シナリオの構築を期待する。

最後に、核融合研の LHD 計画プロジェクトの今後の進め方に関する提言を下記のようにまとめた。

- (1) LHD の重水素実験により、ヘリカル系を含むトラスプラズマでの同位体効果に関する系統的な研究が飛躍的に進展している。今後も継続的にデータを積み重ねることで学術的な理解を深め、定量的な見通しを示すことができる核融合科学分野を構築することが望まれる。
- (2) 重水素プラズマの実験結果を踏まえて、LHD 計画の新たな展開に精力的に取り組むべきである。特に、LHD の最大の特長である高温プラズマの定常維持を活かして、物理的及び工学的な視点を包含した定常研究計画の立案を加速する必要がある。
- (3) 定常核融合炉として魅力を有するヘリカル型核融合炉に向けた展開シナリオの検討を期待する。核融合炉に関連した研究課題を抽出するとともに、これまでの炉工学研究

の成果を含めた総合的な研究の推進が望まれる。

- (4) 安全対策に関しては、LHD 装置システム内のトリチウム残存への配慮や真空容器内作業に伴う被ばく管理に十分配慮しつつ、現在の安全安心な実験環境を維持することが求められる。そのためにも、技術の進展や知見の高度化に伴い、必要な事項の見直しを行い、合理的で持続可能な安全体制を構築することが望まれる。
- (5) ITER 計画・BA 活動に対する戦略的な取り組みを行うとともに、原型炉開発での共通点を見据え、原型炉開発に向けた文部科学省のアクションプランに則った研究開発への貢献を行う必要がある。併せて、ITER 計画・BA 活動に対する成果及び貢献を統計的にまとめ、情報発信する努力が弱いので、改善を期待する。
- (6) 核融合研がこれまで行ってきた広報活動をより発展させ、全国を対象に広く核融合研究の意義と将来展望について広報を行うために、QST、大学と連携してアウトリーチ活動を戦略的に先導することが望まれる。

# 資料編 1

平成30年度 大型ヘリカル装置計画プロジェクト報告書



平成30年度

大型ヘリカル装置計画プロジェクト  
報告書

平成30年12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の当初目標とこれまでの歩み	
1. 2 核融合研究の現況と第3期中期目標・中期計画	
1. 3 大型ヘリカル装置における重水素実験	
2. 大型ヘリカル装置計画の実施体制と実施状況	11
2. 1 重水素実験に向けた国内共同研究体制の整備	
2. 2 海外との共同研究体制の整備	
2. 3 実験の実施体制と安全管理体制	
3. 重水素実験に向けた機器・解析コードの整備と運用状況	22
3. 1 本体	
3. 1. 1 真空容器内機器	
3. 1. 2 ガスパフ装置	
3. 1. 3 固体水素ペレット入射装置	
3. 1. 4 真空排気装置	
3. 1. 5 冷却水供給システム	
3. 2 加熱機器	
3. 2. 1 中性粒子ビーム加熱装置(NBI)	
3. 2. 2 電子サイクロトロン共鳴加熱装置(ECH)	
3. 2. 3 イオンサイクロトロン共鳴周波数帯加熱装置(ICRF)	
3. 3 計測機器	
3. 3. 1 高エネルギー粒子計測	
3. 3. 1. 1 中性子計測システム	
3. 3. 1. 2 その他の高エネルギー粒子計測システム	
3. 3. 2 高精度輸送・揺動計測	
3. 3. 2. 1 H/D比計測	
3. 3. 2. 2 高速トムソン散乱計測	
3. 3. 2. 3 揺動計測	
3. 3. 3 周辺・PWI関連機器	
3. 3. 3. 1 プラズマ周辺部計測	
3. 3. 3. 2 PWI研究用関連機器	
3. 4 LHDプラズマ解析コードの整備	
3. 5 安全管理機器	
3. 5. 1 法令に基づく管理区域の設定	
3. 5. 2 放射線総合監視システム	
3. 5. 3 放射線計測	

3. 5. 3. 1	LHD 重水素実験に起因する敷地境界線量 (年間)	
3. 5. 3. 2	環境水中トリチウム濃度の推移	
3. 5. 3. 3	環境放射線量の推移	
3. 5. 3. 4	大型ヘリカル実験棟本体室の中性子分布計測	
3. 5. 4	トリチウム除去装置 (排気ガス処理システム)	
4.	重水素実験の初期成果と今後の研究展開	83
4. 1	運転領域の拡大	
4. 1. 1	高温領域の拡大	
4. 1. 2	同位体効果の検証とその活用	
4. 1. 3	乱流輸送特性の検証	
4. 1. 4	不純物輸送機構の同定	
4. 1. 5	運転領域拡大に関するまとめと今後の課題	
4. 2	同位体効果	
4. 2. 1	巨視的なエネルギー閉じ込め	
4. 2. 2	粒子輸送及び不純物輸送	
4. 2. 3	乱流揺動計測と非線形シミュレーションとの比較	
4. 2. 4	まとめと今後の課題	
4. 3	高エネルギー粒子閉じ込め	
4. 3. 1	高エネルギー粒子の古典的な閉じ込めに対する理解	
4. 3. 2	高エネルギー粒子と MHD 不安定性との相互作用	
4. 4	プラズマ壁相互作用 (PWI)	
4. 4. 1	重水素化ジボランを用いたボロニゼーションによる軽水素軽減効果	
4. 4. 2	真空容器内のトリチウム分布計測	
4. 4. 3	環状プラズマにおけるタングステン Fuzz 構造の形成	
4. 5	今後の展開	
5.	国際的な共同研究の取り組み状況	111
5. 1	計測器開発	
5. 2	加熱機器開発	
5. 3	低温機器開発	
5. 4	その他の ITER/BA 活動に対する貢献・国際共同研究の取り組み	
6.	人材育成、社会の理解へ向けた取り組み	121
6. 1	大学院教育	
6. 2	社会の理解	
6. 2. 1	広報活動	
6. 2. 2	自治体との連携	

## 1. はじめに

### 1.1 大型ヘリカル装置計画の当初目標とこれまでの歩み

我が国独自のアイデアである「ヘリオトロン方式」に基づく大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD) は、1986年の学術審議会における議論を経てまとめられた報告「大学における今後の核融合研究において」に基づいて物理設計が開始され、数年間の作業を経て1990年代初頭に現在の最終仕様が固まった。LHDは、超伝導コイルを有する世界初のヘリカル型装置であり、大きさに関しても最近実験を開始したドイツのベンデルシュタイン7-Xと並んで世界最大規模を誇る。

LHDの最大の特徴は、「連続通電可能な超伝導コイル」が生成する磁場で「無電流プラズマを閉じ込める」点である。これにより高性能プラズマの定常維持が可能となる。このためLHDは、設計段階から高性能定常プラズマ維持研究に向けた先進的な機能を備えることが計画されていた。例えば定常運転で重要となる熱・粒子制御を行うダイバータの設置に必要な空間や、プラズマの高性能化に必要な中性粒子入射加熱装置 (NBI) 用接線ポートは複数確保した。更に、高度な物理研究に不可欠な種々の計測器用大口径ポートも可能な限り確保した。

このような設計思想の下、LHDは約8年間にわたる工学設計、装置建設を経た後1998年3月、「ヘリカル型磁場配位により核融合炉に外挿しうる高性能定常プラズマを実現し、その性質を学術として体系化することにより、ヘリカル型核融合炉に向けた物理的、工学的研究課題を解明する」ことを大目標に掲げ実験を開始した。具体的な重点研究課題は物理設計の段階で明確にされており、物理設計活動の成果をまとめた「オレンジブック」に次のように記載されている。

- [1] 高い核融合三重積を持つプラズマを発生し、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、準定常プラズマの制御実験を行い、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る舞いを研究し、炉心プラズマでの $\alpha$ 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

また、将来の核融合炉技術開発の一環として、以下のような炉工学研究を行うことも記載されている。

- [1] 蓄積エネルギー2GJ以上の大型超伝導コイルの開発と製造
- [2] 長時間放電に伴うプラズマ・壁相互作用の克服とダイバータ・第一壁材料の開発

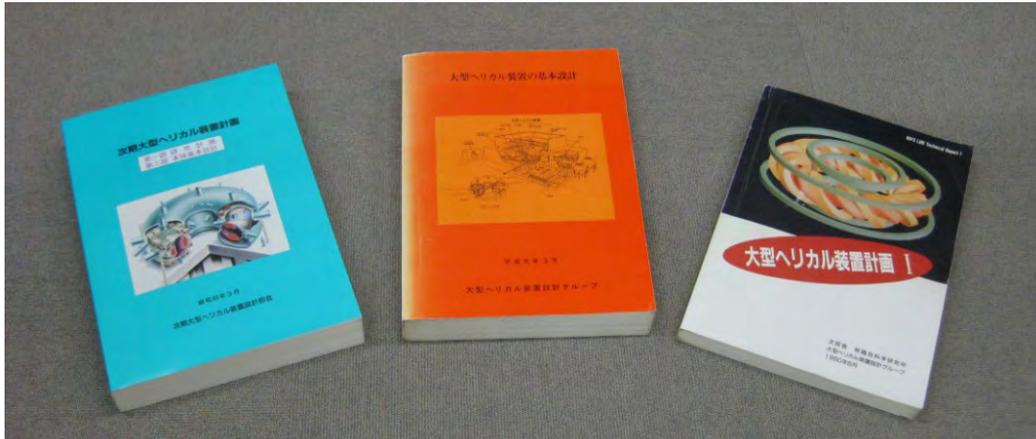


図1.1-1 1988年～1990年にまとめられた設計報告書

これらの研究課題を遂行し、LHD計画の目的を達成するために以下に示すような目標プラズマパラメータが設定されている。

- 核融合三重積 ( $n\tau T$ ):  $\langle T \rangle = 3\text{--}4 \text{ keV}$ ,  $\langle n \rangle = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,  $\tau_E = 0.1\text{--}0.3 \text{ s}$
- 高イオン温度 :  $T_i(0) = 10 \text{ keV}$ ,  $\langle n \rangle = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- 高ベータ ( $\beta$ ) :  $\langle \beta \rangle \geq 5\%$ ,  $B = 1\text{--}2 \text{ T}$

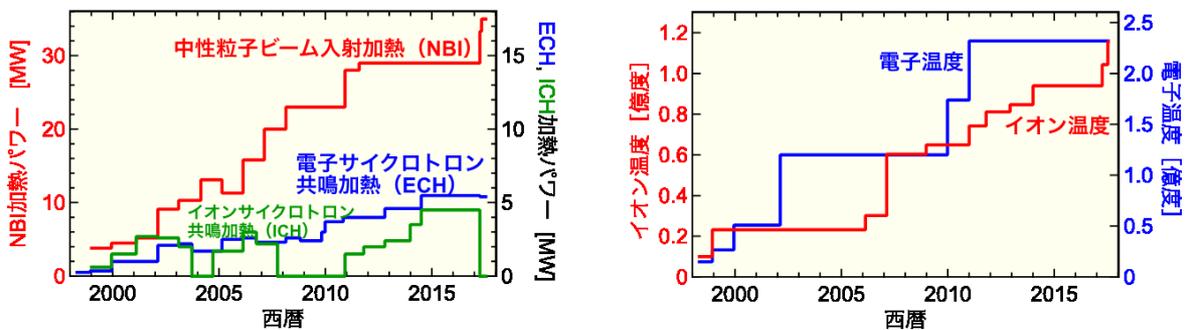


図 1.1-2 加熱機器の整備の進展とイオン温度、電子温度のパラメータの進展

1998年の実験開始以来、これらの目標プラズマパラメータの達成に向けて、加熱機器等の装置の整備を進めつつ、プラズマの高性能化へ向けた学術研究を展開してきた。図1.1-2に、加熱機器の整備の進展とイオン温度、電子温度のパラメータの進展を示す。加熱機器の整備と閉じ込め改善などの学術研究の進展により、着実にパラメータ領域の拡大が図られてきたが、2017年に開始された重水素を用いた実験で、イオン温度はLHDの目標10 keV (1億2,000万度) を達成し、パラメータ領域が1段階拡大されたことが分かる (詳細は4章

に記述)。また、表1.1-1に、LHDの到達パラメータとそれに対応した目標プラズマパラメータを示す。同時達成ではないものの、イオン温度、電子温度、電子密度は目標値をほぼ達成している。また、ベータ値やプラズマ持続時間等も、20年間の実験で目標プラズマパラメータに肉薄していることが分かる。

表1.1-1 LHDの到達パラメータとそれに対応した目標プラズマパラメータ

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	1億2,000万度度 (密度13兆個/cm <sup>3</sup> )	1億2,000万度 (密度20兆個/cm <sup>3</sup> )	1億2,000万度以上 100兆個/cm <sup>3</sup> 以上 閉じ込め1秒以上
電子温度	2億3,000万度 (密度2兆個/cm <sup>3</sup> ) 1億2,000万度 (密度16兆個/cm <sup>3</sup> )	1億2,000万度 (密度20兆個/cm <sup>3</sup> )	
密度	1,200兆個/cm <sup>3</sup> (温度300万度)	400兆個/cm <sup>3</sup> (1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場 0.425テスラ) 4.1% (磁場 1テスラ)	5% (磁場 1-2テスラ)	5%以上 (磁場 5テスラ)
定常運転	54分 (500 kW) 48分 (1,200 kW)	1時間 (3,000 kW)	定常(1年)

上述したパラメータの伸展とともに、ヘリカルプラズマの物理に関する理解も進んでいる。代表的な物理成果を以下に挙げる。

- ・ LHD(ヘリオトロン配位)の熱輸送特性はジャイロボーム的
- ・ エネルギー閉じ込め性能はトカマクELMy H-modeと同程度 (ISS閉じ込め比例則)
- ・ 新古典輸送理論で予想されされている電場による輸送改善を実験で検証
- ・ 磁場の3次元性に起因する物理
  - ⇒ 磁気島の自己修復
  - ⇒ 周辺ストキャスティック層中の不純物輸送
  - ⇒ エネルギー放射層としての役割、非接触ダイバータ実現との関係

さらに、2016年度末より始まった重水素実験において、初期結果ながら以下に示す重要な知見が得られた(詳細は第4章)。

- ・ ヘリカル装置で初めて明確な同位体効果を確認
- ・ 高エネルギー粒子の閉じ込めは同規模のトカマクと同程度

以上述べたように、LHDは1998年の実験開始以来、20年間で多くの重要な成果を挙げてきた。2017年より始まった重水素実験では、将来のヘリカル型定常核融合炉の実現に向け、更にプラズマの高性能化とデータベースの蓄積を進め、学理の体系化を図る必要がある。

重水素放電でイオン温度は確実に上昇したが、今後、学術研究として特に重要となって来る課題は、プラズマ性能の向上に繋がった物理機構の解明と、その高性能プラズマの長時間維持である。質量の違いに代表されるプラズマ閉じ込めの同位体効果は未解明な課題であり、それに取り組むことは、将来の核融合炉で燃料として使用する重水素・トリチウムによるプラズマ性能を見通すことを可能にするとともに、学術研究としてもその意義は高い。また、高性能プラズマの定常維持は、将来、核融合炉を実現する上で最も重要となる条件の一つである。

## 1.2 核融合研究の現況と第3期中期目標・中期計画

人類初となる制御熱核融合の実証実験を行う「国際熱核融合実験炉 (ITER)」の実験開始が2025年に予定されている。現地で装置建設が本格化する中、各国の中・大型トカマク装置の主要研究課題もITERの支援研究という位置付けになっている。これから建設や本格的な稼働が予定されている装置も同様で、世界の核融合研究はITER計画及びその進捗を時間軸として進んでいるといっても過言でない。国内でも、ITERより5年早い2020年に実験を開始する予定の「JT-60SA」の建設が最終段階に入っており、現在、具体的な立ち上げスケジュールの策定や、共同研究体制の構築が行われている。

一方、ITERを中心としたトカマク研究とともに、国内外のヘリカルプラズマの研究も近年、活性化している。ユーロフュージョンのロードマップでもトカマク原型炉を目指す路線を主軸としながら、定常運転が可能なヘリカル研究をヴェンデルシュタイン7-Xで相補的に推進する計画となっている。また、ヨーロッパ以外でも、定常性に優れたヘリカル研究推進の機運が高まっており、アジア、特に中国ではトカマク研究とともにヘリカル研究が国の核融合政策の重要課題として位置付けられ、4つのヘリカル研究拠点が形成された。現在、中国は国際エネルギー機関 (IEA) 傘下の国際ステラレータ協定への加盟手続きを開始している。その他、米国でも複数の新装置の建設計画が進行中であり、南米コスタリカでも2016年、SCR-1装置が完成し、ヘリカル研究が開始された。図1.2-1に、各国のヘリカル研究の動向を示す。

このように各国でヘリカル研究の機運が高まる中、これまで世界のヘリカルプラズマ研究を推進してきたLHDは、そのプロジェクトの集大成と言える重水素実験を2017年3月に開始した。これは2016年度から始まった、研究所の第3期中期目標・中期計画期間における最重要課題に位置付けられている。以下、第3期中期目標・中期計画のうち、LHDプロジェクトに関する部分の抜粋を掲載するとともに、今回の外部評価における「評価の観点」との関係を示す。

### 【中期目標】

核融合科学分野では、我が国における核融合科学研究の中核的研究拠点として、大学や研究機関ととも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。

## 【中期計画】

### 1. 研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置

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て、大型ヘリカル装置(LHD)の更なる性能向上を目指し、プラズマ制御、加熱及び計測機器、並びに安全管理設備の整備を進めて、重水素実験を実施する(評価の観点2)。これにより、第3期中期目標期間終了時までには、イオン温度1億2,000万度を達成し、核融合炉に外挿可能な超高性能プラズマを実現する(評価の観点3)。また、重水素放電におけるイオンの内部輸送障壁形成や粒子リサイクリング特性等に関する水素同位体効果を、共同研究を基盤とする学術研究により検証する(評価の観点3, 4)

### 2. 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

LHDによる重水素プラズマ実験、プラズマシミュレータによる大規模シミュレーション及び大型試験設備を活用した炉工学研究を高度な共同利用・共同研究として国内外に展開する(評価の観点1)。国内においては、その質を上げること、国外については、その機会を増やすことを目標とする。自然科学大学間連携推進機構(仮称)の一環としての双方向型共同研究を始めとする大学間ネットワークを整備・活用した共同研究を先導することにより、大学からの研究成果創出に資する。2国間・多国間協定に基づく連携事業については限られた予算の中で研究計画を重点化し、より高い成果を目指す。国際熱核融合実験炉(ITER)等の国際事業に対しても、卓越した研究拠点として連携協定の下、大学とともに核融合科学研究所(NIFS)が知見を持つ分野で更なる連携協力を図る(評価の観点8)。また、共同利用機能を持続的かつ高いレベルで提供するため、大型ヘリカル装置及びプラズマシミュレータの共同利用率を100%に維持する。



図1.2-1 世界のヘリカル研究

### 1.3 大型ヘリカル装置における重水素実験

将来のヘリカル型定常核融合炉の実現に向け、LHDにおいて、イオン温度1億2,000万度のプラズマの実現をはじめとするプラズマの高性能化を達成して、核融合炉心プラズマと同等のパラメータ領域における閉じ込め特性などのデータベースの蓄積を図り、その学理の体系化を行う必要がある。そのためには、現在、水素ガスを用いたプラズマ実験から、格段のプラズマ性能の向上が期待される重水素ガスによる実験に切り替えることが最も有効な手段である。

水素の同位体である重水素を用いることにより、プラズマの閉じ込めが改善することが多くのトカマク型装置で示されている。表1.3-1に、水素実験と比べた重水素実験によるプラズマ性能の向上度を各種トカマク型装置について示す。いずれの装置においても、質量比の平方根に相当する1.4倍程度の向上が見られている。このように、重水素実験を実施することにより、装置性能を増強することなく、より高性能なプラズマを実現することが可能である。また、質量の違いに代表されるプラズマ閉じ込めの同位体効果は未解明な課題であり、それに取り組み、メカニズムを明らかにすることは、将来の核融合炉で燃料として使用する重水素・トリチウムによるプラズマ性能を見通すことを可能にするとともに、学術研究としてもその意義は高い。

表1.3-1 各種トカマク型装置における重水素実験による向上度

実験装置名	国	重水素による向上度
JFT-2M	日	1.1~1.4
JT-60U	日	1.2~2
Alcator C	米	1.5
DIII-D	米	1.4~2
ISX-B	米	1.4
TFTR	米	1.2
ASDEX	独	1.3~2
ASDEX-U	独	1.5
TEXTOR	独	1.4
JET	英	1.2~1.4
FTU	伊	1.4

重水素実験においては、重水素同士の核融合反応そのものを研究対象とするのではなく、ヘリカル型核融合炉に外挿できるプラズマの高性能化、核融合炉の実現に必要とされる高温プラズマ物理の学術的研究、環状プラズマの総合的理解、学理の体系化及びこれらの物理研究と密接に関わる要素技術の開発、実証、蓄積を行うことを目的としている。トカマク型装置におけるプラズマ閉じ込め特性の同位体効果に関する知見からは [表1.3-1]、Ohmic、L-mode、H-modeと様々な放電シナリオに対して、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも良好な閉じ込め性能を示すことが観測されており、閉じ込め特性に関する同位体効果が確認されている。このため、LHDにおいても重水素実験を行うことにより、トカマク型装置と同様に閉じ込め性能が向上し、重水素実験に向けて行われる加熱機器の増強と相まって、プラズマパラメータ領域の拡大が期待される。トカマクにおける同位体効果は、実験的にその効果が認識されている一方、閉じ込め時間のプラズマイオン種の質量依存性が装置によって異なり、また、単純な理論予測ではイオン質量の増加に伴う閉じ込めの劣化が予想されている等、そのメカニズムについては不明な点が多い。このため、LHDの重水素実験において、ヘリカル型装置に対する同位体効果の有無を検証することは、学術的にも極めて重要である。

LHDにおける重水素実験の目的は以下のとおりである。

- [1] 閉じ込め改善による高性能化を実現して、現状より核融合条件に近いプラズマの研究を遂行し、それにより、新たな研究領域の開拓や実験の多様性を拡大すること。
- [2] 閉じ込め物理の質量依存性(同位体効果)に関する研究を行い、重水素・三重水素プラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築すること。
- [3] ヘリカル系の高エネルギーイオンの閉じこめ性能が核燃焼プラズマを展望できることを示すこと。

また、これらの目的を達成する上で重要な研究課題は以下のようにまとめられる。

- (1) ヘリカル系における同位体効果を調べ、プラズマの閉じ込め改善実験を行う。
- (2) 重水素実験による閉じ込め改善と加熱電力の増大により、プラズマを高温度化し、ヘリカル型装置の高温度プラズマの理解を深める。また、同様にして、ベータ値の増加を図り、高温度領域におけるMHD安定性の研究を行う。
- (3) ICRF加熱実験において少数イオン加熱を行い、高イオン温度を実現するための研究を行う。
- (4) 重水素プラズマから発生する中性子を利用して、高エネルギーイオンの振る舞いを調べ、ヘリカル型装置における高エネルギーイオンの閉じ込め特性を評価する。
- (5) 重水素実験において高性能化したプラズマを利用して、高熱負荷環境化でのダイバータ等のプラズマ対向壁材料研究を行う。
- (6) プラズマ対向壁材料における水素同位体の滞留メカニズムを明らかにし、将来の核融合炉における水素同位体収支の理解を加速する。
- (7) ヘリカルプラズマの物理を学術的、体系的に理解し、ヘリカル型核融合炉の設計・製作に必要なデータベースの蓄積を図る。
- (8) トカマクとの共通点・相違点を体系的に研究し、環状プラズマを総合的に理解する

重水素実験を行うと、使用した重水素ガスの最大でも1万分の1程度と小さな割合ではあるが、重水素同士が核融合反応を起こし、放射性物質であるトリチウムと放射線である中性子を発生する。また、中性子により僅かではあるが放射化物が生成される。そのため、実験を安全に遂行し、これらが環境へ影響を与えないようにするため、法令に基づいて管理区域を設定して適切に放射線管理を行うとともに、排気・排水及び敷地境界の線量には研究所管理値を設定するなど、安全管理計画を策定し、必要な設備・施設を整備するなどして安全管理体制を整えなければならない。そして、地域の市民に、重水素実験とその安全管理計画について十分に説明して理解を得るとともに、関係自治体(土岐市、多治見市、瑞浪市及び岐阜県)と協定書を結ぶ必要がある。

安全管理計画では、LHDの重水素実験は、前半6年、後半3年の合計9年間を計画し、トリチウム及び中性子の年間の最大発生量は、前半の6年が各年 $2.1 \times 10^{19}$ 個、後半3年が各年 $3.2 \times 10^{19}$ 個としている。なお、トリチウムの発生量を放射エネルギーに換算すると、前半の6年は年間37 GBq(1 Ci)、後半3年は年間55.5 GBq(1.5 Ci)となる。発生したトリチウムは、真空排気装置に接続されたトリチウム除去装置により水素や重水素とともに酸化して、水の形で除去・回収する計画である。回収しきれなかったトリチウムは大気中に放出されるが、その研究所管理値は、9年の重水素実験期間を通して、年間3.7 GBq(0.1 Ci)以下としている。表1.3-2に、LHDの重水素実験におけるトリチウム及び中性子発生量の年次計画を示す。なお、LHD計画はプラズマの高性能化とその学術研究を目的としており、トリチウム(三重水素)を

燃料として用いた核燃焼実験は土岐サイトでは実施するものではない。

表1.3-2 LHDの重水素実験における年次計画

	前半6年間		後半3年間	
年度	初年度	第2～6年度	第7～9年度	第10年度以降
事項	予備の実験 (許認可検査)	プラズマ 高性能化実験	総合性能実験	ポストLHD 計画へ転換
年間トリチウム 最大発生量	370億ベクレル(1キュリー) (各年度積算量)		555億ベクレル (1.5キュリー) (各年度積算量)	---
年間トリチウム 最大放出量	37 億ベクレル(0.1キュリー) (各年度)			---
年間中性子 最大発生量	2.1×10 <sup>19</sup> 個 (各年度積算量)		3.2×10 <sup>19</sup> 個 (各年度積算量)	---

安全管理計画は、法令の遵守に加えて、

- (1) 発生するトリチウム量をできるだけ少なくする
- (2) 真空容器内に留まるトリチウム量は、全量が放出されても規制値を超えない量とする
- (3) 環境に影響を及ぼす可能性が考えられる放射性物質の生成は、規制値を超えない量とする
- (4) トリチウム含有水の保管は、漏洩に関して厳重に注意を払う

ことを安全に係わる基本的な考え方として策定している。安全管理計画は、放射線、プラズマ、リスクコミュニケーション、トリチウム、地震等の専門家委員とジャーナリスト、地元有識者で構成された第三者委員会としての重水素実験安全評価委員会でその内容が審議され、2007年11月に、安全計画は妥当という評価を受けるとともに、第三者による監視委員会の設置などが提言された。その後、2011年3月の東日本大震災を受けて再検討した安全管理計画が再度審議され、2012年2月に、再検討された安全管理計画は妥当という評価がなされ、それを確実に実行に移すことが肝要であるとの答申が出された。

重水素実験を地元の合意の下で進めるために、また、自治体としては重水素実験を含めた研究所の行う活動の安全性を市民に担保するために、周辺環境の保全等に関する協定書を関係自治体と締結することが、重水素実験計画を実施するために必要であった。そのためには、重水素実験の安全性に対する地域市民の理解と信頼関係の確立が必須であり、市民説明会をはじめとする広報活動を2006年より積極的に行ってきた。その結果、重水素実験の安全性に対して地域市民から一定の理解を得ることができ、2013年3月に、関係自治体(土岐市、多治見市、瑞浪市及び岐阜県)と協定書を締結するとともに、重水素実験開始に対する同意を得た。

協定書の締結と重水素実験開始の同意を受け、安全管理計画に従って、重水素実験の

開始に向けた設備、施設等のハードウェアの整備、運転マニュアル、放射線管理マニュアル等のソフトウェアの整備、法令に基づいた申請手続き等が進められ、2017年3月に重水素実験を開始した。

[1.3-1] M. Bessenrodt-weberpals, et al., Nucl. Fusion 33 (1993) 1205.

## 2. 大型ヘリカル装置計画の実施体制と実施状況

### 2.1 重水素実験に向けた国内共同研究体制の整備

LHDの実験は全て国内外の大学・研究機関との共同研究として行われ、「LHD実験会議」主導の下で計画を策定し、実施する体制をとっている。LHD実験会議はLHD計画研究総主幹が主催し、メンバーは約10名の実験責任者(LHDの実験を担当する研究総主幹、実験統括主幹、研究主幹、及び実験遂行を主導する職務上の代理等)、研究課題毎のグループ(トピカルグループ、TG)の所内・所外リーダー(トピカルグループリーダー、TGL)、所外サブリーダー(TGsL)、技術部長及び各課長、情報システム通信部担当者、核融合理論シミュレーション研究系研究主幹、核融合システム研究系教授、安全衛生推進部長で構成されている。表2.1-1に現在のLHD実験会議の構成を示す。このメンバーは、重水素実験2年目に当たる2018年度に更改された。重水素実験初年度に得られた成果と経験をもとに実験グループを再編したことに伴って(詳細は後述)前体制から2名増えている。

表2.1-1 LHD実験会議の構成

氏名	所属	役職
森崎友宏	高密度プラズマ物理研究系	研究総主幹/教授
長壁正樹	プラズマ加熱物理研究系	実験統括主幹/教授
久保 伸	プラズマ加熱物理研究系	主幹/教授
榊原 悟	高温プラズマ物理研究系	主幹/教授
三戸利行	装置工学・応用物理研究系	主幹/教授
村上 泉	核融合システム研究系	主幹/教授
藤堂 泰	核融合理論シミュレーション研究系	主幹/教授
西村清彦	安全衛生推進部	安全衛生推進部長/教授
下妻 隆	プラズマ加熱物理研究系	教授
渡邊清政	高密度プラズマ物理研究系	教授
磯部光孝	高温プラズマ物理研究系	教授
今川信作	核融合工学研究プロジェクト	教授
坂本隆一	高密度プラズマ物理研究系	教授
横山雅之	核融合理論シミュレーション研究系	教授
増崎 貴	核融合システム研究系	TGL/教授
高橋裕己	プラズマ加熱物理研究系	TGL/准教授
鈴木康浩	核融合理論シミュレーション研究系	TGL/准教授
田中謙治	高温プラズマ物理研究系	TGL/教授

佐瀬卓也	装置工学・応用物理研究系(放射線取扱主任者)	准教授
小林策治	技術部	部長
森内貞智	技術部・制御技術課	課長
林 浩己	技術部・装置技術課	課長(副部長)
近藤友紀	技術部・加熱技術課	課長
林 浩	技術部・計測技術課	課長
馬場智澄	技術部・製作技術課	課長
山本孝志	情報通信システム部	情報ネットワーク/助教
長崎百伸	京都大学エネルギー理工学研究所	TGL/教授
坂本瑞樹	筑波大学大学院数理物質科学研究科	TGL/教授
稲垣 滋	九州大学応用力学研究所	TGL/教授
村上定義	京都大学大学院工学研究科	TGL/教授
江尻 晶	東京大学大学院新領域創成科学研究科	TGsL/准教授
田中宏彦	名古屋大学大学院工学研究科	TGsL/助教
大島慎介	京都大学エネルギー理工学研究所	TGsL/助教
恩地拓己	九州大学応用力学研究所	TGsL/助教

LHD実験会議は図2.1-1に示すように、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実験の運営を行う。特に重水素実験の開始に伴って、後述する「国際プログラム委員会」と密に連携し、国際共同研究を推進する。実際の運営ではまず、各年度の実験(サイクル)で実施する研究課題を、一般共同研究 > LHD計画プロジェクト > 「LHD実験共同研究」の課題として所員や国内外の共同研究者から募集する。実施の可否に関する最終判断は「LHD実験会議」が行う。

TGは、原則2年ごとに再編成(見直し)を行う。併せてLHD実験会議は、新しいTGL、サブリーダー(TGsL)の指名も行う。図2.1-2に現在のTGの構成を、実験課題とともに示す。重水素実験初年度の結果を踏まえ、トピカルグループの数を3グループから4グループに増やしている。詳細は第4章に記載するが、2017年度は重水素実験初年度にも関わらず、明確な同位体効果や、良好な高エネルギー粒子閉じ込めが確認された。また、稼働が始まった中性子計測器を用いた実験で、高エネルギー粒子とMHD不安定性との相互作用が確認されるなど、プラズマパラメータの伸展とともに物理的な理解も深化した。このような状況を鑑みて、それぞれの課題に対してより具体的、効率的な実験計画を立てることが可能となるように、輸送研究グループと、MHD・高エネルギー粒子閉じ込め研究グループを分離した。

TG及びTGLの役割は以下のとおりである。所外・所内から各1名ずつ選任されたTGLはTGsLと協力して、担当するテーマの研究課題を遂行するために実験計画を立て、LHD実験会議にマシンタイムを要求する。LHD実験会議は、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。装置や実験の進捗状況によって、当初の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実験会議において実験計画の変更調整を行う。次年度以降の計画も、研究成果及び機器の整備状況等を考慮してLHD実験会議で決定される。

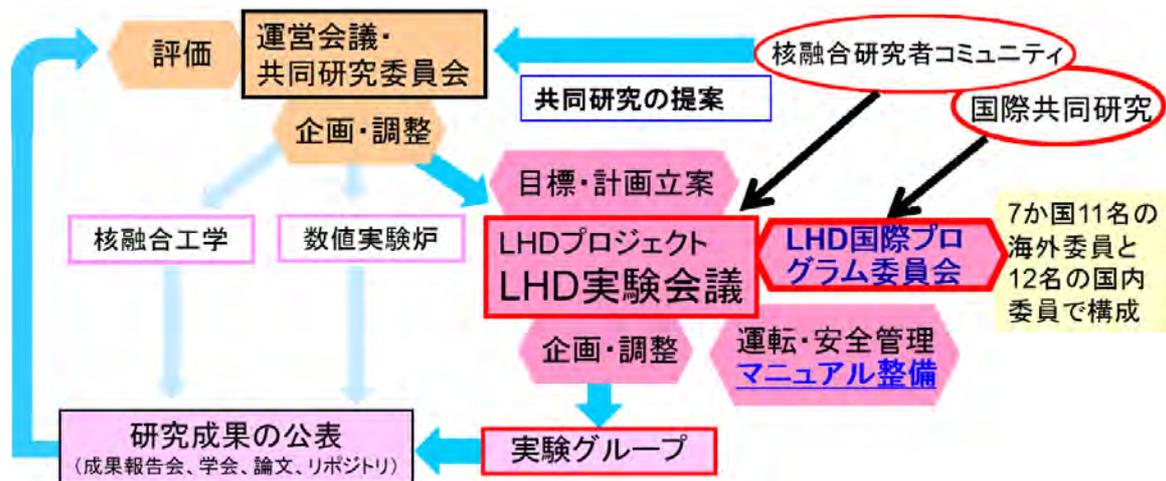


図 2.1-1 LHD 実験会議を中心とした運営体制

	トピカルグループ	課題・役割	所内リーダー (・印：主)	所外リーダー (・印：主)
1	高性能化	<ul style="list-style-type: none"> <li>パラメータ領域の拡大 (高温度、高ベータ、高Wp)</li> <li>重水素実験の研究計画策定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高橋</li> <li>向井</li> <li>小林達哉</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>村上 (京大)</li> <li>江尻 (東大)</li> </ul>
2	輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱・粒子輸送</li> <li>同位体効果</li> <li>揺動輸送</li> <li>加熱物理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>田中謙治</li> <li>吉沼</li> <li>辻村</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>稲垣 (九大)</li> <li>大島 (京大)</li> </ul>
3	周辺・ダイバータ・原子分子	<ul style="list-style-type: none"> <li>周辺プラズマ物理</li> <li>プラズマ・壁相互作用</li> <li>原子分子過程</li> <li>定常実験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>増崎</li> <li>鈴木千尋</li> <li>大石</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>坂本 (筑波大)</li> <li>田中宏彦 (名大)</li> </ul>
4	高ベータ・MHD・EP	<ul style="list-style-type: none"> <li>MHD安定性</li> <li>高ベータ実験</li> <li>高エネルギー粒子閉込め/MHD</li> <li>摂動磁場/3次元物理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鈴木康浩</li> <li>小川</li> <li>成嶋</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>長崎 (京大)</li> <li>恩地 (九大)</li> </ul>

表2.1-2 LHD実験グループ体制(第20実験サイクル)

## 2.2 海外との共同研究体制の整備

重水素実験開始に当たり、海外研究機関との共同研究活性化するため、研究所は、LHD実験会議と並列する組織として「LHD国際プログラム委員会(LHD-IPC)」を新設した。これは海外委員11名、国内委員12名で組織される委員会で、委員の構成を以下に示す。

海外委員は、

X. Duan	(中、西南物理研究院)
P. Gohil	(米、ジェネラルアトミックス社)
C. Hidalgo	(西、シーマット研究所)
W. Heidbrink	(米、カリフォルニア大学)
L. Hu	(中、中国科学院プラズマ物理研究所)
H.K. Park	(韓、国立核融合研究所)
B. Pégourié	(仏、原子力・代替エネルギー庁)
Maria-Ester Puiatti	(伊、RFXコンソーシアム)
U. Stroth	(独、マックス-プランク・プラズマ物理研究所)
R. Wolf	(独、マックス-プランク・プラズマ物理研究所)
M. Zarnstorff	(米、プリンストンプラズマ物理研究所)

国内委員は大学のLHD実験会議メンバー、

坂本瑞樹(筑波大)、長崎百伸(京都大)、村上定義(京都大)、稲垣 滋(九州大)、  
と、NIFS研究部のLHD実験会議メンバー、

森崎友宏、長壁正樹、榊原悟、久保伸、高橋裕己、田中謙治、増崎貴、鈴木康浩

である。これまでの委員会開催履歴は以下のとおりである。

第1回	2016年10月21日	京都国際会館	21名
第2回	2017年10月 4日	京都大学	16名(リモート4名)
第3回	2018年 9月19日	核融合研	15名(リモート8名)

第1回会合では重水素実験に向けた準備状況の報告、初期実験の予定、共同研究への参加方法、実験提案の方法について紹介するとともに、その内容に関する議論を行った。第2回は、重水素実験で新たに設置した機器のコミッショニング及び初回実験の総括、次回実験計画の説明を行った。第20サイクル実験開始直前に行った第3回会合では、今回の実験サイクルにおける各トピカルグループの研究推進方針の説明がなされ、それに基づいた最終的なマシンタイム配分の結果が示された。

上述のようにLHD-IPCは、各国からの共同研究提案の調整をLHD実験会議と連携して行うことで、効率的な実験運営と研究の高度化に貢献している。加えて国際共同研究自体の拡大も目指している。LHD-IPCの海外委員は、各国の主要研究機関・大学における指導的な立場の研究者であることから、それぞれの国・地域におけるLHD国際共同研究のハブとしての役割も期待することができる。事実、LHD-IPCの欧州委員を通じて、EUROFusionの

サポートを得た多くの共同研究者がヨーロッパ各地からLHDの重水素実験に参加している。

また、LHD-IPCは現在までに「LHD重水素ワークショップ」を2回開催した。これは、重水素実験に特化した国際ワークショップで、同位体効果等について、閉じ込め方式、実験、理論を問わず幅広い領域の研究者が出席した。特に、世界最大のトカマク装置であるJETが間もなくトリチウムを用いた燃焼実験を開始することから、トカマク研究者の間でも最近、同位体効果に関する関心が高まっている。以下、各回のプログラムを掲載する。

International Workshop on LHD Deuterium Experiment (LHD D-WS)		
9-10, February 2016		
NIFS (Administration Building 4th floor, Meeting Room #1)		
<b>9 February (Tue)</b>		
Chair: T.Morisaki (NIFS)		
10:05-10:10	Y. Takeiri (NIFS)	Welcome Address
10:10-10:40	M. Osakabe (NIFS)	Plans of LHD deuterium experiment
10:40-11:10	S. Sakakibara (NIFS)	Diagnostics capabilities on LHD deuterium experiment
11:10-11:40	U. Stroth (IPP Garching)	25 years of research on the isotope effect
11:40-12:10	P. Gohil (GA)	H-mode studies in hydrogen, helium and deuterium plasmas in DIII-D
Lunch		
Chair: B.Pégourié (CEA/IRFM)		
13:00-13:30	K. Tanaka (NIFS)	H/D comparison experiments in CHS and H/He comparison experiments in LHD
13:30-14:00	S. Murakami (Kyoto Univ.)	Integrated simulation of deuterium experiment plasma of LHD
14:00-14:30	M. Zarnstorff (PPPL)	Species scaling in TFTR and Ideas for LHD
14:30-15:00	F. Auremma (Consorzio RFX)	The RFX-mod experience on the isotope effect
Coffee Break		
Chair: Y.Xu (SWIP)		
15:20-15:50	S. Ohshima (Kyoto Univ.)	Isotope effects on long range correlation and turbulence in Heliotron J
15:50-16:20	C. Hidalgo (CIEMAT)	Influence of the isotope mass on fluctuations and transport in tokamaks and stellarators (particularly TJ-II, ISTTOK and JET)
16:20-16:50	M. Yagi (JAEA)	Isotope Effect on MHD/Transport and Related Issue
16:50-17:30	M. Nakata (NIFS)	Gyrokinetic turbulence simulation researches for heliotron and stellarator plasmas with hydrogen isotope
17:30-17:50	M. Nunami (NIFS)	Anomalous and neoclassical transport of impurity ions in LHD plasmas
18:10	Bus departs for workshop dinner	
<b>10 February (Wed)</b>		
Chair: C.Hidalgo (CIEMAT)		
9:10-9:40	K. Ogawa (NIFS)	Study on Energetic Ion Confinement in LHD Deuterium Experiment
9:40-10:10	Y. Xu (SWIP)	Edge turbulence and isotopic dependence - a comparative study between tokamaks and stellarators
Coffee Break		
Chair: U.Stroth (IPP Garching)		
10:30-11:20	K. Itoh (NIFS)	Detection of Isotope Effect via Hysteresis in Transport Relation
11:20-11:50	S. Yoon (NFRU)	Recent Progress of KSTAR Research: including Issues with Deuterium Operation and Potential Collaboration Topics
Lunch		
Chair: M.Zarnstorff (PPPL)		
13:00-13:40	B. Lyu (ASIPP)	Current status of EAST and future plan
13:40-14:10	H. Kasahara (NIFS)	Developments of steady-state plasma duration in the LHD and significances of international collaborations in long-pulse plasma devices
14:10-14:55	B. Pégourié (CEA/IRFM)	Particle balance and fuel retention in a carbon-dominated device: the example of Tore Supra
Coffee Break		
15:10-16:10	Summary and Discussion on international collaborations	

図 2.2-1 第1回LHD重水素ワークショッププログラム

**The 2nd International Workshop on LHD Deuterium Experiment (LHD D-WS)  
7-8, February 2018  
NIFS (Administration Building 4th floor, Meeting Room #1)**

**7 February (Wed.)**

**Chair: M. Osakabe (NIFS)**

10:00-10:10	Y. Takeiri (NIFS)	Welcome Address
10:10-10:40	K. Ogawa (NIFS)	Enhancement of energetic-ion confinement studies by using comprehensive neutron diagnostics in the Large Helical Device
10:40-11:10	S. Murakami (Kyoto U.)	Simulation study of fusion reaction rate and comparisons with experimental results in LHD
11:10-11:40	H. Matsuura (Kyushu U.)	Observation of a knock-on tail in LHD deuterium plasmas
11:40-12:10	Makoto Kobayashi (NIFS)	First measurements of neutron flux distribution in LHD torus hall generated by deuterium plasma experiment

*Lunch*

**Chair: B. Pégourié (CEA/IRFM)**

13:30-14:00	K. Nagaoka (NIFS)	Transport characteristics of ion internal transport barrier plasma in LHD
14:00-14:30	K. Mukai (NIFS)	Carbon impurities behavior in high-ion-temperature deuterium discharges on LHD
14:30-15:00	T. Oishi (NIFS)	Effect of deuterium plasmas on carbon impurity transport in the edge ergodic layer of Large Helical Device
15:00-15:30	P. A. Schneider (IPP-Garching)	Challenging the isotope effect myth

*Coffee Break*

**Chair: H-S. Bosch (IPP-Greifswald)**

16:00-16:30	H. Yamada (NIFS)	Isotope effect on energy confinement and thermal transport of dimensionally similar NBI heated plasmas in LHD
16:30-17:00	K. Tanaka (NIFS)	Isotope effects on transport and turbulence in ECRH plasma of LHD
17:00-17:30	F. Warmer (IPP-Greifswald)	Energy confinement of hydrogen and deuterium electron-root plasmas in the Large Helical Device
17:30-18:00	M. Nakata (NIFS)	Gyrokinetic simulation studies of isotope effects on turbulent transport in LHD

18:10-19:15 *Banquet (NIFS cafeteria)*

**8 February (Thur.)**

**Chair: Y. Todo (NIFS)**

10:00-10:30	K. Watababe (NIFS)	Dependence of RMP penetration threshold on plasma parameters and ion species in helical plasmas
10:30-11:00	S. Ohdachi (NIFS)	Helically-trapped energetic particle driven resistive interchange mode in the deuterium experimental campaign
11:00-11:30	H. Nuga (NIFS)	Fokker-Planck analysis of beam slowing down process in LHD
11:30-12:00	H. Sugama (NIFS)	Theory and simulation researches in neoclassical and turbulent transport

*Lunch*

**Chair: S. Kubo (NIFS)**

13:30-14:00	H-S. Bosch (IPP-Greifswald)	Progress in W7-X experiments, and outlook for OP1.2b and beyond
14:00-14:30	K. Ikeda (NIFS)	Exploring deuterium beam operation and behavior of Co-extracted electron in negative ion based neutral beam injector
14:30-15:00	M. Tanaka (NIFS)	Behavior and mass balance of hydrogen isotope in exhaust gas from LHD
15:00-15:40	B. Pégourié (CEA/IRFM)	From Carbon to Tungsten walls, plasma wall interaction research in Tore Supra and WEST

*Coffee Break*

**Chair: S. Sakakibara (NIFS)**

16:00-16:30	S. Masuzaki (NIFS)	Study of the divertor plasma in H, D and He discharges in LHD
16:30-17:00	G. Motojima (NIFS)	Edge neutral particle control with a closed helical divertor pumping in LHD
17:00-17:30	K. Ida (NIFS)	Isotope effect on impurity and bulk ion particle transport in Large Helical Device
17:30-18:00	T. Morisaki (NIFS)	Summary, outlook, and discussion on international collaborations

図 2.2-2 第2回LHD重水素ワークショッププログラム

海外共同研究者の増加と今後の国際共同研究の更なる活性化のために、共同研究者に提供する情報の英語化を進めている。具体的には実験予定表、実験日誌、各種マニュアル、案内の完全英語化を図った。また、それらにアクセスするための LHD ポータルサイトも完全英語化した。これはセキュリティ保護された共同研究者専用ページで、共同研究者には ID が付与されており、所外(海外)からのアクセスが可能である。図 2.2-3 に共同研究者用 LHD ポータルサイトを示す。



図 2.2-3 に共同研究者用 LHD ポータルサイト

この他、LHD 実験グループ全体会合も一部の技術的な議題以外は、英語化した。

## 2.3 実験の実施体制と安全管理体制

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置計画、数値実験炉研究、核融合工学研究の3つのプロジェクトから成るプロジェクト体制により研究を推進しており、専門が近い研究者からなる7つの研究系と六ヶ所研究センターで構成されたヘリカル研究部から研究者が、各プ

プロジェクトに参加している。大型ヘリカル装置計画プロジェクト(LHDプロジェクト)にあつては、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・運転を総括することによって、プロジェクトの円滑な遂行を図っている。

LHD実験はLHDプロジェクトの責任により実施されるが、(1)LHD実験会議、(2)重水素実験推進本部、(3)安全衛生推進部の3つの組織によって、同実験を安全かつ確実に実施する体制が整えられている。

実験の安全に関しては、安全衛生推進部を中心とした研究所の労働安全衛生管理体制及び放射線安全管理組織により管理され、安全の確保が図られる体制となっている。重水素実験の開始に当たり、研究所の放射線安全管理組織の強化のために、管理体制を図2.3-1に示すように変更した。大型ヘリカル実験棟における放射線障害防止法に基づく管理区域に対しては、管理区域内の関連する装置に装置責任者を置き、それらを統括する管理区域責任者を新たに配置することにより、装置の安全な運転及び放射線の安全管理を行うこととした。重水素実験の開始に当たっては、プラズマから発生する中性子を高精度で計測するための中性子検出器(フィッションチェンバー:FC)及び同検出器の絶対感度較正をするために中性子線源が導入されたので、これらを統括して管理する使用責任者を配置した。また、LHD真空容器内構造物等の材料とプラズマとの相互作用を解析する場合には、これらの材料は非密封放射性同位元素として扱われるため、これらの材料を解析する設備を配置した分析エリアに対しても使用責任者を配置した。さらに、研究所全体の放射線安全管理体制を強化するために、複数の放射線取扱主任者を置き、その下に、外部有識者を委員長とする放射線安全委員会を新たに設置し、放射線管理業務に対する指導を行う体制とした。また、地元自治体(岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市)によって、研究所と締結した核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書(以下、協定書)及び同覚書に基づいて、核融合科学研究所安全監視委員会(以下、安全監視委員会)が設置された。

重水素実験推進本部は、重水素実験を円滑に実施するために、その準備を加速することを目的として実験統括主幹を本部長として平成26年3月に設置された。重水素実験推進本部の下に設置された重水素実験準備グループ(現、重水素実験推進支援グループ)が実務を担当して、放射線総合監視システムをはじめとする重水素実験に必要な機器の整備や法令に基づく管理区域の整備が進められ、実験装置の運用や保守点検に必要なマニュアル等の整備も実施された。また、安全監視委員会等との連絡・調整も本推進本部が担当する。

LHD実験会議はLHD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、研究主幹及び主幹代理]とテーマグループリーダー、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7～8名の所外の研究者から構成されている。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。LHDの運転期間中は週1回、保守期間中は隔週の開催を原則としている。LHDでは、各研究課題を共通するテーマで分類し、それにマシンタイムを配分するという、テーマグループ制により実験を遂行している。LHD実験会議では、所内の研究者及び所外の共同研究者からの実験提案を、このテーマグループ制に基づいて検討し、マシンタイムの配分、実験条件の確認等をはじめとして、加熱機器や計測機器の調整を行っている。その際、安全衛生推進部長が安全の観点からチェックを行う体制となっており、さらに、重水素実験に向けて、放射線管理室長をメンバーに加えて、実験遂行に対する放射線安全管理に関するチェック機能を強化した。

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、テーマグループ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。実験は前もって決められた年間スケジュールに沿って行われるが、装置や実験条件の変更が必要な場合は、LHD実験会議において事前に調整を行う。重水素実験においては、年間に発生する中性子量は、表1.3-2に示されるように年間最大中性子発生量未満になるように実験を実施する必要がある。実験の年間スケジュール策定に当たっては、実験によって発生する中性子の量が、年間最大中性子発生量の6割以下となるようにマシンタイムの調整を行う。実験実施に当たっては、実際に発生した中性子の年間積算量が最大中性子発生量の6割に達したところで警告表示を行い、その後は慎重に実験を進め、最大中性子発生量の8割に達したところで、その年の実験を停止することとしている。具体的な実験内容、実験条件及び予想中性子発生量は、前週に週間予定としてまとめ、実験総主幹あるいは実験統括主幹がこの内容を確認・承認し、実験グループメンバーに周知する。

実験当日は、朝の実験前打ち合わせにおいて、実験責任者が実験予定表に基づいて実施の確認を行う。図2.3-2に示すように、実験予定表には、実験条件及びその日の予定の詳細、並びに、当日の予想積算中性子発生量及び予想される1ショットあたりの最大中性子発生量が記載されている。重水素プラズマを用いた実験期間中においては、実験実施に当たっては、実際の1ショットあたりの中性子発生量が予定表に記載された予想最大中性子発生量を超えていないこと、実際の積算中性子発生量が予定表に記載された予想積算中性子発生量を超えていないことを確認しながら、安全管理計画に記載されているように、実験責任者の指示のもと、1ショット毎手動で実験シーケンスを起動する。実験予定表には、これら実験に関する情報に加えて、当日の担当体制、安全体制を記載し、打合せの場でその内容を確認する。緊急時の本部責任者、現場責任者、連絡員、記録係等の体制と役割も併せて確認する。また、放射線担当者が明記されており、重水素実験では、放射線発生量、管理区域内の線量管理、入退管理等、放射線管理に係る実験の安全な遂行に責任を持つ。

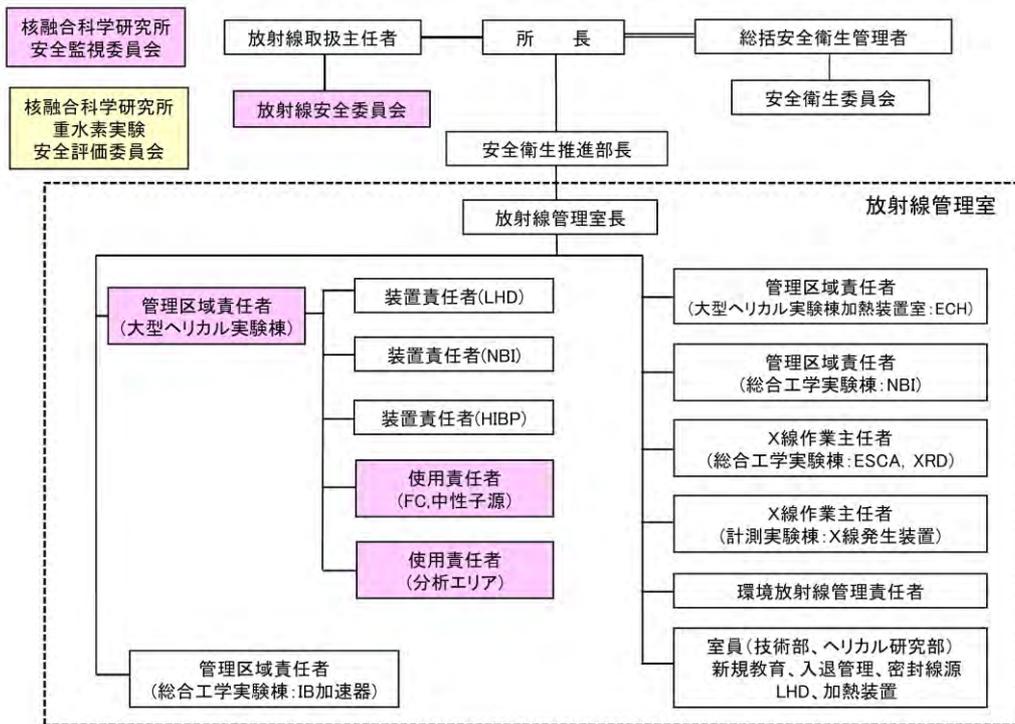


図 2.3-1 核融合科学研究所の放射線安全管理組織及び、重水素実験に関連する安全監視組織。薄赤色で塗られた四角を重水素実験実施に向けて変更した。「核融合科学研究所安全監視委員会」は、研究所と締結した核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書(以下、協定書)及び同覚書に基づき、地元自治体(岐阜県、土岐市、多治見市及び瑞浪市)によって設置された。



### 3. 重水素実験に向けた機器・解析コードの整備と運用状況

#### 3.1 本体

##### 3.1.1 真空容器内機器

LHD 本体に対しては、重水素実験における加熱パワーの増強、効果的な中性粒子制御を目指した真空容器内機器の高性能化を図った。特に、図 3.1.1-1 に示されるように、LHD 真空容器の内側壁に対して、重水素実験で高性能化される加熱機器の入射対向壁としての耐熱強化と、閉構造ダイバータとそれに最適化した新型真空ポンプを導入して、プラズマの高性能化に重要な中性粒子制御能力の高性能化を実施した。また、真空容器内機器の温度監視を行う熱電対の制御盤を中性子の影響の少ない位置に移動し、実験時の動作及び精度の信頼性を高める対策を行った。

3.2 節に示されるように、重水素実験の実施に伴って、LHD に 5 台設置されている中性粒子入射加熱装置(Neutral Beam Injector: NBI)のうち、2 台の加熱電力が 6MW から 9MW に増強された。また、電子サイクロトロン共鳴加熱装置(Electron Cyclotron Heating: ECH)の入射ポートも、プラズマ点火用の一部の系統を除き、加熱効率の高い水平外側ポート(2-O 及び 9-O)に集中配置した。重水素実験実施にあたり、NBI の入射対向壁に対しては、閉構造ダイバータ構造を導入するとともに対向壁保護板を炭素壁化し、ECH 対向壁については、対向壁保護板をモリブデン化するという耐熱強化を実施した。

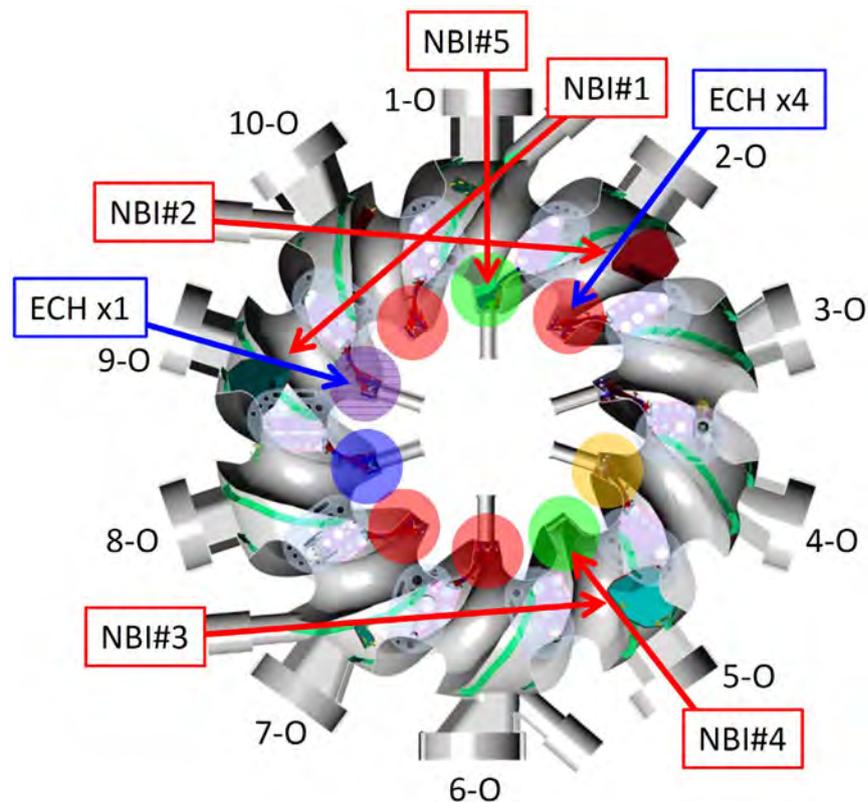


図 3.1.1-1 重水素実験に向けたLHD 真空容器内の対策。真空容器の内側壁に対して、緑丸部:NBI 入射対向壁化とポンプ無し閉構造ダイバータ、黄丸部:ポンプ無し閉構造ダイバータ、青丸部:閉構造ダイバータ及びプロトタイプクライオ吸着型ポンプ、赤丸部:閉構造ダイバータ及び高性能化クライオ吸着型ポンプ、及び、紫丸部:閉構造ダイバータ及び非蒸発型ゲッターポンプ、が導入された。

磁場で閉じ込められたプラズマは、唯一ダイバータと呼ばれる領域を介して固体表面と接している。主プラズマから漏れ出た高温プラズマは、ダイバータレッグを通してその温度を低下した後、等方性黒鉛のターゲット板(ダイバータ板)表面で中性化し、気体分子となってプラズマ周辺部に拡散する。LHD では、重水素実験に向けて、効率的な粒子リサイクリング制御を行うために「閉構造ダイバータ」を整備してきた。主な整備項目として、(1)中性粒子を高圧縮するためのバッフル構造化と、(2)高圧縮された中性粒子を排気するためのダイバータ内部への真空ポンプの設置である。2018 年度までに、図 3.1.1-1 に示されるように、10 セクション中 9 セクションに対してバッフル構造化を完了したほか、真空ポンプについては、5 セクションにクライオ吸着型ポンプ、1セクションに非蒸発型ゲッターポンプの設置を完了した。

ダイバータのバッフル構造化により中性粒子の高圧縮化が可能になった中で[3.1.1-1]、高圧縮された中性粒子を効率的に排気できるような真空ポンプの高性能化を行ってきた。真空ポンプには無機接着型のガス吸着型のクライオポンプを採用した[3.1.1-2]。具体的な高性能化として、排気コンダクタンス向上のための構造変更を行ったこと、R&Dにより高性能活性炭を選択して安定な排気速度を得たこと、クライオパネル面積の向上による排気容量の向上を行ったことが挙げられる。

高性能化クライオ吸着ポンプをLHDトロイダル5セクタの閉構造ダイバータ内部に設置した。その結果、排気速度は約  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  となり、以前部分的に設置されたプロトタイプと比べて、排気速度は7倍に上昇させることができた。図 3.1.1-2 に高性能化されたクライオ吸着ポンプの排気速度結果を示す[3.1-3]。また、排気容量は  $58,000 \text{ Pam}^3$  となり、水素ペレット約 20,000 発分に相当するまで向上させることができた。これは、LHD 高密度実験の 20 日分に相当するものであり、十分な排気容量を持たせることができたことになる。この高性能化により、供給した全燃料供給量の 50%を排気するまでに至っている。LHD の主真空排気系は全燃料供給量の 5%を排気しているので、ダイバータによる排気量はその 10 倍に値する。

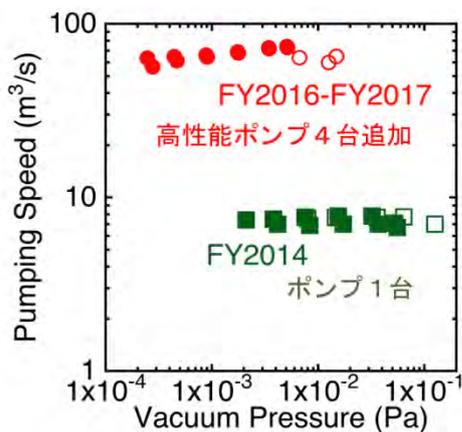


図 3.1.1-2 ダイバータクライオ吸着型ポンプの排気速度。■/□：プロトタイプポンプのみ、●/○：プロトタイプ及び高性能化クライオポンプ合計での排気速度

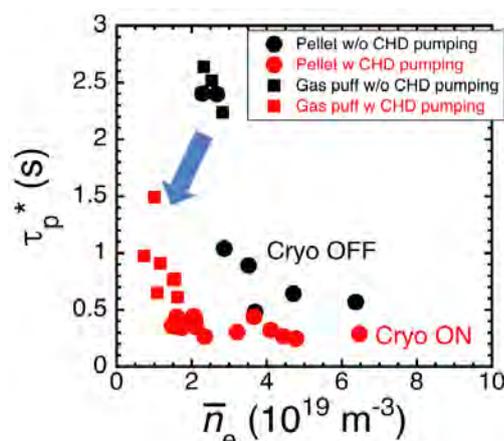


図 3.1.1-3 クライオ排気有無時における実効的な粒子閉じ込め時間 ( $\tau_p^*$ ) の線平均密度依存性

上記の高性能ダイバータ排気の下、LHD のプラズマ実験に適用し、以下のような実験結果を得た。ダイバータクライオ排気有無で実効的な粒子閉じ込め時間 ( $\tau_p^*$ ) を比較した結果を図 3.1.1-3 に示す[3.1.1-3]。クライオ有の場合に低い  $\tau_p^*$  が得られており、これは低リサイクリング状態が観測されていることを示すものである。すなわち、この結果は低密度へのアクセスがダイバータ排気によって可能となったことを示している。また、高イオン温度実験では第一壁のコンディショニングが必要であり、ECH 放電洗浄により第一壁を低リサイクリング状態とすることが、高イオン温度を達成するための一つの要因となっている。効率的な ECH 放電洗浄がダイバータ排気で可能になったことを示す結果が得られており、高イオン温度実験等への寄与も確認されている[3.1.1-4]。ダイバータ排気の更なる進展として、非蒸発型ゲッター (NEG) ポンプを1セクション設置したことも挙げられる。NEG ポンプは、真空中の気体分子を吸蔵合金の清浄な表面が持っている強い化学反応性を利用することで化学結合し、固定化する作用を利用した真空ポンプである。最近になり、高真空領域に対応した吸蔵合金がサエス・ゲッターズ社において開発され、ダイバータ排気用真空ポンプとして世界で初めて採用した。主たるダイバータ排気は、上記に示した吸着型のクライオポンプが用いられているが、クライオポンプは 10 K という極低温での運転を必要とする一方、NEG ポンプの運転温度は 500 K 程度であるため、ダイバータが対向する場所に加熱機器が設置されているセクションでは、NEG ポンプの方が運転温度の点で利点がある。2018 年度に加熱機器が増強される予定の 1 セクションに NEG ポンプを設置した(図 3.1.1-4)。排気性能試験の結果、約 10 m<sup>3</sup>/s の排気速度が得られ、性能目標に近い排気速度が得られた。現在、クライオポンプと NEG ポンプを用いたダイバータ排気(合計 80 m<sup>3</sup>/s の排気速度)をプラズマ実験に適用し、粒子リサイクリング制御に向けたダイバータによる粒子排気研究を行っている。



図 3.1.1-4 ダイバータ内に設置された NEG ポンプ

[3.1.1-1] S. Masuzaki et al., Plasma. Fusion Res. **6** (2011) 1202007.

[3.1.1-2] 村瀬尊則 他:クライオ吸着パネル及びその製造方法、並びにそれを用いた真空装置. 特許第 6021276 号, 2016.

[3.1.1-3] G. Motojima et al., Nuclear Fusion, **58** (2018) 014005.

[3.1.1-4] G. Motojima et al., 27<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, 22-27 Oct. 2018.

### 3.1.2 ガスパフ装置

重水素実験に向け、2014 年度にガスパフ装置の改造を行った。改造以前では少数のピエゾバルブ及びマスフローコントローラにより多様なガスを使用するため、実験トピックの変更に伴う使用ガス種の変更に対しては、実験中にガス交換を実施することで対応していたが、重水素実験実施後は、ガス交換に伴う実験実施中におけるガス配管の真空引き作業を無くすため、バルブの数を増やし、バルブ毎に使用ガスを固定することとした。ピエゾバルブ等を備えたマニホールドは、重水素実験時の中性子照射に伴う誤動作を無くす目的で、ポート直下から外側に向けて数 m 移動した上で、中性子遮蔽を施した。また、ヘリウム、ネオン、窒素、アルゴンの高圧ガスを安定に供給するため、それぞれ専用の昇圧機を新たに整備した。ガス入射ポートは 3.5-L、5.5-L、及び 9.5-L の 3 箇所であり、基本的に各ポートから水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴン、及びその他のガス(クリプトンやキセノン等)を入射できるようにした(図 3.1.2-1 参照)。ガス入射には、ピエゾバルブ、マスフローコントローラ、及びソレノイドバルブを用いる。各ピエゾバルブには流量計(マスフローメータ)が装備されており、1 秒程度の時定数で流量の実時間計測が可能である。

LHD においては、超伝導コイルのクエンチ発生時に急速減磁を行う必要があるが、この急速減磁時におけるプラズマの発生を抑制するため、真空容器内に多量のガスを導入するための緊急ガスパフ用大流量ピエゾバルブを計 4 台、専用で備えている。

3.5-L ポートと 9.5-L ポートには、それぞれ最大 3,000 sccm (約  $5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ) 及び最大 300 sccm (約  $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ) のマスフローコントローラが、水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴンの専用系統として 6 台ずつ、計 12 台配置されている。3.5-L ポートには超音速ガスパフ(SuperSonic Gas Puff, SSGP)装置も備えられている。高速応答ソレノイドバルブと全長 2.4 m の長尺ラバールノズルを組み合わせ、プラズマ直近からの  $1,000 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  台の大流量ガス入射を可能としている。入射ガスは水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴンの 6 種から選択する。ピエゾバルブ、マスフローコントローラ、及び SSGP のいずれについても、従来通り、密度信号等を用いたフィードバック制御が可能である。

中性粒子ビーム入射装置(NBI)や、ガスパフ同様、プラズマへの粒子供給を行うペレット入射装置等にガスを供給するためのガスユーティリティも拡充した。A から D までの各ステージに取り合いが設けられており、水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、アルゴン、及びその他のガスを低圧(0.1 MPaG(ゲージ圧=絶対圧-1 気圧))で、さらに水素、重水素、ヘリウム、窒素、ネオン、及びアルゴンについては高圧(最大 8 MPaG)でも供給可能である。本体室地下 2 階では、NBI に水素、重水素、及びアルゴンを 0.4 MPaG で供給している。

2016 年度から 2017 年度にかけて、ガスユーティリティからペレット入射装置等へのガス配管の接続を行った。重水素の供給により、従来の軽水素ペレットに加え重水素ペレットの入射も可能となった。ペレットの速度は射出ガス(ヘリウム)の音速に大きく依存するため、重水素ペレットの場合でも質量増加に伴う速度減少の割合はほとんど無視できる程度である。2018 年度には、ピエゾバルブ等を備えたマニホールドを遠ざけたことによる応答性を改善するため、5.5-L のポート直下に新規にマニホールドを設置し、窒素、ネオン、及びその他のガス系統のピエゾバルブのみを移設する改造を行った。

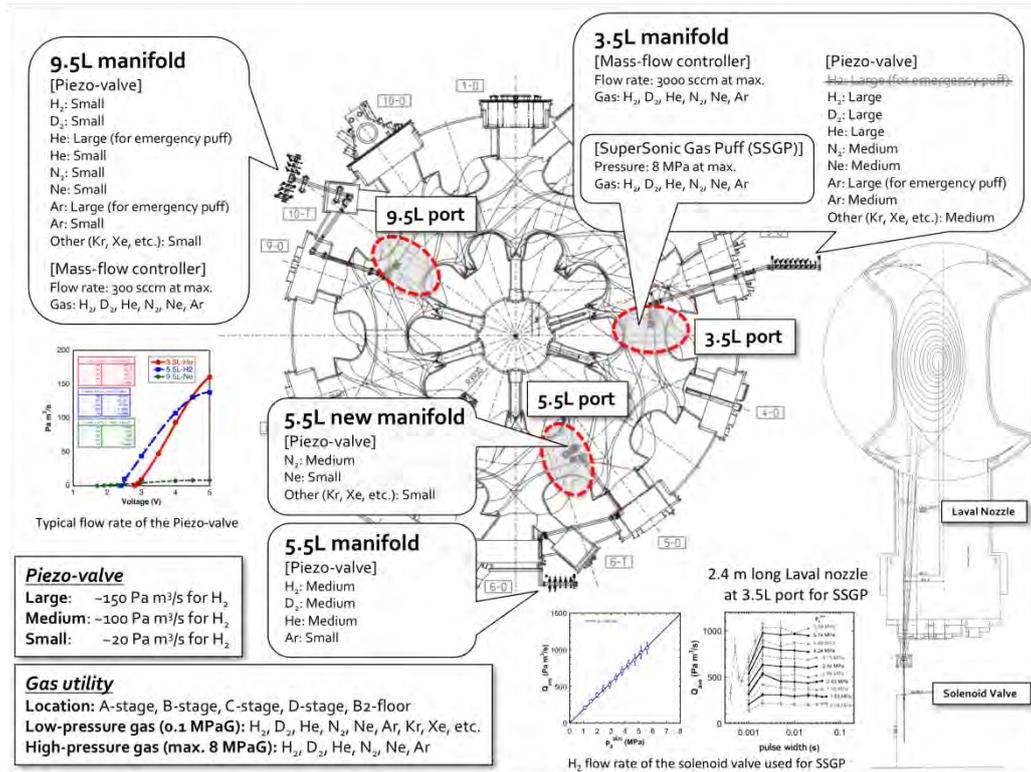


図 3.1.2-1 ガスパフ装置配置図

### 3.1.3 固体水素ペレット入射装置

LHD においては、ガスパフによる粒子供給システムの他に、水素同位体ガスを冷却してペレットとして固体化して入射する装置が設置されている。軽水素の三重点温度が 13.8 K に対して、重水素のそれは 18.7 K なので、重水素では 5 K ほど水素同位体固体化装置の運転温度が高くなる。そのため、重水素実験開始に当たっては、ヒーターによる温度調整機構を取り付ける改造を施した。また、ペレット入射装置は高圧ガスの膨張を利用してペレットを加速し、音速が速い軽元素ガスが加速ガスとして利用するのに有利であることから、重水素実験実施以前は、加速ガスとして高圧水素もしくは高圧ヘリウムを利用していった。しかしながら、重水素実験の開始後、実験実施期間中は、入射装置が設置された本体室へ月曜日以外に入れないため、メンテナンスが困難になること、また、重水素ペレット射出時に軽水素が不純物となる懸念があるため、高圧ヘリウムガスのみを加速ガスとして使用することとした。ヘリウムは水素よりも音速が遅いため、ペレットの射出速度が遅くなる。重水素ペレットは重量が重くなるため、加速も更に悪化する。結果として、ペレットの射出速度は最大 1400 m/s から 1100 m/s に低下した。しかしながら、ペレットのプラズマ侵入長は速度の 0.3 乗でスケールされるため、プラズマ侵入長に対する低速度化の影響は殆ど無い。ペレットの射出バルブは変えていないため、重水素化によるペレット粒子供給量に変化はない。

また、重水素実験開始前は、ペレット生成ガス及び加速ガスの供給は、本体室にガスボンベを設置して行っていたが、重水素実験開始後は、本体室内に設置したガスボンベが放射化物として取り扱われ、点検保守やガス補充のために持ち出すことができなくなるため、ガス

ポンベの利用を止め、ガスパフ供給装置が利用するガス配管からガス供給を受けるように改造した。

### 3.1.4 真空排気装置

LHD 本体の真空排気装置は、プラズマ真空容器を排気するための「真空容器系排気装置」、断熱真空容器を真空排気するための「断熱真空容器系排気装置」、計測機器の補助排気をするための「中間ステージ共通排気装置」、各真空ポンプから排気塔までを接続する「室外排気配管」で構成される。重水素実験の実施に当たって以下に述べる整備を行った。

まず、真空容器系排気装置と断熱真空容器系排気装置を独立した別系統とした。これは真空容器から排出されるトリチウムが断熱真空容器へ流入することを防ぐために行われたものである。また、重水素実験実施以前は、これらの排気装置の粗引き真空ポンプを共有していたが、それぞれ専用の粗引きポンプを用意し、配管を敷設して別系統とした。また、同様にポンプから排気塔までの室外排気配管も別配管とし、室外排気配管側からトリチウムが流入する可能性を排除した。

次に油回転ポンプをドライポンプに更新した。本体室及び本体室地下に設置された油回転ポンプに使用されたオイルは、中性子によって放射化され、廃棄できなくなる。そこで、オイルが不要なドライポンプを使用することにより、オイルを排除し、年間約 200 L 発生していた油回転ポンプの廃油の排出を抑えることが可能となった。これにより、不必要な放射化物の発生を抑制することができた。

以上に加えて、真空排気ガスからトリチウムを含む全ての水素同位体ガスを酸化し、水の形で除去する目的で 2 基の排気ガス処理システムが設置されたが、真空排気装置と排ガス処理システムの間を接続する室外排気配管として、2 系統の排気配管(実験ガス系排気配管、パージガス系排気配管)を新たに整備した。

### 3.1.5 冷却水供給システム

重水素実験で LHD 本体及び周辺機器が使用する冷却水は、管理区域内のみで循環するシステムとした(閉ループ)。管理区域内で循環する全ての冷却水は、管理区域外に設置されたクーリングタワーから供給される冷却水と、熱交換器を介して接するが、決して混合しない設計となっている(図 3.1.5-1)。

冷却水供給システムの純化システム(フィルター及びイオン交換樹脂)は、従前のシステムでは本体室地下(放射化区域)に設置してあったが、放射化物減量の観点から、2013 年度に非放射化区域である冷却水設備室(1)及び加熱トレンチに移設した。

排気ガス処理システムの冷却水も本冷却水供給システムから供給されている。排気ガス処理システムは、LHD の実験及びメンテナンスを実施するためには必要不可欠の設備であるので、排気ガス処理システムを約1ヶ月に及ぶ本冷却水システムの点検期間を含み、通年にわたって連続運転を可能にするため、排気ガス処理システムに対する冷却水供給系を二重化し、本冷却水供給システムの点検期間を分散することで排気ガス処理システムの通年連続運転に対応できるシステムに改造を施した。

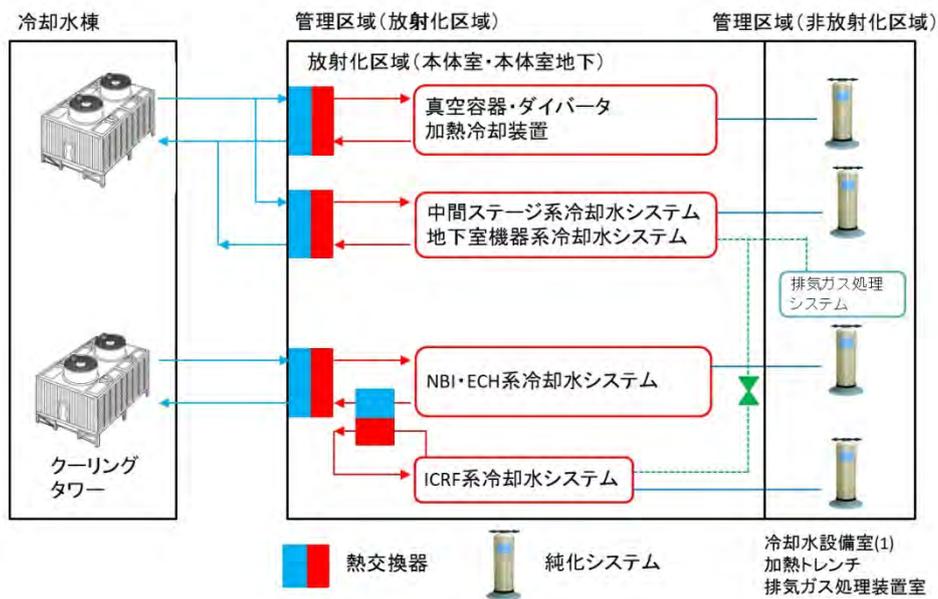


図 3.1.5-1 冷却水供給システム

## 3.2 加熱機器

### 3.2.1 中性粒子ビーム入射装置 (Neutral Beam Injector :NBI)

大型ヘリカル装置 (LHD) には、図 3.2.1-1 に示されるように負イオン源を用いた NBI(NBI#1-#3)が 3 台と正イオン源を用いた NBI(NBI#4, #5)が 2 台設置されており、それぞれ LHD のトラスプラズマに対し接線方向及び垂直方向にビームを入射している。軽水素プラズマ実験期である 2014 年度の LHD 第 18 実験サイクルまでは、負イオン源 NBI と正イオン源 NBI の最大ビームエネルギーは、それぞれ 190 keV と 40 keV であり、入射加熱電力はそれぞれ 5MW と 6MW で、NBI としては合計 27MW に達し、NBI は LHD における主力加熱装置である。

中性粒子ビームはイオン源で生成された正イオンあるいは負イオンを静電加速器により高エネルギービームにし、その後、中性化セルを通過させて中性粒子のビームに変換する。図 3.2.1-2 に示されるように、イオンビームを中性粒子ビームに変換する時の効率(中性化効率)が、正イオンビームと負イオンビームとでは、ビームエネルギーが 40keV(軽水素での値、重水素では 80keV)を超えた領域で大きく異なる[3.2.1-1]。正イオンを用いた場合は、この領域では中性化効率がエネルギー増加に伴い大きく減少するのに対して、負イオンビームを用いた場合には、この領域ではエネルギーに依存せず、60%程度でほぼ一定となる。中性化効率はビームの速度の関数であるため、重水素イオンビームの中性化効率は、重水素イオンのエネルギーが軽水素イオンのエネルギーの倍(質量比)のところ、軽水素イオ

ンビームの中性化効率と等しくなる。LHD の正イオン源 NBI は入射エネルギーが軽水素ビーム入射の時に 40keV であるので、重水素化した場合に入射エネルギーを 80keV に変更しても中性化効率は劣化しない。そこで、正イオン源 NBI である NB#4, #5 については、重水素実験において、入射エネルギーを高エネルギー化(NBI#4 は 40keV から 60keV、NBI#5 は 40keV から 80keV とした)することで入射電力を 6MW から 9MW に増加させる計画とした。一方、負イオン源 NBI は軽水素時の入射エネルギーにおいて既に DD 核融合反応の反応断面積が大きく、そのエネルギーを増加させることは中性子発生量の増加につながる。このため、中性子発生量を抑制する観点から、入射エネルギーは重水素時においては、安全管理計画に記載されているように 180keV とした。負イオン源については、負イオン生成における同位体効果により重水素ビーム時には性能の劣化が懸念されるが[3.2.1-2,3]、核融合科学研究所においては、重水素負イオンビーム生成に関する経験が無いため、素性が最もよく分かっている軽水素ビーム生成に対して最適化した条件で、第一年次の重水素実験を迎えることとした。

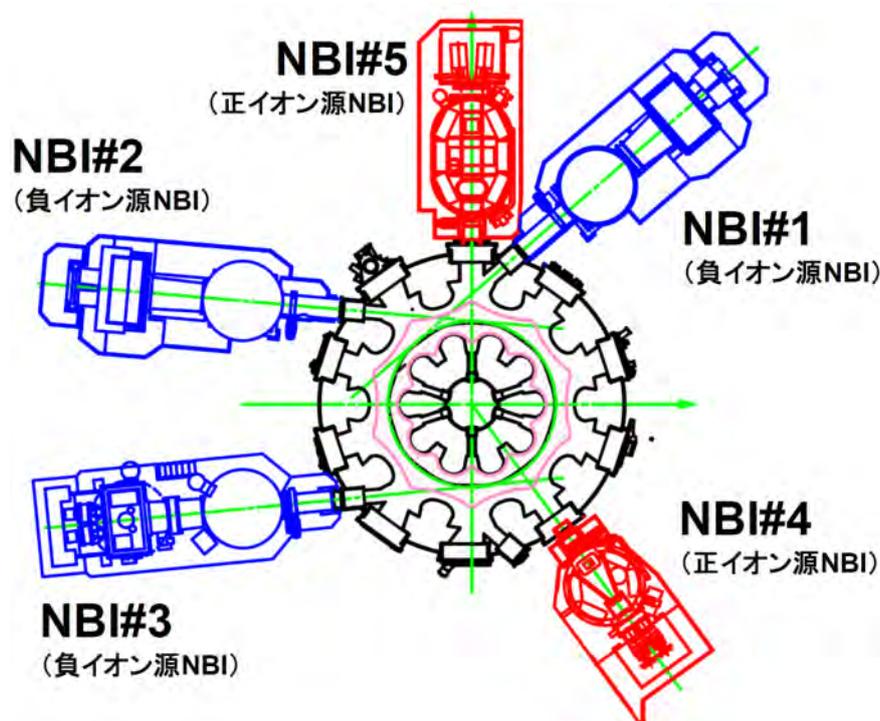


図 3.2.1-1 LHD における NBI の配置図

図 3.2.1-3 は、軽水素ビーム入射時及び重水素ビーム入射時の正イオン源 NBI (NBI#4 と NBI#5) のビーム入射電力 (ポート通過電力) の実績を示している。このように、最大ビームエネルギーを 40keV から 60keV (NBI#4) と 80keV (NBI#5) に引き上げることで、最大入射電力がそれぞれ 6MW と 9MW 以上に増加させることに成功した。なお、正イオン源 NBI では、イオン源プラズマの放電電力に対するビーム電流の水素、重水素の同位体効果による相違は見られなかった。

正イオン源 NBI とは異なり、負イオン源 NBI では、動作ガスを水素から重水素に切り替え

ることで、図 3.2.1-4 に示されるように次の3つの現象が発生した。①負イオン電流密度が 60～80%に低下した。②負イオンとともに引き出される電子電流の負イオン電流に対する割合が 1.2 倍程度増加した。③負イオン電流を増加させるために導入するセシウムの消費量が増加した。結果として、負イオン源 NBI による入射加熱電力は、重水素化することでほぼ半減した。これらと同様の現象は、水素同位体負イオン源における同位体効果として、世界的に観測されており、また、NBI の高性能化の障害となっているため、今後改善すべき課題である。現状では上記3つの現象の統一的な物理の理解が不十分であるため、NBI テストスタンドと LHD-NBI 実機において、軽水素及び重水素負イオン源プラズマに対して、負イオン密度等の計測を開始して、そのメカニズムの解明に取り組んでいる。さらに、JT-60U での重水素ビーム入射の経験を持つ量子科学技術研究開発機構の NBI グループ、ITER-NBI 用高周波駆動型重水素負イオン源での開発を長年行っているドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所の NBI 負イオン源グループ、及び ITER 用 NBI 試験施設建設しているイタリアの consorzio RFX グループと国際的なネットワークを構築することで、当該問題の解決に向けた共同研究を遂行している。

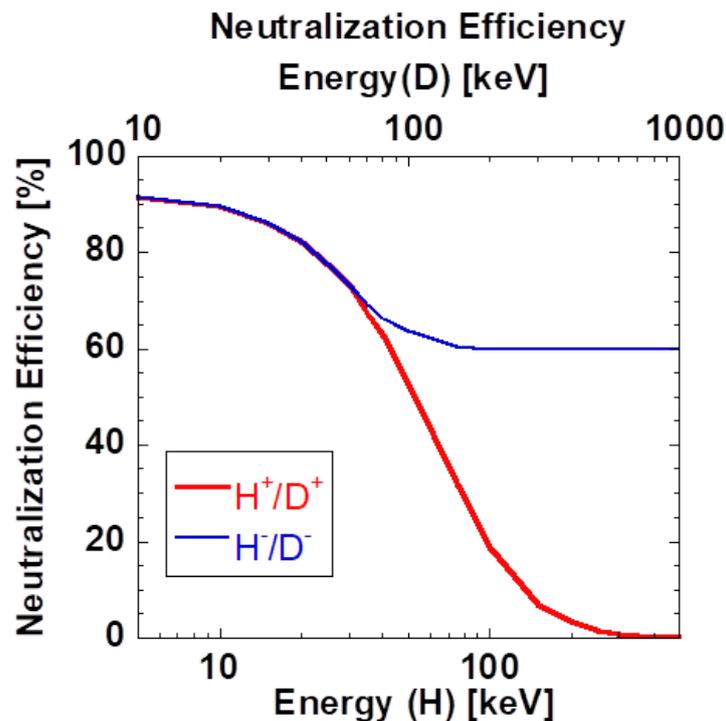


図 3.2.1-2 正イオンビームあるいは負イオンビームから中性粒子ビームへの変換効率。横軸(下)は軽水素イオンビームのエネルギー、横軸(上)は重水素イオンビームのエネルギー

NBI#1 の負イオン源には、イオン源のビーム加速系の接地電位に位置する電極(以下、接地電極)に対して円形多孔型電極(以下、多孔電極)ではなく、多数のスロット状の長孔を配置した電極(以下、多スロット型電極)が採用され、(a)接地電極に対する熱負荷の低減、(b)高いビーム安定度、(c)ビームコンディショニング時間の短縮化を実現している。重水素実

験においては、ビームコンディショニング期間中の本体室へのアクセスが著しく制限されること、それに伴うコンディショニング時間の短縮要請を考慮して、NBI#2 及び#3 に対しても多スロット型接地電極の導入を進めた。まずは、NBI#3 に対して、軽水素ビームを想定して他スロット接地電極の導入を、重水素実験が開始される前の 2015 年度に実施し、入射装置内でのビーム引き出し実験を行って良好なビーム特性を確認した。2016 年度末から 2017 年度 8 月末まで実際された LHD 第 19 実験サイクル(このうち、2017 年 3 月から 7 月の間に第一年次の重水素実験を実施)の際には、多スロット型接地電極を使用した負イオン源を用いて NBI#3 の運用を行い、実施のプラズマ実験において、ビーム安定性を含む良好なビーム性能を確認し、2018 年度より、NBI#2 の負イオン源に対して多スロット型接地電極を導入した。

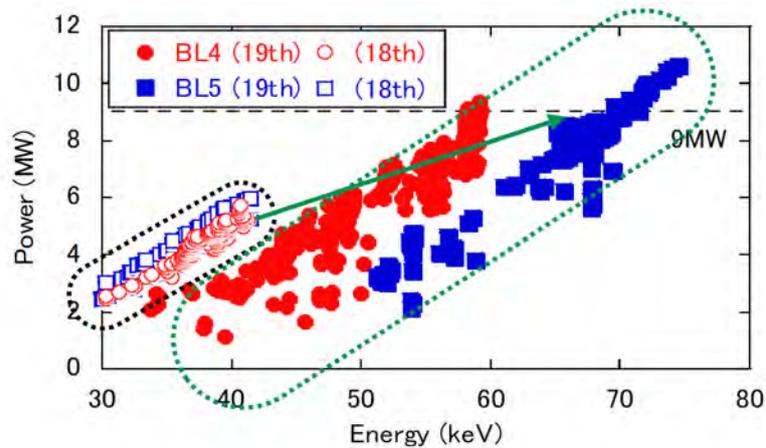


図 3.2.1-3 正イオン源 NBI における、ビームイオン種を軽水素から重水素に変更し、高エネルギー化したことによるビーム入射電力の増強

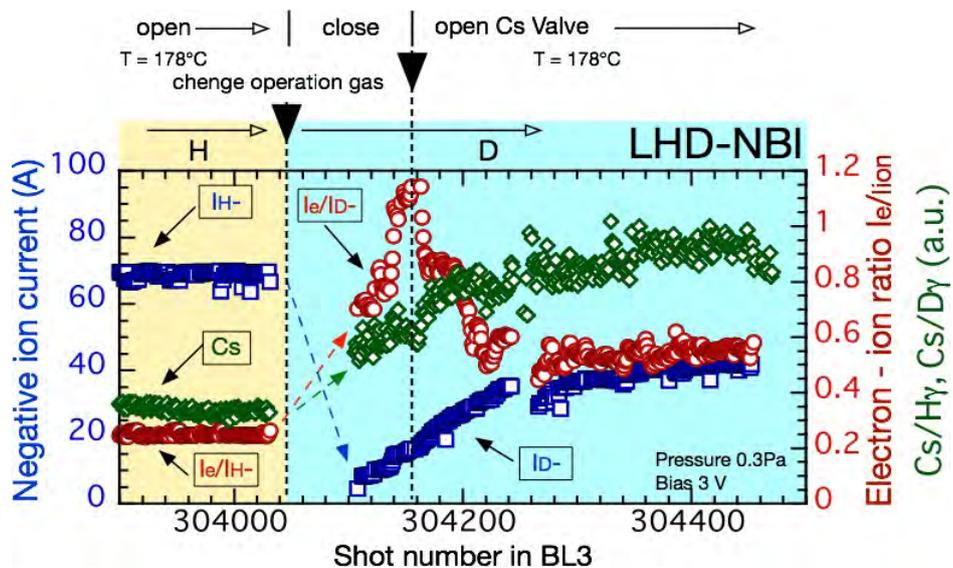


図 3.2.1-4 動作ガスを水素から重水素に切り替える際の負イオン電流( $I_{H^-}$ 、 $I_{D^-}$ :□)、電子・負イオン電流比( $I_e/I_{H^-}$  or  $I_e/I_{D^-}$ :○)、イオン源中のセシウム濃度(◇)の時間変化。

[3.2.1-1] K. H. Berkner, *et al.*, Nucl. Fusion, 15 (1975) 249

[3.2.1-2] T. Inoue, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 61 (1990) 496

[3.2.1-3] C. Wimmer, *et al.*, J Appl Phys., 120 (2016) 073301

### 3.2.2 電子サイクロトロン共鳴加熱装置(Electron Cyclotron Heating: ECH)

LHD においてプラズマ点火及び電子加熱のために用いられる ECH 装置は、2014 年度までに 5 本の大電力ジャイロトロンを備えたシステムとして整備された。ジャイロトロンの発振周波数は 3 本が 77GHz、2 本がその 2 倍の 154GHz であり、それぞれ磁場強度 2.75T の基本波周波数及び 2 倍高調波周波数となっている。発振出力はそれぞれ 1MW 以上であり、これら 5 本のジャイロトロン及び 2017 年度まで稼動していた 82.7GHz のジャイロトロンを用いて、LHD に入射される加熱電力は合計で 5.4MW に達している。

1 本のジャイロトロンにつき 1 系統の電力伝送路及び 1 セットの電力入射アンテナが必要である。5 本目の大電力ジャイロトロン整備に合わせ、それまでの 5.5-U 上部ポートに 2 セット、9.5-U 上部ポートに 2 セット、2-O 赤道面ポートに 2 セットのアンテナシステムから、加熱効率の改善を目的に、5.5-U 上部ポートに 2 セット(77GHz, 82.7GHz)、2-O 赤道面ポートに 4 セット(77GHz x2, 154GHz x2)のアンテナシステムへの改造を行った。赤道面ポートからの入射により加熱効率の向上とともに、加熱位置制御の正確化と自由度の高い電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD) が可能となった。2-O 赤道面ポートの 4 セットのアンテナシステムを図 3.2.2-1 に示す。

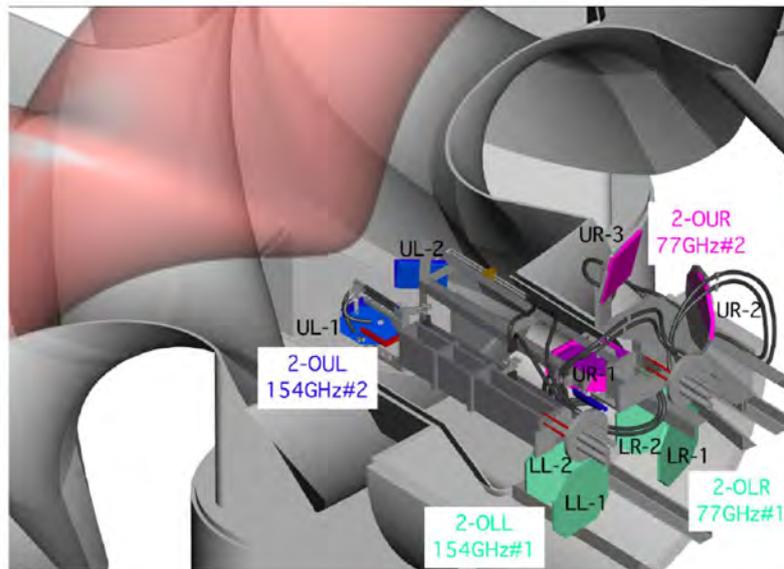


図 3.2.2-1 2-O 赤道面ポートの新たな ECH 電力入射アンテナシステム。従来の 2-OLR、2-OLL アンテナの上部に 2-OUR、2-OUL アンテナが設置された。

LHD においては、負イオン源 NBI 入射によるプラズマ立ち上げが可能であるが[3.2.2-1]、第一年次の重水素実験において、重水素ビームを使用した場合は、負イオン源 NBI 入射によるプラズマ立ち上げが困難であることが判明した。この原因としては、ビームの重水素化に

よる低速度化に伴って、LHD 真空容器内を周回する高エネルギー重水素イオンビームの荷電交換損失率が増加したこと、負イオン源 NBI における同位体効果によって当面の加熱電力が半減したこと起因していると考えている。負イオン源 NBI によるプラズマ立ち上げができなくなったため、軽水素実験期には可能であった非電子サイクロトロン共鳴磁場強度 (2.75T 近傍及び 1.375T 近傍以外の磁場強度) におけるプラズマ実験が純重水素プラズマでは不可能となった。LHD では 1T 近傍における高ベータ実験で H モード的な遷移現象が観測されており、トカマク型装置において同位体効果研究が進展している H モードとの比較研究を行う上で、1T 近傍の高ベータ実験の実施が重要である。そこで、1T 近傍における重水素プラズマ実験を可能とするために、2018 年度には 54.5GHz のジャイロトロンを、82.7GHz ジャイロトロンに替えて LHD 実験に用いるための整備を行った。2018 年度の ECH システムの概略図を図 3.2.2-2 に示す。54.5GHz のジャイロトロンは、かつて核融合科学研究所のサテライト装置である CHS において実験に用いられていたものである。この 54.5GHz ジャイロトロンの基本性能は、最大出力:450kW、最大パルス幅:100ms となっているが、大型装置である LHD における 2 次高調波電力によるプラズマスタートアップのためにはパルス幅が十分とは言えないため、更に 2019 年度(第 21 サイクル実験)以降のために最大出力:500kW、最大パルス幅:1s の 56GHz ジャイロトロン調達を進めている。

## Modification of ECH system of LHD from 2017 to 2018

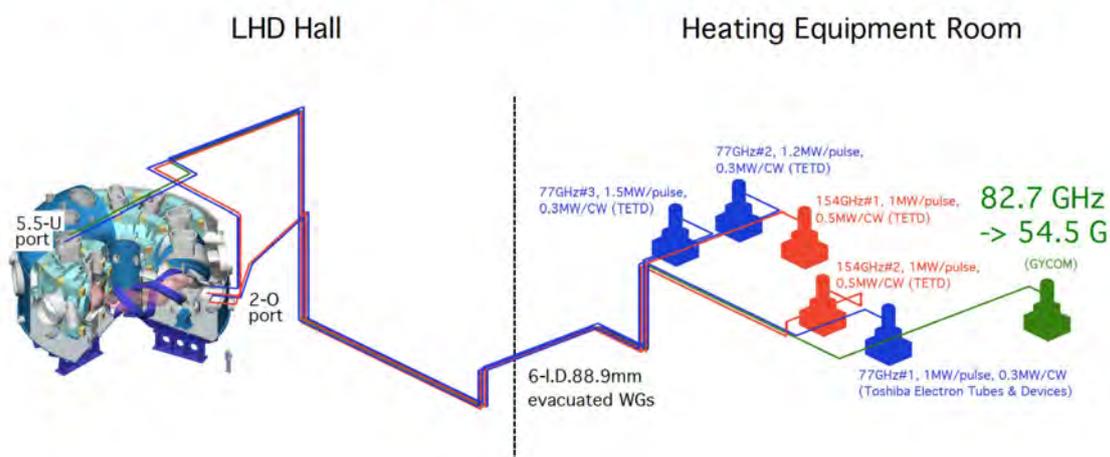


図 3.2.2-2 2018 年度 LHD 第 20 サイクル実験時における ECH システム全体の概略図。従来からの 77GHz ジャイロトロン 3 本、154GHz ジャイロトロン 2 本に加え、新たに 54.5GHz のジャイロトロンを 82.7GHz ジャイロトロンに替えて整備した。

また、LHD プラズマの更なる高性能化のために、ECH システムの更なる大電力化の準備を進めている。計画されている出力 1MW 以上の 6 本目の大電力ジャイロトロン導入に先行して、電力入射アンテナを設計・製作し、LHD の 9-O 赤道面ポートに設置した。適用周波数として 77GHz と 154GHz のどちらにも対応できる設計とし、77GHz の場合のプラズマ中心でのビーム半径は 65mm、154GHz の場合は 42mm となっている。3 枚のミラーから成るアン

テナの図を図 3.2.2-3 に示す。図中 M3 は凸面ミラー、M2 は収束ミラー、M1 は可動の平面ミラーである。M1 ミラーの角度調整により、2-O ポートの 4 系統のアンテナシステム同様、幅広い加熱位置制御性と ECCD 自由度を持つシステムとなっている。

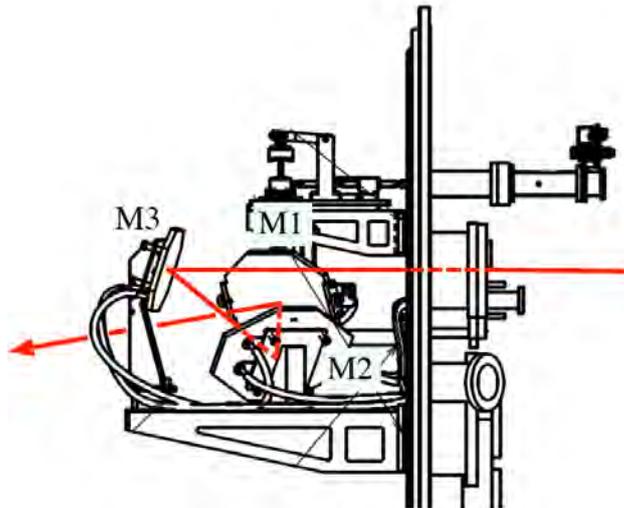


図 3.2.2-3 9-O 赤道面ポート内に設置された ECH 電力入射アンテナシステム。図の左側が LHD 真空容器内部、右側が大気側。入射ビームは人工ダイヤモンド製の真空窓を通して LHD に入射される。その経路を赤い矢印で示す。

### 3.2.3 イオンサイクロロン共鳴周波数帯加熱装置(Ion Cyclotron Range of Frequency: ICRF)

LHD におけるイオンサイクロロン共鳴周波数帯 (Ion Cyclotron Range of Frequency: ICRF) 加熱装置は、イオンサイクロロン周波数帯 (25~100MHz) の高周波波動によりプラズマの加熱等を行うための装置であり、その構成は、大電力高周波を発生させる発振器、高周波を発振器から LHD まで伝送する同軸管伝送路、プラズマへ高周波波動を入射するために LHD の真空容器内に設置されたアンテナ等である。

発振器は、単体あたり 1MW 以上のパルス出力及び 0.5MW 以上の定常発振が可能な大電力定常発振器6台が同時運転可能である。発振器の制御系を更新して運転時の監視を強化し、異常時の遮断速度を向上させるなど、安全に運転するための改良を進めている。

同軸管伝送路は、大電力定常伝送用の同軸管伝送路6系統が敷設されている。また、各伝送路には、大電力定常用に開発された液体スタブを用いたインピーダンス整合器を搭載している。伝送路の不具合をより早く見付けるため、伝送路異常検知器を開発し導入している。

加熱アンテナは、これまで3種類のアンテナを用い、最大3組6本を使用してきた。3.5-U&L ポートにはトロイダル方向に 2 つ並んだ HAS (HASu-Seigyo/HAnd Shake shape) アンテナ (図 3.2.3-1 (a))、4.5-U&L ポートにはポロイダル方向に 2 つ並んだ FAIT (Field-Aligned Impedance-Transforming) アンテナ (図 3.2.3-1 (b))、7.5-U&L ポートにはポロイダル方向に 2 つ並んだ PA (Poloidal Array) アンテナが設置された。各アンテナはそれぞれ同軸管伝送

路を通して各発振器に 1 対 1 に接続する。2018 年度現在は、全てのアンテナは取り外してあるが、随時復帰する予定である。このうち、PA アンテナは、LHD 実験の初期から使用してきたアンテナで、設計も古く損傷箇所も有るため、今後使用する予定はない。

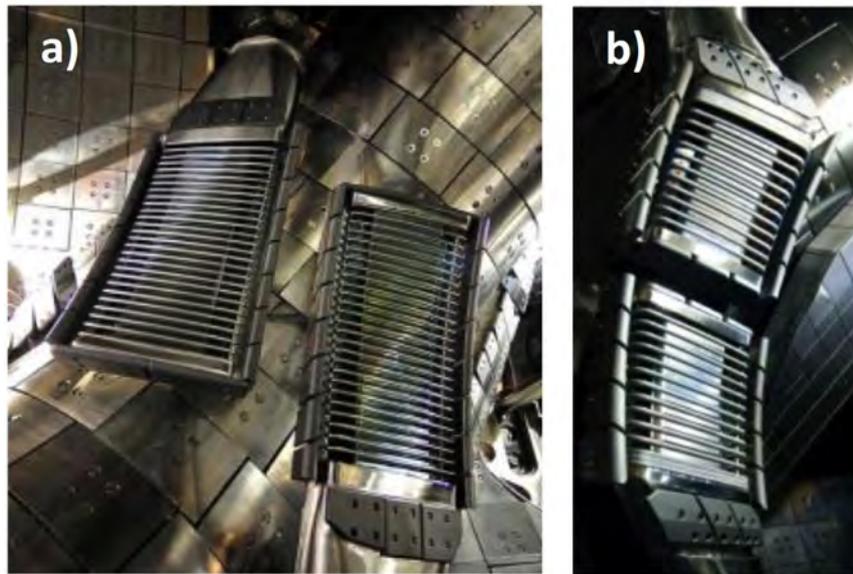


図 3.2.3-1 (a) HAS アンテナ (b) FAIT アンテナ

HAS アンテナは、トロイダル方向に並んだアンテナへの高周波電力の位相を変えることにより、放射される波動の磁力線方向の波数  $k_{\parallel}$  を変えることができるという特徴を持っている。実験により、 $(0, \pi)$  位相の時、加熱効率が他の位相より良いという結果が得られている。このアンテナの問題は、アンテナの負荷抵抗が低く、大電力を入射するためには伝送路の電圧が高くなることである。そこで、後述する FAIT アンテナと同様に内部インピーダンス変換器を組み込み、負荷抵抗の増大を図る予定である。



図 3.2.3-2 アンテナ断面模式図

FAIT アンテナは、アンテナヘッドが傾き電流ストラップが磁力線方向と直行 (Field-Aligned) していることと、内部インピーダンス変換器を搭載 (Impedance-Transforming) していることで特徴付けられる。Field-Aligned については HAS アンテナも同様である。図 3.2.3-2 に内部インピーダンス変換器の形状を示している。アンテナヘッドからセラミックフィードスルーの間の内導体の径を変えることによりインピーダンス変換を実現している。図 3.2.3-3 は HAS アンテナと FAIT アンテナの負荷抵抗を比較したものである。HAS アンテナの負荷抵抗 (白抜き赤丸) より内部インピーダンス変換器を搭載した FAIT アンテナの負荷抵抗 (白抜き青四角) の方が高い負荷抵抗が得られている。FAIT アンテナでは、図 3.2.3-2 のように外部

インピーダンス変換器(Ex-vessel Impedance Transformer: EVIT)を組み込み、更に伝送路電圧を下げて、伝送路の絶縁破壊のリスクを下げることを予定している。図 3.2.3-3 は、HAS アンテナで EVIT の有り(赤丸)と無し(白抜き赤丸)での負荷抵抗を比較したものである。EVIT により負荷抵抗が高められていることが分かる。これらの改造により、HAS アンテナ、FAIT アンテナともに内部インピーダンス変換器及び外部インピーダンス変換器を搭載することとなる。これらインピーダンス変換機の導入により、負荷抵抗の増大、ひいては加熱電力の増大が期待できる一方で、インピーダンス変換機は特定の周波数に最適化して設計されるため、現状では ICRF 実験は 38.47MHz における運転が制約条件となった。

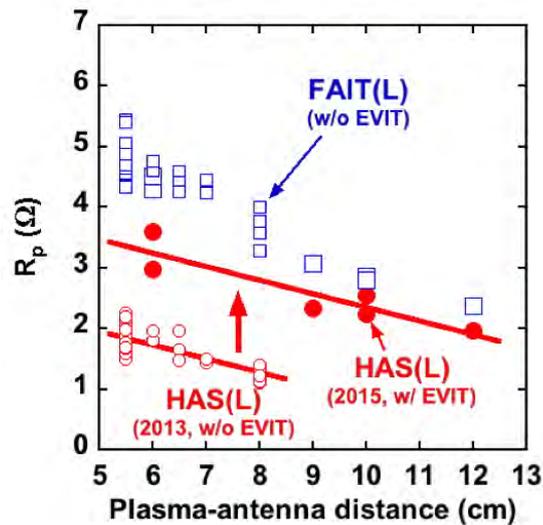


図 3.2.3-3 HAS 及び FAIT アンテナのプラズマ-アンテナ距離に対する負荷抵抗

以上のアンテナの負荷抵抗の増大による伝送路電圧の低減に加え、伝送路異常検知器の開発を行った。図 3.2.3-4 は伝送路を模式的に示したものである。発振器の出力からインピーダンス整合器までの 100m 以上の伝送路において異常を検知するものである。方向性結合器の入射  $V_i$ 、反射  $V_r$  及び伝送路の電圧プローブ  $V$  を用い、 $\Delta = V + \alpha V_i + \beta V_r$  において  $\alpha$ 、 $\beta$  を調整することにより  $\Delta = 0$  とすることができる。異常時には  $\Delta$  は 0 でなくなるため、伝送路の不具合が検知可能である。模擬信号でのテストを終え、実機に組み込んだところである。

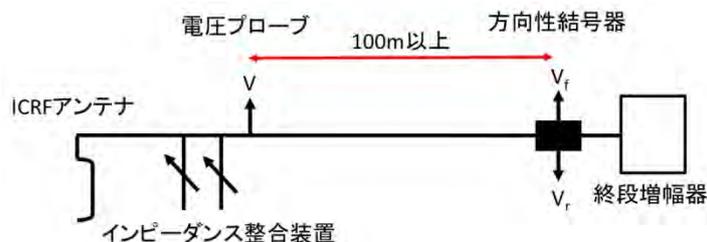


図 3.2.3-4 伝送路異常検出器模式図

LHDのICRF加熱装置は、実験の進展に伴って生じた問題に対して、その度に改良を重ねながら問題点を克服し技術を蓄積してきた。重水素実験に向けて、更に安全に実験を遂行できるよう整備を進めている。

### 3.3 計測機器

トムソン散乱計測や遠赤外線レーザー計測等の基幹計測機器については、LHD重水素実験を実施するに当たり、計測システムを大幅に変更することなく対応できるように計画の当初から配慮してきた。重水素実験の開始に当たり、中性子発生量管理において必須となる中性子フラックスモニタを整備し、さらに、高エネルギー粒子閉じ込め研究の拡大に向けて、垂直中性子カメラ、シンチレーティングファイバー検出器等を導入し、世界的に見ても充実度の高い中性子計測システムを整備した。重水素実験における重要な研究課題である、LHDにおける水素同位体効果について、特に閉じ込め・輸送特性への影響を明らかにするために、開発準備してきた高精度輸送計測機器群を設置し、プラズマ実験へ適用してきている。

本体室及び本体室地下に設置された計測機器には遮へいが必要であったことから、事前に、本体室及び本体室地下の放射線場を計算により評価した[3.3-1]。名古屋大学、京都大学等の施設を利用して電子機器等への照射試験を行い[3.3-2,3]、それらの結果を踏まえた遮へい対策を施した上で重水素実験に備えた。

[3.3-1] T. Nishitani et al., “Radiation field estimation for the Diagnostic and Control Components by Monte Carlo Neutronics Calculations with LHD 3-Dimensional Modeling”, Plasma and Fusion Research 11 (2016) 2405057.

[3.3-2] K. Ogawa et al., “Investigation of irradiation effects on highly integrated leading-edge electronics components of diagnostics and control systems for LHD deuterium operation”, Nuclear Fusion 57 (2017) 086012.

[3.3-3] K. Ogawa et al., “Effects of gamma-ray irradiation on electronic and non-electronic equipment of Large Helical Device”, Plasma Science and Technology 19 (2017) 025601.

#### 3.3.1 高エネルギー粒子計測

##### 3.3.1.1 中性子計測システム

LHD重水素実験における中性子発生量管理、及び高エネルギー粒子閉じ込め物理研究の拡大に向けて、重水素実験を象徴する機器の一つである中性子計測機器の整備を行った。ここでは整備した中性子計測機器ハードウェアを中心に記述し、高エネルギー粒子閉じ込め研究の成果については、「4.4.3 高エネルギー粒子閉じ込め」において詳述する。

(1) 中性子フラックスモニター(Neutron Flux Monitor:NFM)

中性粒子ビーム入射(NBI)加熱が行われる現行の核融合プラズマ実験で発生する中性

子は、主としてビーム-プラズマ反応に由来する中性子が支配的である。事前の評価において、LHDでは、フルパワーでNBI加熱を行った放電において最大で  $1 \times 10^{16}$  (n/s) を越える総中性子発生率が予想された[3.3.1.1-1]。また、LHDには全部で5機のNBIが装備されており、NBIの入射パターンに応じて総中性子発生率が何桁も変わりうることに加え、ヘリカルリップル捕提高エネルギー粒子励起抵抗性交換型不安定性(所謂、EICモード)[3.3.1.1-2]に代表される高エネルギー粒子励起MHD不安定性により、総中性子発生率が短い時間で大きく変化することが予想された。これらを背景に、広いダイナミックレンジと高速時間応答性能を併せ持つ中性子フラックスモニター(NFM)を提案し、プロトタイプ等の製作・試験等を行った開発フェーズを経て、実機を整備した[3.3.1.1-3~6]。

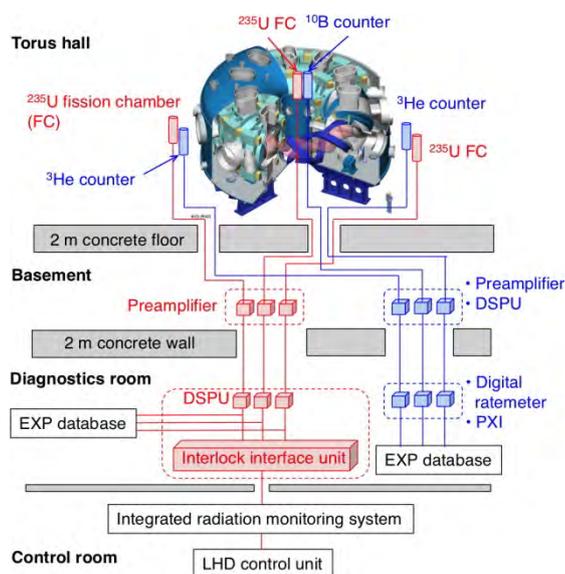


図 3.3.1.1-1 LHD重水素実験に向けて整備した中性子フラックスモニター

LHDのNFMは、中・高中性子発生率放電用にフィッションチェンバー(FC)、前置増幅器、及び最新のデジタル信号処理技術に基づく信号処理ユニットから成るシステム、低中性子発生率放電用にはFCに比して熱中性子に対し高い感度を有する $^{10}\text{B}$ 計数管或いは $^3\text{He}$ 比例計数管、前置増幅器、及びデジタル信号処理ユニットから成るシステムの2系統で構成される。この2系統を1セットとして、計3セットをLHDへ実装した。FC系の信号処理ユニットには、パルスモードとキャンベルモードを併用した信号処理方法を採用したことにより、FC系統単体でパルス計数率において $5 \times 10^9$  (cps)の広ダイナミックレンジを実現した。これに、 $^{10}\text{B}/^3\text{He}$ 系統を加えると、10桁を大幅に越えるダイナミックレンジを有するシステムとなっている。LHDにおけるNFMの配置概要図を図 3.3.1.1-1 に示す。中性子発生量の管理は、FC系統が担う。NFMの設計検討を行うに当たり、LHD近傍における中性子束、中性子エネルギー分布等の中性子場の評価が必要であったことから、名古屋大学との共同研究に基づいて3次元モンテカルロコードMCNPにより中性子場を評価するとともに[3.3.1.1-7~10]、クロスチェックの意味も兼ねて核融合科学研究所においても同様に実施した[3.3.1.1-11,12]。

NFMから出力されるパルスの計数率から総中性子発生率を得るために、中性子発生率

が既知の校正用中性子源を用いて、2016年11月にNFMのその場絶対校正を行った。LHDでは、1989年8月にプリンストンプラズマ物理研究所で開催された中性子校正ワークショップにて出された指針に従って[3.3.1.1-13]、校正用中性子源を連続的に磁気軸上を周回移動させることでリング状のプラズマ中性子源を模擬することにより、NFMその場校正を実施した[3.3.1.1-5]。その場校正実験は、LHD真空容器内にレールを敷設し、校正用中性子源を搭載した模型列車を走行させることにより行った。図 3.3.1.1-2 に、真空容器内に敷設されたレールの様子、及びその場校正実験時における制御室の様子を示す。

このNFMは、重水素実験第1年次において、極めて安定した形で稼働し、中性子発生量管理、及び高エネルギー粒子閉じ込め研究において重要な役割を果たした。



図 3.3.1.1-2 2016年11月に実施したNFMその場校正の様子。(左図)LHD真空容器内に敷設されたレール、(右図)NFMその場校正実験時における制御室の様子

## (2) 中性子放射化箔システム (Neutron Activation System: NAS)

中性子発生量管理は、その場校正されたNFMにおいて行うが、中性子発生量管理における補助的な機器として中性子放射化箔システム(NAS)を導入した[3.3.1.1-5,14]。放射化箔測定の場合、測定される中性子フルエンスは放電中の積算値であり、中性子発生量の時間変化が分からないという欠点があるが、ガンマ線に対しては絶対不感であり、照射端での中性子フルエンスの絶対測定が可能であることから、放射化箔測定はNFMのクロスチェックに極めて有効である。

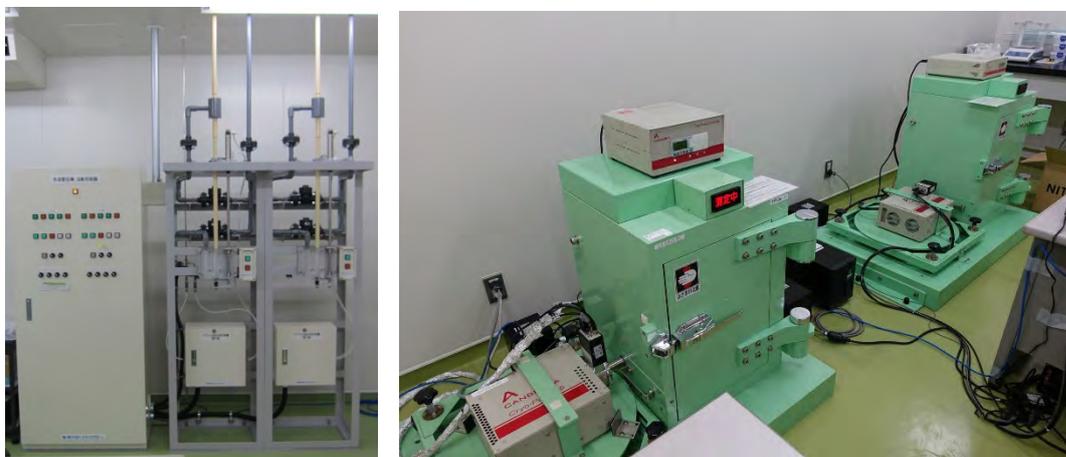


図 3.3.1.1-3 放射化箔システムのカプセル射出・回収装置(左図)、及びHPGe半導体検出器2台

照射端を8-Oポート及び2.5-Lポートの2箇所を用意し、放射化箔を搭載したカプセルを、放電開始前に気送管を通じて大型ヘリカル実験棟地下1階の測定室(1)からLHDプラズマ近傍の照射端へと送り込む。放電終了後、カプセルは、測定室(1)へと送り戻され、同室に整備した高純度ゲルマニウム(HPGe)半導体検出器により金属箔からのガンマ線を測定することで、照射位置における中性子フルエンスを評価する。図 3.3.1.1-3 に放射化箔を搭載したカプセルを射出・回収する装置、及びHPGe半導体検出器を示す。2.5 MeV中性子に対しては通常インジウム箔を使用している。中性子エネルギーに対して閾値を有するアルミニウム等の金属箔を用いることにより、二次的な核融合反応の結果生ずる14MeV中性子を選択的に測定することもでき、1 MeVトリトンの挙動研究においてもNASは大いに貢献している。

### (3) 垂直中性子カメラ(Vertical Neutron Camera: VNC)

NFM、NASに加え、垂直中性子カメラ(VNC)についても重水素実験第1年次より稼働している。LHDにおいて発生する中性子は、ビーム-プラズマ反応に由来する中性子が支配的であることから、VNCにより、ビームイオンの径方向分布情報を得ることができる。中性子コリメータには、MCNP計算による設計を基に、2.5-Lポート下の2 m厚コンクリート床開口部に、重量コンクリートを埋め込み、重量コンクリート中に埋め込まれた直円筒コリメータ(長さ1.5 m、直径3 cm)を採用した。NFMその場較正実験の期間中に、VNCのクロストーク性能評価も併せて行い、隣り合う直円筒コリメータ間のクロストークは1%以下であることを実験的に示した[3.3.1.1-15]。検出器は、プラズマとは反対側の中性子コリメータ端、すなわち、本体室地下に設置した。検出器には、高速中性子に対してのみ感度を有し、優れた中性子-ガンマ線弁別性能を持つスチルベンシンチレーション検出器を採用した。中性子-ガンマ線の弁別には、オンラインで自動弁別可能なFPGAを採用したデジタル信号処理ユニットを新たに開発し、短い時間で中性子発生率が大きく変動しうる核融合プラズマ実験に最適化したMHz帯で動作するシステムとして整備した[3.3.1.1-16,17]。本VNCの全体像を図 3.3.1.1-4 に示す。

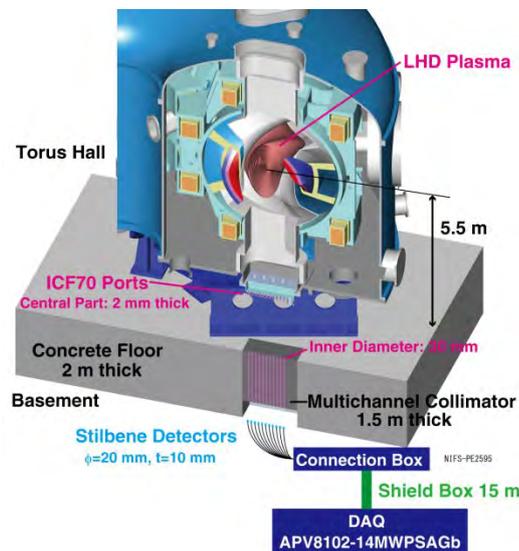


図 3.3.1.1-4 2.5-L ポート下に整備した垂直中性子カメラ

このVNCは、重水素実験第1年次において、ヘリカルリップル捕提高エネルギー粒子に励起されたEICモードバーストに伴い、モードの励起要因であるヘリカルリップル捕提高エネルギー粒子が損失する様子を明瞭な形で示し[3.3.1.1-18,19]、高エネルギー粒子閉じ込め研究の拡大に大きな貢献を果たしている。なお、2.5-L下に設置されたVNCは、総中性子発生率において $1 \times 10^{16}$  (n/s) 近傍の放電を対象に最適化している。より低い総中性子発生率放電において、より高い精度で中性子発生分布測定を行えるよう、2.5-LのVNCに比して、空間分解能においては若干劣るが、検出効率において優れたVNCを重水素実験第2年次から1.5-Lポート下に新規投入し、既に初期データを得ている。

#### (4) シンチレーティングファイバー検出器

重水素プラズマ中においては、核融合反応の結果、1MeVのエネルギーを持つトリトンが生成される。1MeVトリトンのごく一部は、減速過程において二次的な反応を起こし、僅かながらも14MeV中性子が生成される。1MeVトリトンは速度分布において等方的であり、加えて、そのラーマー半径や捕捉粒子軌道を描いた際の歳差ドリフト周波数等の運動パラメータは、将来の核融合炉におけるアルファ粒子のそれに近いことから、1MeVトリトンはアルファ粒子の模擬粒子として位置付けることができ、圧倒的多数の2.5MeVの中から14MeV中性子を選択的に測定することにより、アルファ粒子の閉じ込めを推定することができる。

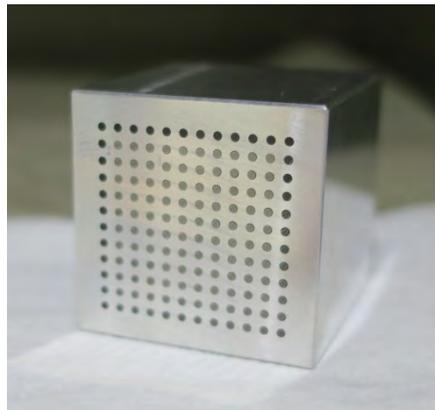


図 3.3.1.1-5 富山高等専門学校との共同研究により開発されたSci-Fi検出器

LHDでは、1MeVトリトンの閉じ込め研究の実施に向けて、14MeV中性子フラックスの時間発展を追跡可能な複数のシンチレーティングファイバー (Sci-Fi) 検出器を整備した。富山高等専門学校との共同研究として開発した検出器のSci-Fi部を図 3.3.1.1-5 に示す[3.3.1.1-20]。Sci-Fi方式を採用した高速中性子検出器では、ガンマ線起因による信号を微弱化できることに加え、前方に反跳した陽子を作るパルスが支配的になることから、高いパルス波高を有するパルスを検出することにより、14MeV中性子を選択的に測定することができる。LHDでは、核融合科学研究所で開発した検出器、米国ロスアラモス国立研究所で開発された検出器、及び富山高等専門学校との共同研究により開発した検出器を設置し、ヘリカル装置において世界で初めてとなるトリトンの閉じ込め研究を行い、LHDにおいてMeV領域の高エネルギーイオンの閉じ込めを実証した。[3.3.1.1-21~24]

## (5)その他

重水素実験第1年次の開始前に、プラスチックシンチレーション検出器を整備し、中性子揺動測定を行った結果、NFMでは追跡が困難なMHD不安定性に伴う中性子発生率の急激な減少を捉えるなど、所期の実験データを得ることができた[3.3.1.1-25]。また、将来のイオンサイクロロン共鳴波加熱実験に備え、重水素実験第2年次の開始前に、中性子エネルギー spektrometa (NES) の整備に着手した。このNESは、国際学術交流協定に基づき、北京大学との共同研究として進めている。

- [3.3.1.1-1] M. Osakabe et al., “Current status of Large Helical Device and its prospect for deuterium experiment”, *Fusion Science and Technology* 72 (2017) 199
- [3.3.1.1-2] X.D. Du et al., “Resistive interchange modes destabilized by helically trapped energetic ions in a helical plasma”, *Physical Review Letters* 114 (2015) 155003.
- [3.3.1.1-3] M. Isobe et al., “Fusion product diagnostics planned for Large Helical Device deuterium experiment”, *Review of Scientific Instruments* 81 (2010) 10D310.
- [3.3.1.1-4] M. Isobe et al., “Wide dynamic range neutron flux monitor having fast time response for the Large Helical Device”, *Review of Scientific Instruments* 85 (2014) 11E114.
- [3.3.1.1-5] M. Isobe et al., “Neutron diagnostics in the Large Helical Device”, *IEEE Transactions on Plasma Science* 46 (2018) 2050.
- [3.3.1.1-6] M. Isobe et al., “Fusion neutron production with deuterium neutral beam injection and enhancement of energetic-particle physics study in the large helical device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 082004.
- [3.3.1.1-7] N. Nishio et al., “A study on the neutron monitoring system of LHD based on Monte Carlo simulations”, *Review of Scientific Instruments* 81 (2010) 10D306.
- [3.3.1.1-8] N. Nishio et al., “Study on the Calibration of LHD Neutron Monitoring System”, *Plasma and Fusion Research* 6 (2011) 2405115.
- [3.3.1.1-9] Y. Nakano et al., “Study on in situ calibration for neutron flux monitor in the Large Helical Device based on Monte Carlo calculations”, *Review of Scientific Instruments* 85 (2014) 11E116.
- [3.3.1.1-10] Y. Nakano et al., “Study on In-Situ Calibration for Neutron Monitor in the Helical Type Fusion Experimental Device Based on Monte Carlo Calculations”, *Plasma and Fusion Research* 9 (2014) 3405141.
- [3.3.1.1-11] T. Nishitani et al., “Monte Carlo simulation of the neutron measurement for the Large Helical Device deuterium experiments”, *Fusion Engineering and Design* 123 (2017) 1020.
- [3.3.1.1-12] T. Nishitani et al., “Calibration experiment and the neutronics analyses on the LHD neutron flux monitors for the deuterium plasma experiment”, *Fusion*

- Engineering and Design 136 (2018) 210.
- [3.3.1.1-13] J.D. Strachan et al., “Neutron calibration techniques for comparison of tokamak results”, *Review of Scientific Instruments* 61 (1990) 3501.
- [3.3.1.1-14] N. Pu et al., “In situ calibration of neutron activation system on the large helical device”, *Review of Scientific Instruments* 88 (2017) 113302.
- [3.3.1.1-15] H. Kawase et al., “Evaluation of spatial resolution of neutron profile monitor in LHD”, accepted for publication in *IEEE Transactions on Plasma Science*.
- [3.3.1.1-16] K. Ogawa et al., “Progress in development of the neutron profile monitor for the large helical device”, *Review of Scientific Instruments* 85 (2014) 11E110.
- [3.3.1.1-17] K. Ogawa et al., “The LHD Vertical Neutron Camera Operating over a MHz Counting Rate Range”, accepted for publication in *Review of Scientific Instruments*.
- [3.3.1.1-18] K. Ogawa et al., “Observation of enhanced radial transport of energetic ion due to energetic particle mode destabilized by helically-trapped energetic ion in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 044001.
- [3.3.1.1-19] K. Ogawa et al., “Effect of the helically trapped energetic-ion-driven resistive interchange modes on energetic ion confinement in the Large Helical Device”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 60 (2018) 044005.
- [3.3.1.1-20] E. Takada et al., “Design Optimization of Fast Neutron Detector with Scintillating Fibers for Triton Burnup Experiment at Fusion Experimental Devices”, submitted to *Review of Scientific Instruments*.
- [3.3.1.1-21] K. Ogawa et al., “Time-resolved triton burnup measurement using the scintillating fiber detector in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 034022.
- [3.3.1.1-22] K. Ogawa et al., “Time dependent neutron emission rate analysis for neutral-beam-heated deuterium plasmas in a helical system and tokamaks”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 60 (2018) 095010.
- [3.3.1.1-23] K. Ogawa et al., “High Detection Efficiency Scintillating Fiber Detector for Time-Resolved Measurement of Triton Burnup 14 MeV Neutron in Deuterium Plasma Experiment”, *Review of Scientific Instruments* 89 (2018) 101101.
- [3.3.1.1-24] N. Pu et al., “Scintillating fiber detectors for time evolution measurement of the triton burnup on the Large Helical Device”, *Review of Scientific Instruments* 89 (2018) 101105.
- [3.3.1.1-25] K. Ogawa et al., “Neutron flux measurement using a fast-neutron scintillation detector with high temporal resolution on the Large Helical Device”, *Plasma and Fusion Research* 13 (2018) 3402068.

### 3.3.1.2 その他の高エネルギー粒子計測システム

LHD重水素実験では、ヘリカル磁場中での高エネルギー粒子の振る舞いを研究する目的で、炉心プラズマでのアルファ粒子を対象としたシミュレーション実験の遂行を重点ミッションの一つとして位置付けている。LHDの軽水素実験期において高エネルギー粒子の挙動研究に大きな役割を果たしたシンチレータ型損失高エネルギー粒子プローブ及びE//B型中性粒子分析器 [3.3.1.2-1]については、遮へい等の対策を施した上で、引き続き使用するとともに、重水素実験第2年次からは新たにCVDダイヤモンド検出器アレイを導入した。高エネルギー粒子荷電交換分光計測、通称FIDAについては、同手法の発案者であるカリフォルニア大学アーバイン校のWilliam W. Heidbrink教授を客員教授として2018年に招聘し、その解析コードの高度化を図っている。これらの機器と前節で述べた中性子計測機器と組み合わせることで、LHDにおける高エネルギー粒子挙動の全体像を明らかにする。

#### (1) シンチレータ型損失高エネルギー粒子プローブ (Scintillation Lost Ion Probe: SLIP)

シンチレータ型損失高エネルギー粒子プローブ (SLIP) の開発は、これまで日米科学技術協力事業の枠組みの下、プリンストンプラズマ物理研究所 (Princeton Plasma Physics Lab.: PPPL) との共同研究として進めてきた [3.3.1.2-2,3]。

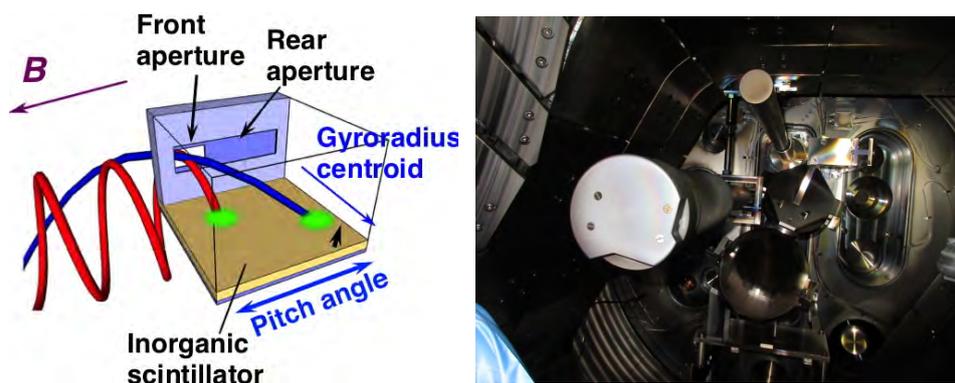


図 3.3.1.2-1 シンチレータ型損失高エネルギー粒子プローブ (SLIP) の高エネルギーイオン検出原理概念図(左図)、及びLHD真空容器内におけるSLIPヘッドセクションの様子(右図)

図 3.3.1.2-1(左)に SLIP の検出概念図と LHD 真空容器内における SLIP 検出器の様子を示す。SLIPは、真空容器内に存在する磁力線を利用した磁気スペクトロメータとして機能する。SLIPでは、荷電粒子用シンチレータが金属ボックスの底に設置され、ボックスの一側面にラーマー半径の大きな高エネルギーイオンのみが通過できるアパチャーが設けられている。エネルギーが比較的低い高エネルギーイオンは、アパチャー近くのシンチレータ板に衝突する一方、エネルギーの高いイオンはアパチャーから遠方に衝突する。また、高エネルギーイオンは、ピッチ角に応じて、2つのアパチャーの中心を結ぶ線に対して垂直方向に分散することから、高エネルギーイオンの衝突によるシンチレータ板上の2次元発光分布を測定することにより、SLIPに到達した損失高エネルギーイオンのエネルギー及びピッチ角の時間変化を同時に測定することができる。さらに、その情報を基に、粒子軌道計算から検出

した高エネルギーイオンがプラズマ中のどの位置を通過してきたのか等についても把握することができる。現状、LHDに装備されているSLIPは1台であり、今後、同プローブの多チャンネル化を計画している。これにより、損失高エネルギーイオン束の空間分布を測定し、シミュレーションで予測されるそれと合致するかについて調べるとともに、MHD不安定性による損失位置の違い、あるいは共鳴擾動磁場印加時における損失位置の違い等について精査し、将来の核融合炉に外挿できる高エネルギー粒子の閉じ込めに係る研究を推進する。

## (2)ダイヤモンド検出器

高エネルギー粒子を対象とする研究において、中性粒子分析器(NPA)は、核融合プラズマ実験における基本計測機器に位置付けられる。軽水素実験期においては、シリコン半導体検出器に基づくNPAアレイを用いていたが [3.3.1.2-4]、同検出器は耐放射線性の点で脆弱であることが知られており、重水素実験に向けて耐放射線性に優れ、コンパクトな固体NPAの整備が急務となっていた。近年の技術開発の進展に伴い、エネルギー分解能に優れ、性能において安定したCVDダイヤモンドが製造できるようになり、その結果として、CVDダイヤモンド検出器が市販されるようになった(図 3.3.1.2-2)。ダイヤモンドは耐放射線性に優れていることに加え、MeV領域の高速中性粒子のエネルギー分布の測定が可能である。今後予定しているイオンサイクロトロン共鳴波加熱実験への適用も視野に入れる形で、重水素実験第2年次から 1.5-L ポートにCVDダイヤモンド検出器を投入し、ヘリカルリップル捕捉粒子の閉じ込め研究を行うべく、現在機器の調整を進めている。また、TASK3D-aを用いたシミュレーション解析との比較も進行中である[3.3.1.2-5]。



図 3.3.1.2-2 LHD重水素実験に新たに導入されたシングルクリスタルCVDダイヤモンド検出器

## (3)E//B型中性粒子分析器

E//B型中性粒子分析器(E//B-NPA)は、PPPLで開発され、核融合プラズマ研究に広く用いられてきた。E//B-NPAは、軽水素、重水素、三重水素のエネルギー分布をイオン種ごとに計測することができる。高エネルギー粒子と高エネルギー粒子励起MHD不安定性の相互作用に係る研究を行う上で、時間分解能と検出効率の向上が求められるため、これを目的とする開発を行った。重水素実験第2年次からの本格稼働に向けて、現在機器の調整を進めている。

#### (4) 高速イオン荷電交換分光計測 (Fast-Ion Charge eXchange Spectroscopy: FICXS/ Fast-Ion D-Alpha :FIDA)

プラズマ中の高エネルギーイオンのエネルギー及び空間分布測定を、水素同位体イオン ( $H^+$ あるいは  $D^+$ )が NBI によって入射された高エネルギーの水素同位体中性粒子( $H^0$ あるいは  $D^0$ )と荷電交換反応を起こす際に発生するドップラーシフトしたライマン  $\alpha$  光の分光計測を通して行う高エネルギーイオンの計測を、FIDA (Fast-Ion D-Alpha) 計測あるいは FICXS (Fast-Ion Charge eXchange Spectroscopy)計測と呼ぶ。LHD では、軽水素実験期より  $H\alpha$  光を利用した同計測[3.3.1.2-6,7]を進めてきたが、重水素実験期には FIDA 計測による高エネルギーイオンの空間分布測定を強化する。3.3.1.1 節で述べた垂直中性子カメラは、核融合反応断面積の関係からエネルギーの高いイオンに重点を置いた形の空間分布を提供する。一方、FIDA は荷電交換反応を利用するため比較的中・低速の高エネルギーイオンの計測が可能である。よって、両システムを相補的に利用することで、コア部の高エネルギーイオンの閉じ込めの情報を広い速度空間にわたって引き出すことが可能となる。この分光計測結果を解析するためには、解析コードの整備が必要であり、同手法の発案者であるカリフォルニア大学アーバイン校のWilliam W. Heidbrink教授を客員教授として2018年に招聘し、解析コードFIDASIMの三次元磁場配位への適応を図っている。

[3.3.1.2-1] M. Isobe et al., “Fast-particle diagnostics on LHD”, Fusion Science and Technology 58 (2010) 426.

[3.3.1.2-2] M. Isobe et al., “Escaping fast ion diagnostics in compact helical system heliotron/torsatron”, Review of Scientific Instruments, 70 (1999) 827.

[3.3.1.2-3] K. Ogawa et al., “Installation of bidirectional lost fast-ion probe in the Large Helical Device”, Journal of Plasma Fusion Research SERIES 8 (2009) 655.

[3.3.1.2-4] M. Osakabe et al., “Development and energy calibration of Si-FNA for LHD fast ion measurement”, Review of Scientific Instruments 72 (2001) 788.

[3.3.1.2-5] H. Nuga et al., “Validation of the Fokker-Planck analysis for NB Blip experiment on LHD”, 2017 Proc. 44th EPS Conference on Plasma Physics P1. 146.

[3.3.1.2-6] M. Osakabe et al., “Fast ion charge exchange spectroscopy measurement using a radially injected neutral beam on the large helical device”, Review of Scientific Instruments 79 (2008) 10E519.

[3.3.1.2-7] T. Ito et al., “Fast ion charge exchange spectroscopy adapted for tangential viewing geometry in LHD”, Review of Scientific Instruments 81 (2010) 10D327.

### 3.3.2 高精度輸送・揺動計測

重水素実験では、同位体効果の検証が重要な研究課題である。特に、同位体効果の輸送への影響について調査するため、1)水素と重水素との混合比(H/D 比)計測、2)高い時間

分解能を持ったトムソン散乱計測、3)乱流揺動計測の整備を進めた。以下にこれらについて詳述する。

### 3.3.2.1 H/D 比計測

#### (1)バルク荷電交換分光法

単一同位体プラズマ(純水素(H)又は純重水素(D)のプラズマ)では、イオン粒子輸送は準中性化条件により電子粒子輸送に束縛されている。従って、粒子輸送における同位体効果を正しく理解するためには、異なる同位体イオンがそれぞれの自由度を持つ同位体混合プラズマで研究を行う必要がある。水素・重水素同位体比の空間分布を測定する新しい手法としてバルク荷電交換分光法をLHDに導入した。

バルク電荷交換分光システムは、バルクイオンと中性粒子ビームとの間の荷電交換反応によって放出された $H\alpha$ 及び $D\alpha$ 線の強度から、プラズマ中の水素及び重水素のイオン密度の空間分布を測定するものである。中性粒子ビームとの荷電交換反応に起因する高温成分に比べ、プラズマ周辺部において放出される低温成分は1桁程度大きい。そこで、荷電交換ラインの低温成分をできるだけ減らすためにビーム変調を行っている。図3.3.2.1-1(a)にバルク荷電交換分光法で測定したスペクトルを示す。荷電交換ラインの低温成分の大部分はビーム変調によって差し引かれるが、引き算のスペクトルにおいても高温成分に匹敵する低温成分が依然として存在する。観測した荷電交換スペクトルを4つ(水素と重水素の低温成分・高温成分)のガウス分布の重ね合わせで再現した。水素と重水素の高温成分の強度とビーム密度から水素と重水素の密度の空間分布を計算したものが図3.3.2.1-1(b)である。水素イオン密度はピークしているが、重水素密度は比較的平坦である。水素密度のピークは水素中性ビームのビーム燃料供給によるものである。

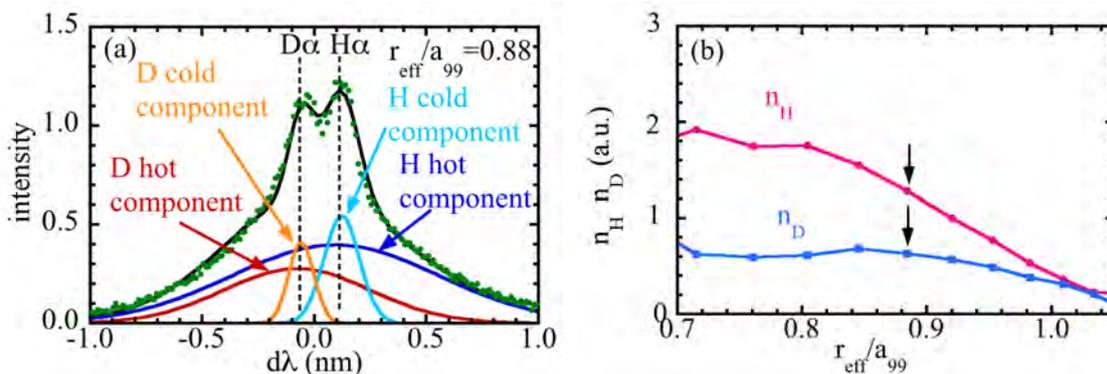


図 3.3.2.1-1 (a)バルク荷電交換分光器で観測したスペクトルと(b)水素密度と重水素密度の空間分布

同様のバルク電荷交換分光システムをドイツのマックスプランク物理研究所と核融合科学研究所の国際協力の下、Wendelstein 7-X (W7-X) に設置した。将来の W7-X 重水素実験において、D-H 混合プラズマ中の水素及び重水素密度分布の測定から、水素と重水素のイオン粒子輸送の差異を調べる予定である。また、これは将来の融合プラズマにおける重水素及びトリチウムイオン粒子輸送の差を予想する際に極めて重要なデータとなる。

## (2) 受動的 $H\alpha \cdot D\alpha$ 分光計測

燃料として水素と重水素を用いた時のプラズマの特性の違いを調べることは LHD 研究の目的の一つとなっており、各放電でのプラズマ中の水素/重水素のイオン構成比の計測は重要である。

LHD ではプラズマ周辺部で発生される水素原子及び重水素原子からのバルマー  $\alpha$  線強度を計測し、その比をプラズマ中の水素/重水素イオン比とみなしている。従って、実際には計測値は周辺からプラズマ中への原子のインフラックスの比と解釈した方がより正確であるが、両者のプラズマ中での輸送特性が等しければ、イオン比と考えて差し支えない。同時に計測を行っているバルク荷電交換計測はプラズマ中のイオン比を計測するものであるため、もし両結果に違いがあれば、水素原子と重水素原子の輸送が異なることを示す直接的指標となる。

水素原子と重水素原子のバルマー  $\alpha$  線の波長の違いは 0.2nm 程度であり、干渉フィルターにより分離することは難しく、LHD では分光器によるスペクトル計測を行い、両発光線を分離して計測している。

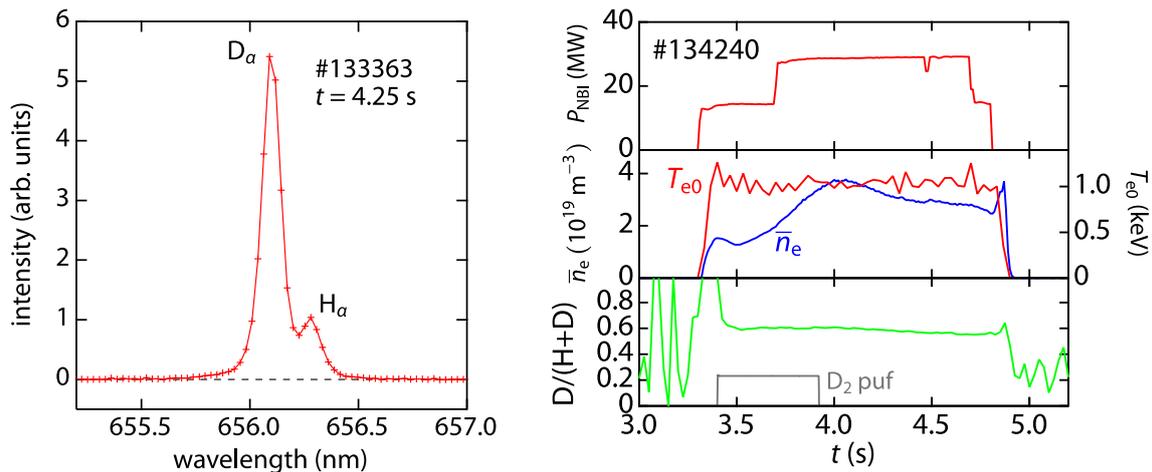


図 3.3.2.1-2 (a) 計測されたスペクトルの例。(b) 水素/重水素比の時間変化を求めた例。

コア径  $300 \mu\text{m}$  の光ファイバーとコリメーターにより、ほぼプラズマ中心部を通る視線で光を観測し、分光器へと導入する。分光器の焦点距離は 0.15m で、1800 本/mm の刻線数のグレーティングを搭載している。検出器は 1 ラインの CCD で、ピクセル幅  $8 \mu\text{m}$ 、高さ  $200 \mu\text{m}$ 、総ピクセル数は 3648、逆線分散は  $3.38 \text{ nm/mm}$  である。露光時間 15ms で、25ms 毎にスペクトルが記録される。入り口スリット幅を  $20 \mu\text{m}$  とすることで、水素原子及び重水素原子のバルマー  $\alpha$  線のピークが分離して計測される。計測されたスペクトルの例を図 3.3.2.1-2(a) に示す。現在は、それぞれのピーク近傍数ピクセルの値の和を発光線の強度としている。図 3.3.2.1-2(b) に水素/重水素比の計測例を示す。

### 3.3.2.2 高速トムソン散乱計測

LHD で使用されているトムソン散乱システムは、最大 144 空間点の高空間解像度で電子温度・密度プロファイルの精密計測を行うことが可能な世界に類を見ない計測システムであり、LHD プラズマの解析に必要不可欠なものとなっている。後述するシミュレーションコード群を用いた解析の全ては、トムソン散乱計測のデータに基づいており、トムソン散乱計測は、その計測結果を用いて行う解析と LHD プラズマの理解を通して、LHD プラズマの性能向上に大きく貢献してきた。このような高空間分解能 LHD トムソン散乱システムを、高繰り返し・高時間分解能化することで、過渡的なプラズマ応答を含む高速なプラズマ現象の電子温度・密度分布を精密測定することが可能となり、今まで見てきた物理現象のより深い理解や新発見が期待される。トムソン散乱計測の高速化は、計画段階のものも含めて世界的な潮流となっており、W7-X では、レーザー技術で先端を行くドイツの半導体励起固体レーザーを導入して 1kHz のオペレーションを模索している。MAST でも 8 台のレーザーを使った高速トムソン散乱計測が行われている。この状況は、トムソン散乱計測の時間分解能の向上が新たな物理現象発見へのクリアな研究戦略であることを示唆する。

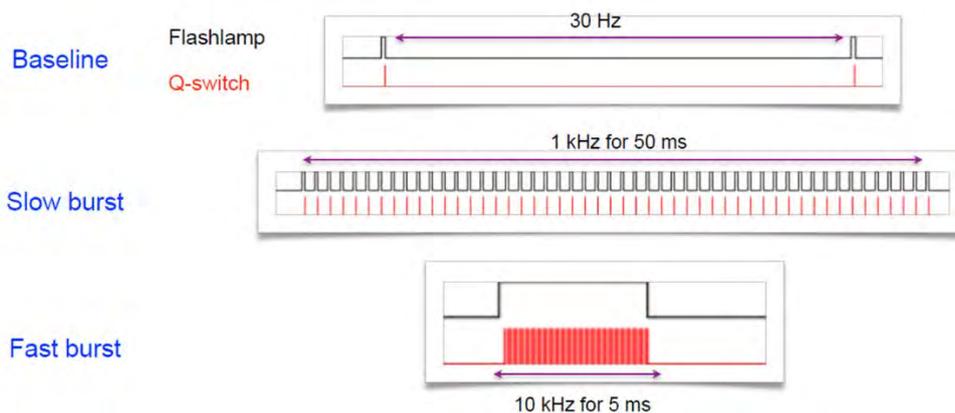


図 3.3.2.2-1 高速トムソン散乱導入後の時間分解能別測定モード

トムソン散乱計測の高速化を目的に、数年間の基礎的な検討を経て、2017 年からウィスコンシン大学マディソン校との国際共同研究プロジェクトとして、最大 15kHz で計測可能なトムソン散乱システムの開発を進めている[3.3.2.2-1]。導入するシステムは、通常 30Hz のトムソン散乱計測を行いながら、これとは独立の 2 つのバーストモード(間欠運転)を持つレーザーを導入することで、15kHz の高速バーストモード(15ms 間動作、225 パルス)、1kHz (50ms 動作、50 パルス)のスローバーストモードでの計測が可能となる(図 3.3.2.2-1)。LHD に設置する主要構成装置の一部は米国エネルギー省の支援を受けたウィスコンシン大学からの提供で、費用負担も含めて双方で本プロジェクトを進めている。現在、急ピッチで準備を進めており、11 月に提供装置に関わる契約の締結が終了し、第 20 サイクル中での LHD での導入を目指して開発を進めている。

[3.3.2.2-1] D. D. Hartog et, al, APS Division of Plasma Physics Meeting 2017, CP11.059 (2017)

### 3.3.2.3 揺動計測

LHD プラズマの閉じ込めに影響を与えている乱流揺動を精度よく観測し、閉じ込め改善への指針を得ることは重要な研究課題である。特に、微視的な乱流成分(イオンスケールのITG/TEM、電子スケールのETG)を高精度に観測するため、LHD では、電子密度揺動計測として、位相コントラストイメージング計測 PCI、ドップラー後方散乱法 DBS、ビーム放射分光法 BES、ミリ波後方散乱法 BS 等の計測器を、電子温度揺動計測として電子サイクロトロン放射イメージング計測器 ECEI を整備し、観測に適用している(図 3.3.2.3-1)。ここでは、代表例として、PCI、ECEI、DBS の3つについて詳述する。

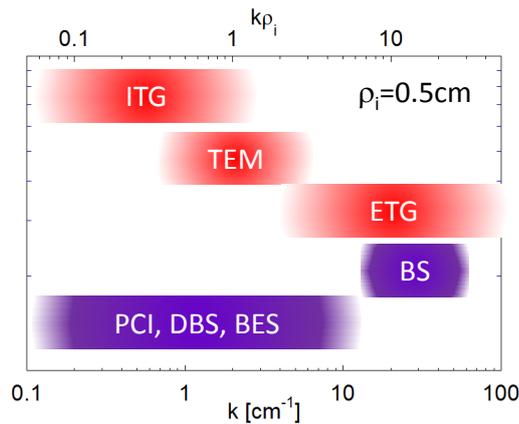


図 3.3.2.3-1 乱流揺動(ITG/TEM/ETG)とLHD に設置した電子密度揺動計測器の観測波数領域

#### (1) 二次元位相コントラストイメージング (2D-PCI)

波長がイオンのラーモア半径程度の乱流揺動を計測する手法として CO<sub>2</sub> レーザーを用いた二次元位相コントラストイメージング (Two dimensional Phase Contrast Imaging; 2D-PCI) が稼働している[3.3.2.3-1,2]。位相コントラストイメージングは入射レーザー光のプラズマの乱流揺動による位相変化を、散乱光と透過光の間で 90 度の位相差を与えることにより、強度変動に置き換えて計測する手法である。図 3.3.2.3-2 に 8.5-U ポート近傍の FIR 干渉計架台上に設置された2D-PCI 計測の検出部概要図を示す。検出器には液体窒素冷却の光伝導型 HgCdTe<sub>2</sub> 次元検出器を用いている。乱流揺動は磁力線と平行方向にプラズマの周回長程度に波長が長く、それと垂直方向には、イオンのラーモア半径程度の波長を持つ強い非対称性を持つ。この非対称性と乱流が磁力線と垂直方向に進行すること、及び磁力線が空間的に大きく変化していることを利用して、二次元検出器を用いることにより、乱流の積分画像を解析し、乱流の空間構造を計測することができる。

重水素実験開始後、全てのシステムを遠隔操作し、さらに、検出器を中性子及びガンマ線の損傷から保護するために、厚さ 10 cm のボロン添加ポリエチレンで検出器ボックスの 6 面を囲い、さらには厚さ 10mm の鉛板を上面と底面に設置した。これらの材質、厚さ、構造は名古屋大学瓜谷研究室との共同研究で決定した。冷却用の液体窒素は自動供給システムを設置し、1 週間の連続運転を可能にしている。

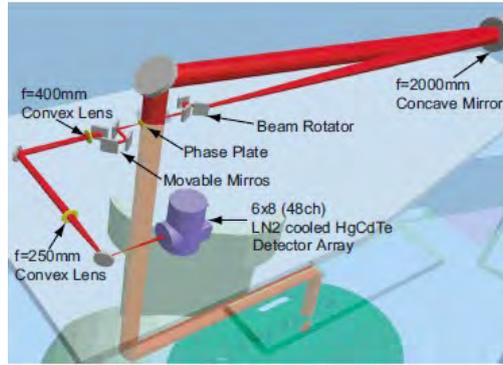


図 3.3.2.3-2 2D-PCI 検出器部概要図

図 3.3.2.3-3 に H プラズマ、D プラズマの計測例を示す。2D-PCI は乱流揺動の空間構造の時間変化をほぼ全ての領域で時間連続的に計測することが可能である。ポロイダル方向の波数成分を計測するため、実験室系でイオン反磁性方向と、電子反磁性方向に進行する成分を区別して計測することができる。図 3.3.2.3-3 に密度をランプアップした時の H プラズマと D プラズマの比較を示す。いずれの場合も密度が低い時は規格化位置 0.5 から 0.9 付近に実験室系でイオンの反磁性方向に進行する揺動が存在し、これは密度の増加とともに減少する。それに対して、規格化位置 1.0 付近の周辺部の揺動は密度の増加とともに振幅が増加し、周辺からプラズマの内部領域に広がっていくことが観測できる。[3.3.2.3-3]

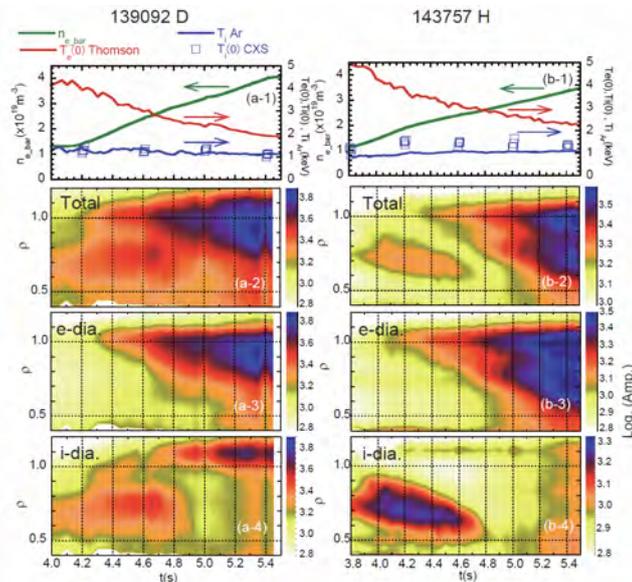


図 3.3.2.3-3 (左)D プラズマ及び(右)H プラズマの揺動分布の時間変化の比較((上より1段目)  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ , (2 段目) 全乱流成分, (3 段目) 電子の反磁性方向進行成分 (4 段目) イオンの反磁性方向進行成分

この計測は、上述のようにダイナミックな時間変化の計測が可能であり、また、計測波数領域はイオンのラーモア半径程度の波長の乱流なので、ジャイロ運動論シミュレーションとの比較にも威力を発揮する。

## (2)ECEイメージング (Electron Cyclotron Emission Imaging: ECEI)

電子サイクロトロン放射イメージング(ECEI)は計測周波数が高く、既存の ECE 計測と比べ計測感度を向上させる必要があったため、イメージングアンテナに局所発振器(LO: Local Oscillator)内蔵型アンテナ(LIA : local integrated antenna array)を開発し[3.3.2.3-4]、LHD の重水素プラズマ実験に適用した。半導体を含む LIA に対する中性子の影響を避けるために、複数枚のミラーによる光学系でマイクロ波をガウシアンビーム伝送した後、LHD より 5m 離して設置した LIA 上に焦点を結ぶような光学系が設計された。プラズマに面するミラーはトーラス外側赤道面上に設置された。図 3.3.2.3-4 に LHD に導入された LIA ユニットの写真を示す。現在の LIA ユニットの 1 枚設置し、ポロイダル方向並びに半径方向の 2 次元計測であるが、LIA ユニットの複数枚利用することにより、トロイダル方向を加えた 3 次元計測に拡張が可能である。

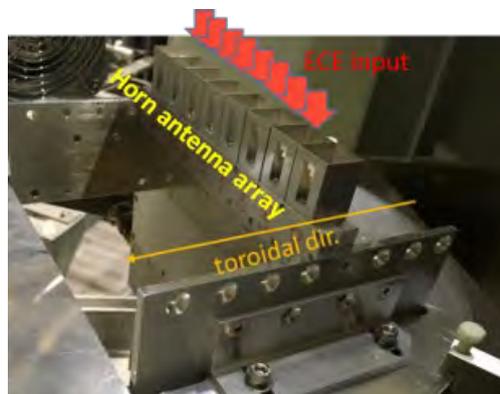


図 3.3.2.3-4 LHD に設置された LIA (図中 Horn antenna array) ユニットの写真。マイクロ波は写真上部より入射される。1 枚の LIA ユニット内に 8 チャンネル分のホーンアンテナがポロイダル方向に設置されている。LIA ユニットの複数枚、横方向に設置することでトロイダル方向の拡張が可能である。

LHD の最大磁場のおよそ半分の磁場強度 1.375T で磁気面  $m/n=1/1$  が計測できるように受信周波数は 50-60GHz 帯とした。LIA の 8 つのアンテナの信号は各々、周波数分離機でバンド幅 1GHz の 8ch に分離され、最終的に 64ch の計測点を持つ。図 3.3.2.3-5 に磁場強度 1.375T の時の計測領域を示す。高ベータ実験等の磁場強度を下げた場合は、測定領域はより内側になる[3.3.2.3-5]。

LIA を用いた ECEI アンテナで、周辺部の電子温度分布を観測することができた。図 3.3.2.3-6 は測定できた電子温度分布の一例である[3.3.2.3-5]。電子温度分布の絶対温度較正は、ECH が入射されていない電子温度 1keV 程度のプラズマで、磁気面上温度一定の条件でトムソン散乱計測と比較することで実施した。また、電子温度揺動の 2 次元分布を観測することもできている。 $m/n=1/1$  面の隣接チャンネル間で強い相関を持つ揺動を観測した。従来の 1D-ECE 計測 (測定点はトロイダル方向ほぼ反対側) 信号や磁気揺動とも高い相関を持つことから、MHD 不安定性による電子温度揺動を捉えることができたと判断した。

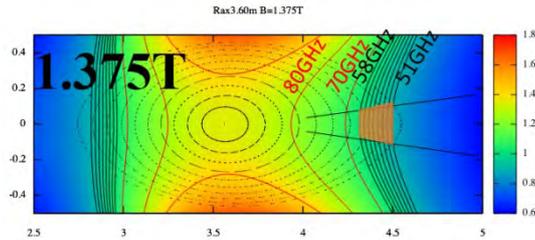


図 3.3.2.3-5 LHD 磁気軸磁場強度 1.375T の時の ECEI 測定領域 (台形状にハッチされた領域)

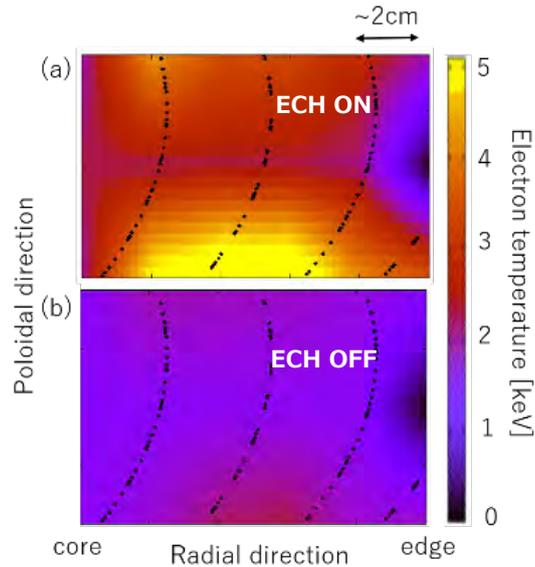


図 3.3.2.3-6 ECH が印可時と非印可時の電子温度分布

### (3) マイクロ波ドップラー反射計

現在の LHD プラズマにおける主要な乱流成分であるイオンスケール乱流の速度及び強度分布を計測することを目的に、マイクロ波ドップラー反射計 (別名、マイクロ波ドップラー後方散乱計: DBS) を LHD に適用した [3.3.2.3-6~11]。この手法は、プラズマに入射したマイクロ波の波数  $k$  とのブラッグ条件を満たした乱流成分によって生じる後方散乱波を観測する。散乱波は、乱流速度  $\mathbf{v}$  によってドップラーシフト  $f_D = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} \approx -k_{\perp} v_{\perp}$  を受けており、このドップラーシフト量  $f_D$  を観測することで乱流速度を求めることができる。また、同時に散乱波強度から揺動強度を求めることもでき、同一空間における乱流速度と強度の情報が得られる。

LHD では、特に、周波数コムを用いた多周波数 (約 40 周波数) 同時入射による、従来にない高い時間 ( $1 \mu\text{s}$ ) - 空間 (2-3mm) 分解能での計測を達成した (図 3.3.2.3-7)。他装置における従来型のドップラー反射計では、入射周波数を掃引し空間構造を調べていたため、掃引に要する時間 (数  $100 \mu\text{s}$  ~ 数  $10\text{ms}$ ) の平均的な情報しか得られなかったが、これを大幅に改善した。これにより、種々のプラズマにおける乱流物理研究が促進している [3.3.2.3-12~19]。例えば、電子サイクロトロン共鳴波加熱 (ECRH) による電子追加熱実験 [3.3.2.3-16] における、乱流構造の細分化の観測例を示す (図 3.3.2.3-8)。この場合、ECRH 追加熱

によって、それまで存在していた大きな乱流構造が細分化しており、プラズマ閉じ込め改善に繋がっている可能性を示唆していると考えられる。このように、プラズマの高温化への指針を立てる上で、高時間分解能を持つ乱流計測器は大いに貢献している。

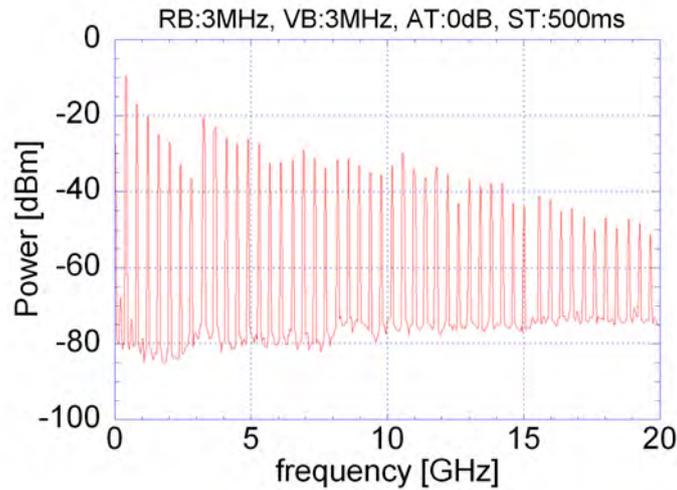


図 3.3.2.3-7 マイクロ波周波数コムの発振スペクトル例。全ての周波数成分を同時に発生しており、同時多点計測を可能とする。

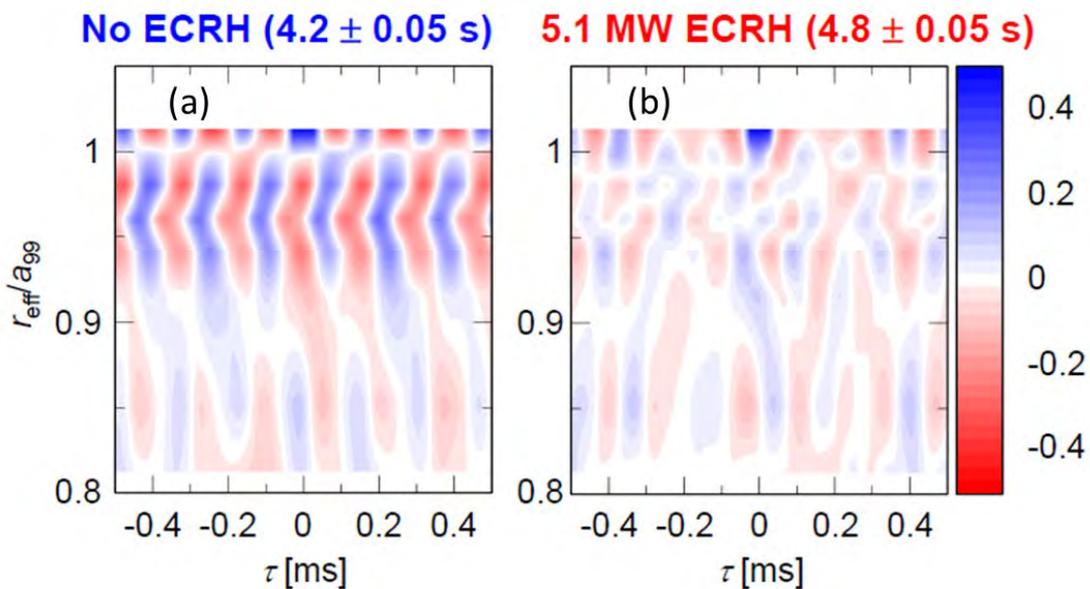


図 3.3.2.3-8 揺動強度の時空間相互相関解析例。ECRH 追加熱によって乱流の構造が細分化している。(a)ECRH なし、(b)5.1MW ECRH 入射。

[3.3.2.3-1] K. Tanaka. et al, Rev. Sci. Instrum. 79, (2008), 10E702

[3.3.2.3-2] C. Michael. et al, Rev. Sci. Instrum. 86, (2015), 093503

[3.3.2.3-3] K. Tanaka et al, Proceeding of FEC2018

- [3.3.2.3-4] D. Kuwahara et al., J. Instrum. 10 (2015) C12031.
- [3.3.2.3-5] H. Tsuchiya et al., Plasma Fusion Res. 13, 3402063 (2018)
- [3.3.2.3-6] T. Tokuzawa et al., “Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD”, Review of Scientific Instruments 89, 10H118 (2018).
- [3.3.2.3-7] T. Tokuzawa et al., “Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements”, Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (2018).
- [3.3.2.3-8] A. J. Creely et al., “Novel Analysis Technique for Measuring Edge Density Fluctuation Profiles with Reflectometry in the Large Helical Device”, Review of Scientific Instruments 88 073509 (2017).
- [3.3.2.3-9] R. Soga et al., “Developments of frequency comb microwave reflectometer for the interchange mode observations in LHD plasma”, Journal of Instrumentation JINST 11 C02009 (2016).
- [3.3.2.3-10] T. Tokuzawa et al., “Ka-band microwave frequency comb Doppler reflectometer system for the Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research 9, 1402149 (2014).
- [3.3.2.3-11] T. Tokuzawa et al., “Microwave Doppler reflectometer system in LHD”, Review of Scientific Instruments 83, 10E322 (2012).
- [3.3.2.3-12] K. Ida et al., “Trigger mechanism for the abrupt loss of energetic ions in magnetically confined plasmas” Scientific Reports 8, 2804 (2018).
- [3.3.2.3-13] T. Tokuzawa, “Turbulence in edge and core transport barriers: new experimental results and modeling”, Nuclear Fusion 57 025001 (2017).
- [3.3.2.3-14] T. Tokuzawa et al., “Distorted magnetic island formation during slowing down to mode locking in helical plasmas”, Nuclear Fusion 57 076003 (2017).
- [3.3.2.3-15] K. Ida et al., “Observation of distorted Maxwell-Boltzmann distribution of epithermal ions in LHD”, Physics of Plasmas 24, 122502 (2017).
- [3.3.2.3-16] H. Takahashi et al., “Extension of operational regime in high-temperature plasmas and effect of ECRH on ion thermal transport in the LHD”, Nuclear Fusion 57, 086029 (2017).
- [3.3.2.3-17] K. Ida et al., “Abrupt onset of tongue deformation and phase space response of ions in magnetically-confined plasmas”, Scientific Reports 6, 36217 (2016).
- [3.3.2.3-18] T. Tokuzawa et al., “Observation of multi-scale turbulence and non-local transport in LHD plasmas”, Physics of Plasmas 21, 055904 (2014).
- [3.3.2.3-19] S. Inagaki et al., “Observation of long-distance radial correlation in toroidal plasma turbulence”, Physical Review Letters 107, 115001, (2011).

### 3.3.3 周辺・PWI 関連機器

#### 3.3.3.1 プラズマ周辺部計測

LHD のようなヘリカル型装置では、磁場配位の 3 次元性によって周辺部にストキャスティック層と呼ばれる磁場構造が現れる。プラズマの輸送は磁力線方向に極めて速いため、磁場構造の影響を受けやすい。これまでストキャスティック層における磁場構造の 3 次元効果として、不純物遮蔽やデタッチメントの安定化などが確認されてきた。しかし、これら物理機構の詳細については未解明の部分が多く、プラズマの分布と磁場構造との関係について更なる研究が必要である。3 次元的な磁場構造とプラズマ輸送の関係を調べるため、周辺多チャンネル分光器、エシエル分光器、ダイバータ板監視用 IR カメラ等を立ち上げ、周辺部の不純物の発光分布、不純物フロー、ダイバータ板熱負荷計測を行った。

##### (1) 周辺多チャンネル分光器

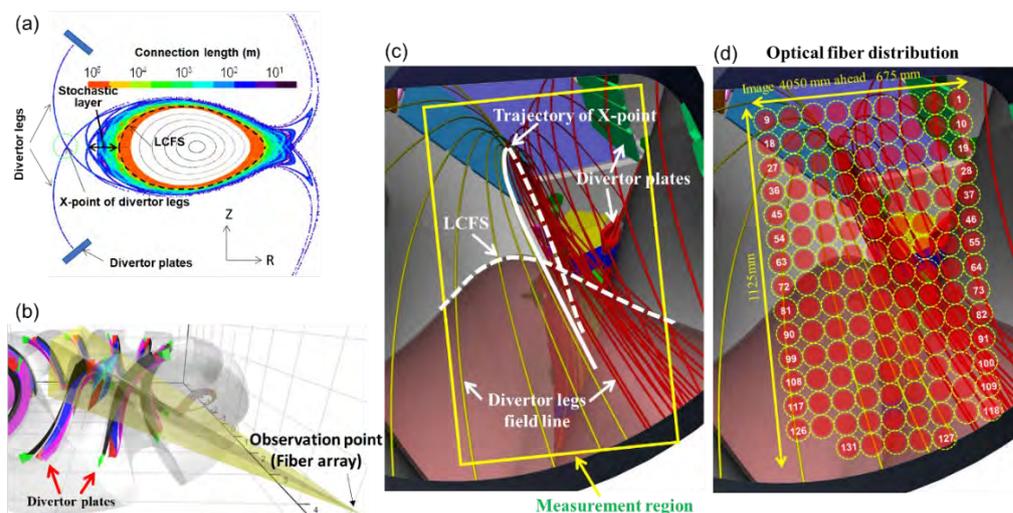


図 3.3.3.1-1 (a)LHD 周辺部の磁力線接続長分布、(b)空間多チャンネル分光器の視線、(c)視野図、及び(d)視野内での光ファイバーの分布。

図 3.3.3.1-1 に周辺多チャンネル分光器の視野図を示す。LHD のトーラス外側から斜めに上に向けて視線を取っている。周辺部(ダイバータ板、ダイバータレグ、X 点、最外殻磁気面)を視野に入れてファイバーアレイ(131ch)を設置し、不純物・水素からの発光分布計測を行った[3.3.3.1-1,2]。発光分布は視線方向に積分されたものであるが、さらに、磁場構造と発光分布の詳細を調べるために、新たなトモグラフィー手法の開発を行った。この手法の主な特徴は、プラズマの磁力線方向の速い輸送を考慮して、磁力線方向の発光分布の 2 階微分をペナルティー関数(正則化項)としてトモグラフィー逆変換に取り入れたこと、また、繰り返し計算によって明らかに非物理的な発光(負の発光強度)を修正するルーチンを導入したことである。このことにより、より少ない視線計測でも安定に 3 次元発光分布の再構成解を得ることができるようになった[3.3.3.1-3]。図 3.3.3.1-2 にテストデータの解析結果を示す。テストデータは 3 次元的に変化する発光分布を与えており、従来の正則化の手法では 3 次元分布がうまく再現できていないが、今回開発した手法によってよりテストデータに近い分布を

得ることができている。図 3.3.3.1-3 は本手法を実験データに適用した例で、観測点から 3.7 m離れた視線に垂直な断面での発光分布を示している。同じ断面での磁力線接続長分布と比較することにより、不純物の発光はダイバータレグと X 点付近に分布しており、またポロイダル方向にも不均一であることが分かった。また、分布は不純物イオンの荷数によって変化しており、荷数が低いほどよりダイバータレグにそって分布していることが分かった。この他、真空紫外分光器を用いた 2 次元分布計測も行われており、磁気島構造との対応やデータタッチメント時の振る舞いが調べられた[3.3.3.1-4]。

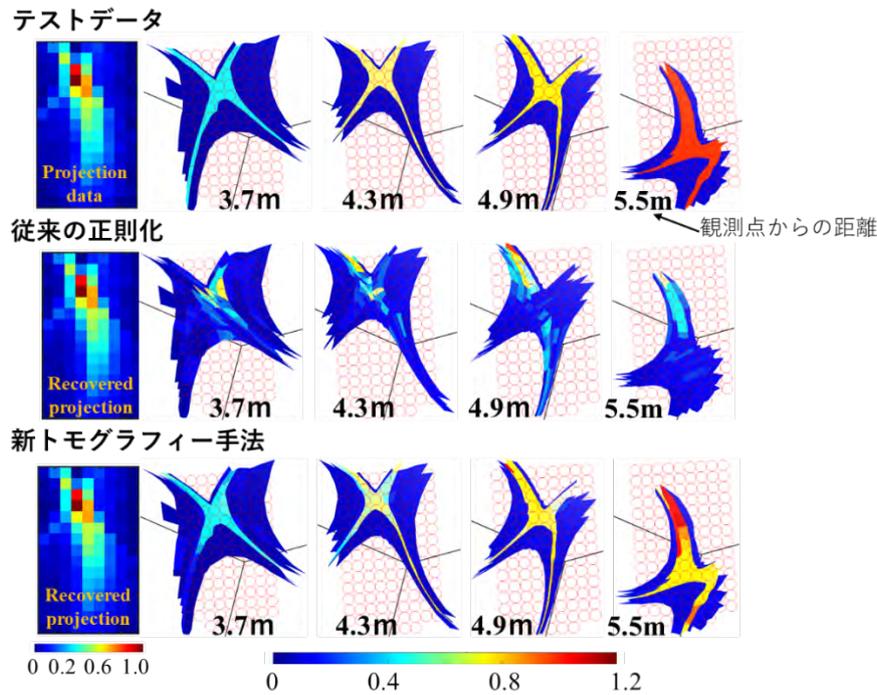


図 3.3.3.1-2 新しいトモグラフィー手法のテストデータによる検証。上段:テストデータ、中段:従来の手法、下段:新しい手法。

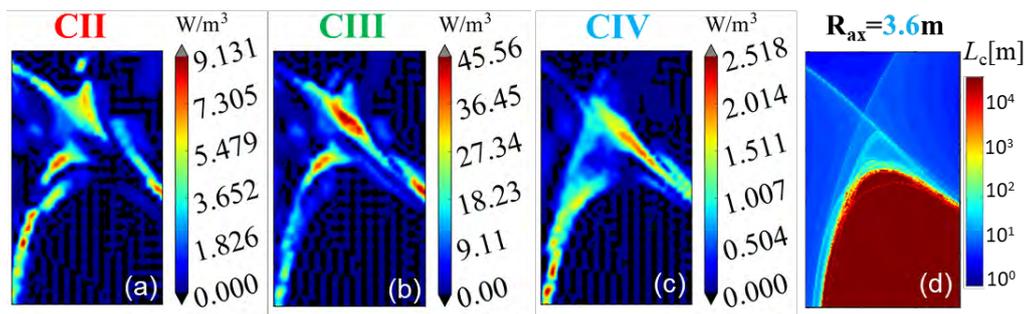


図 3.3.3.1-3 新トモグラフィー手法によって再構成された観測点から 3.7m離れた断面における炭素の発光分布(a) CII(C1+)、(b) CIII(C2+)、(c) CIV(C3+)と(d)磁力線構造との対応。

また、周辺プラズマ輸送 3 次元数値シミュレーションコード EMC3-EIRENE の整備を進め、実験観測を再構成する発光分布の計算が可能になっている。図 3.3.3.1-4 に実験とシミュレーションの比較を示す。図 3.3.3.1-4(a),(b)から、現行の輸送モデルでは計測結果と大きく分

布が異なっているが、不純物輸送の摩擦力項の係数を変化させることで実験結果を再現しうることが分かった(図 3.3.3.1-4(d))。今後、更に系統的な比較を行い、現行の輸送モデルの検証と見直しを行う。

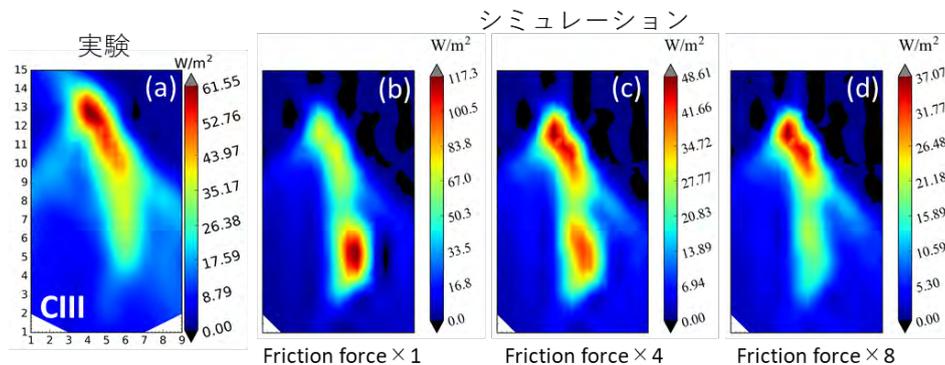


図 3.3.3.1-4 CIII の発光分布(視線積分)の(a)実験結果と(b)~(d)EMC3-EIRENE シミュレーションとの比較。シミュレーションでは背景プラズマと不純物間の摩擦力(friction force)を変化させている。(b)摩擦力として EMC3-EIRENE による初期設定値を用いた場合、(c) 初期設定値の 4 倍、(d) 初期設定値の 8 倍を設定した時のシミュレーション結果。

## (2) エシエル分光器

周辺部のダイバータレグのプラズマをより詳細に計測する目的で、新たにエシエル分光器を設置した。波長領域 400~800nm を同時に比較的高分解 ( $\Delta \lambda \sim 0.05 \text{ nm}$ ) で計測することができる。中性粒子(分子線、原子線)や不純物の様々な発光を同時に計測することが可能である。視線はダイバータレグの磁力線にほぼ平行になっており、発光スペクトルのドップラーシフトから評価した不純物のフロー速度の密度依存性を図 3.3.3.1-5 に示す。負の値はダイバータ板に向かう向きに対応する。数十 km/s のダイバータ板に向かう速度が観測されており、密度の上昇に伴い速度の絶対値は増加している。また、軽水素では重水素に比べて 1.4~2 倍ほど速度が大きくなっていることが分かった[3.3.3.1-5]。同様の結果は真空紫外分光でも観測されている[3.3.3.1-6]。不純物が背景プラズマから運動量を得て加速されていると仮定すると、この違いはおおよそ燃料粒子の質量比の平方根に相当しており、同位体効果の現れであると解釈できる。現在、数値シミュレーション EMC3-EIRENE との比較を進めているが、現行のモデルと実験結果との違いが確認されている[3.3.3.1-7,8]。

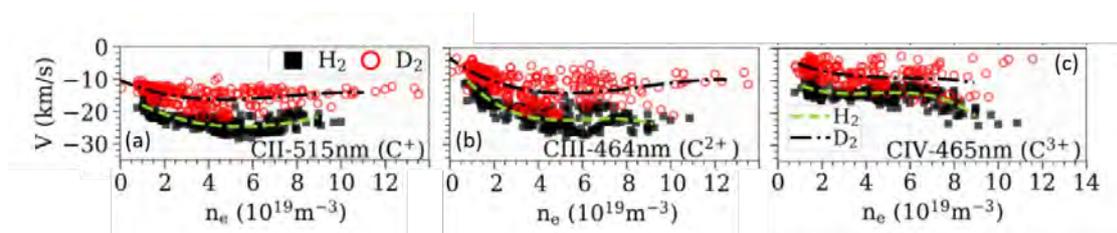


図 3.3.3.1-5 ダイバータレグでの炭素イオンのフロー速度の同位体効果と密度依存性。負値はダイバータ板に向かう向き。

### (3) ダイバータ板熱負荷計測

ダイバータ熱負荷軽減は、核融合炉実現に向けてヘリカル型/トカマク型装置を問わず重要な研究課題である。ヘリカル型装置では、前述のように周辺部の磁場構造が複雑になるため、ダイバータ板上の熱負荷分布も不均一になることが知られている。磁場構造と熱負荷分布のより詳細な理解に向けて、ダイバータ板赤外線カメラの設置を行った [3.3.3.1-9]。図 3.3.3.1-6 に計測系の概略、観測視野と計測された温度分布を示す。カメラは LHD のトラス外側(4-O ポート)に設置されており、最も熱負荷が高くなるインボード側のダイバータ板を計測している。ダイバータ板上の温度分布は明らかに不均一な分布となっていることが分かる。これはダイバータ板に接続する磁力線の長さやプラズマ内部への侵入深さに起因すると考えられている。今後、更に系統的な計測を行い、磁場構造・不純物輸送・放射損失と熱負荷軽減の関係について明らかにしていく。

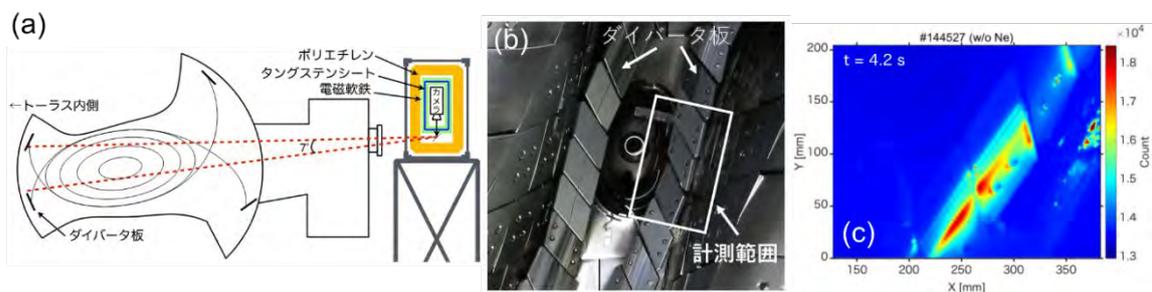


図 3.3.3.1-6 赤外線カメラによるダイバータ温度分布計測結果。(a) LHD ポロイダル断面と赤外線カメラ計測システムの概略、(b) 観測視野、(c) ダイバータ板上の温度分布計測結果。

- [3.3.3.1-1] M. Kobayashi, S. Morita et al., Rev. Sci. Instrum., 88 (2017) 033501.
- [3.3.3.1-2] M. Kobayashi, S. Morita et al., Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 1043.
- [3.3.3.1-3] T. Kobayashi, M. Kobayashi et al., Rev. Sci. Instrum. “Single field-of-view tomographic imaging of 3D impurity emission distribution in magnetized edge plasma of LHD”, Accepted for publication.
- [3.3.3.1-4] H. Zhang, S. Morita et al., Phys. Plasmas, 24 (2017) 022510.
- [3.3.3.1-5] A. Kuzmin, M. Kobayashi et al., Plasma and Fusion Research, 13 (2018) 3402058.
- [3.3.3.1-6] T. Oishi, S. Morita et al., “Effect of deuterium plasmas on carbon impurity transport in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device”, EX/P3-11, IAEA FEC 2018, Indial.
- [3.3.3.1-7] S.Y. Dai, T. Oishi et al., Nucl. Fusion, 58 (2018) 096024.
- [3.3.3.1-8] A. Kuzmin, M. Kobayashi et al., “Analysis of the impurity flow velocity in a wide plasma parameter range for Deuterium and Hydrogen plasmas in the divertor legs of the stochastic layer in LHD”, Submitted to Nuclear Materials and Energy.
- [3.3.3.1-9] 林 祐貴, 小林 政弘 他, ” LHD 非接触ダイバータ運転におけるプラズマ熱流束計測”, 5P62, プラズマ・核融合学会年会、2018 年 12 月 3-6 日、大阪大学.

### 3.3.3.2 PWI 研究用関連計測機器

プラズマ壁相互作用 (Plasma Wall Interaction: PWI) 研究に関連する計測機器整備として、試料駆動装置の改造が挙げられる。試料駆動装置は、特定のプラズマのみに材料試料を曝露させ、数日中に取り出しを行い、即座に分析を行うことを目的に運用されている。重水素実験において、プラズマに曝露された試料はプラズマから発生する中性子によって放射化されるため、非密封放射性同位元素として扱われる。そこで、非密封放射性同位元素の取扱いに対応するため、グローブ BOX マニピュレータを試料駆動装置に設置し、それによる試料の取り付け及び取り外しを可能とした。図 3.3.3.2-1 に、グローブ BOX マニピュレータを使用した試料駆動装置への試料取り付け及び取り外し時の機器構成模式図を示す。

重水素プラズマ曝露後の試料の取り外し時は、まず、トリチウム (T) ルームガスモニタによる T 量の検査を行い、検出された場合は T 除去装置による除染を実施する。T 検出量がバックグラウンド以下になったことを確認の後、グローブ BOX マニピュレータを接続して試料ホルダーの取り出しを行う。マニピュレータによる試料ホルダーの着脱は単純なワンタッチ動作で可能としている。また、取り外した試料ホルダーはアクリル製のグローブ BOX 部に格納された状態で、「試料加工室」まで人の手に直接触れることなく運搬することができる。試料加工室は放射化試料の管理、加工、分析を行う目的で整備された専用室である。図 3.3.3.2-2 に、グローブ BOX マニピュレータのグローブ BOX 部を上方から見た写真を示す。試料ホルダーが格納された状態でシャッターが閉じられているため、放射化試料部に作業者が触れる心配が無い。試料加工室にて試料ホルダーを取り外し、試料ホルダー上に設置されている各種試料を取り外し、放射化試料として登録作業を実施する。

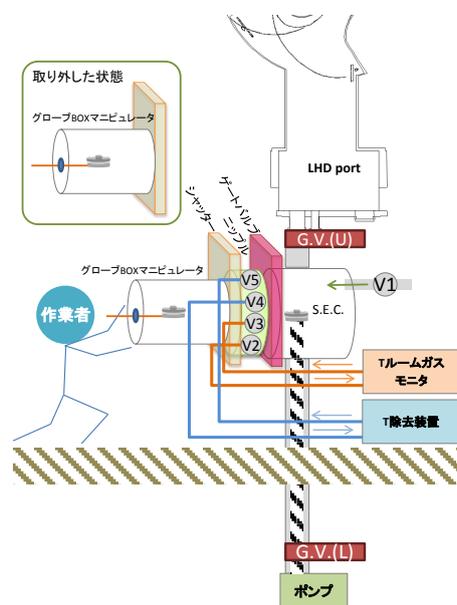


図 3.3.3.2-1 グローブ BOX マニピュレータを使用した試料駆動装置への試料取り付け及び取り外し時の機器構成模式図。



図 3.3.3.2-2 グローブ BOX マニピュレータのグローブ BOX 部を上方から見た写真。

また、直接の計測機器ではないが、LHD から取り出した放射化試料の管理を行う目的で、「放射化試料管理システム」を新たに整備した。図 3.3.3.2-3 に、放射化試料管理システムのユーザーインターフェース画面の一例を示す。放射化試料管理システムとして、放射線管理室に設置されたデータベースサーバーを中心として、試料加工室、測定室(3)にそれぞれクライアントコンピュータが 1 台ずつ設置されている。各コンピュータは核融合科学研究所の放射線管理区域内のネットワークに接続されており、各場所でデータベースの閲覧と操作が可能となっている。このシステムの構築により、原子力規制庁への届出に基づいた放射化試料の管理をより正確に実施する事が可能となった。実験結果の一例として、図 3.3.3.2-4 に、「LHD 重水素実験に長期で設置した SUS 試料の断面透過型電子顕微鏡(TEM)像を示す。B, C, Fe を含む Mixed-material 堆積層が緻密に折り重なった状態となっていることが分かる。最も初期に形成された B 堆積層は容易に剥離しやすいことが最近の解析より明らかになりつつあり、B 堆積層の形成厚さを制御することが剥離抑制の観点から重要であると考えられる。試料駆動装置の実験結果と合わせて今後解析を進める予定である。



図 3.3.3.2-3 放射化試料管理システムユーザーインターフェース画面

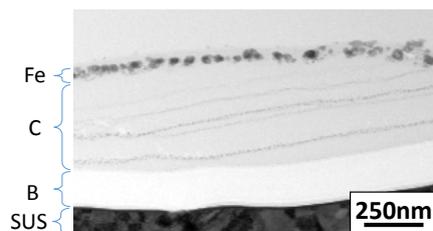


図 3.3.3.2-4 重水素実験曝露後の SUS 試料上に堆積した Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像。

### 3.4 LHD プラズマ解析コードの整備

LHD プラズマ解析コードの整備としては、重水素実験における中性子発生量の定量評価の観点に最重点を置いて取り組んできている。

重水素実験のマシントイム割り当てや年間スケジュールを策定するに当たり、規定されている各種の中性子発生量制限を厳守するために、中性子発生量の事前評価が必須である。そのため、重水素実験開始前に、中性子発生量を予測する中性子発生率データベース (FIT3D-DD database) を TASK3D-a[3.4-1]の加熱モジュール(FIT3D [3.4-2])に基づいて構築した (図 3.4-1(a))。このデータベースでは、中性子発生量の過小評価を防ぐため、即損失イオンのみを除いてフォッカー・プランク方程式の解析解を基に中性子発生率を評価する簡易コード(FIT3D-DD)を用いている。データベースでは、重水素 100%のプラズマを仮定しており、温度・密度の分布形状は LHD の典型的な分布形状 (電子温度: $T_{e0}(1-\rho^2)$ 、 $n_{e0}(1-\rho^8)$ ) に固定している。ここで、 $T_{e0}$ 、 $n_{e0}$ 、 $\rho$  は、それぞれ、中心電子温度、電子密度、規格化小半径である。このデータベースを参照して中心温度と中心密度を設定することで、中性子発生率を予測することができ、想定される放電時間を与えることで当該放電における中性子発生量を算定することができる。実験提案者はこの算出システムを活用して、マシントイム要求の際に中性子発生量を付記するという運用を行った。

重水素実験開始後には、実験計測値と、このデータベースに基づく予測値との比較検証も行っており、図 3.4-1(b)に示すように、実験値(□)に比べて、予測値(実線及び破線: 中心温度や重水素ビームエネルギーを変化させたもの)は、約2~3倍過大評価していることが認識されている。

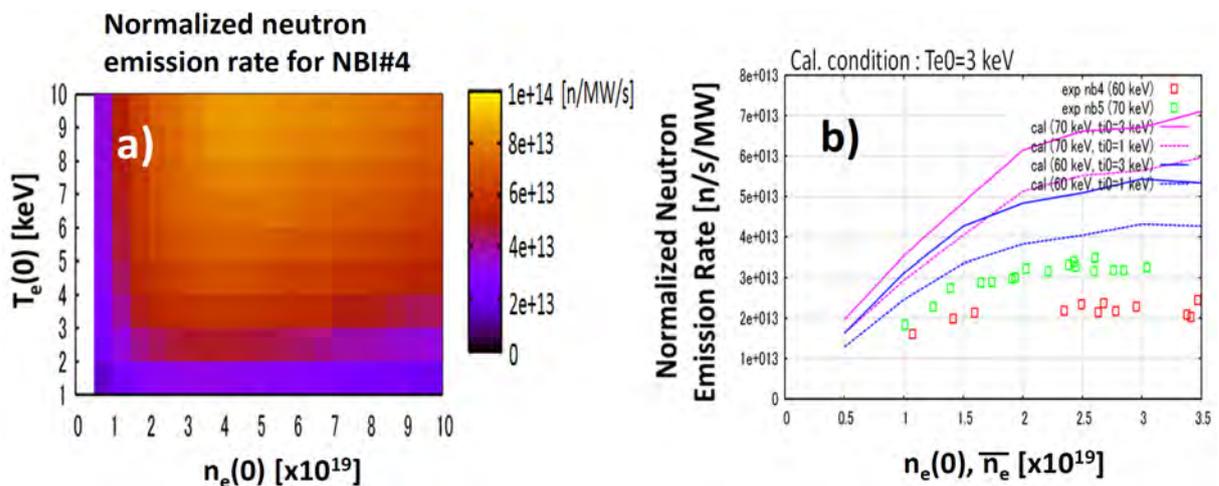


図 3.4-1(a) 中性子発生率データベース例(NBI#4)、(b)中性子発生率の実験結果とFIT3D-DDによる予測値の比較。 中性子発生率は入射加熱電力で規格化されている。

重水素実験の進展に伴い、中性子発生量評価の高精度化やその実験検証も進展している。LHD の典型的なプラズマパラメータの範囲においては、熱粒子同士の核融合反応よりも、NBI 由来の高速イオンと熱粒子間の核融合反応が支配的である。従って、中性子発生率の評価には、プラズマの温度・密度だけではなく、高速イオンの速度分布が必要となる。

このため、TASK3D-a の NBI 加熱解析モジュール(減速過程含む)である CONV\_FIT3D の拡張を行い、中性子発生量の簡便かつ高精度の評価を進めた。CONV\_FIT3D は、実空間 1 次元、速度空間 1 次元の 2 次元空間において、高速イオンと、温度・密度(計測データ活用)を持つバルクプラズマとの衝突による高速イオンの減速を計算するコードである。図 3.4-2 は、重水素放電における中性子発生率の計測結果と、FBURN [3.4-3]、CONV\_FIT3D の計算結果を比較したものである。この比較はコード間のベンチマークを目的としたものであるため、両コードでは実効電荷数=1、電子温度=イオン温度を仮定している。図に示されているように、両者の計算結果は十分な一致を得た。実験結果に対して過大評価であるのは、上記の仮定と、高速イオン減速時の高速イオン損失を評価していないためである。

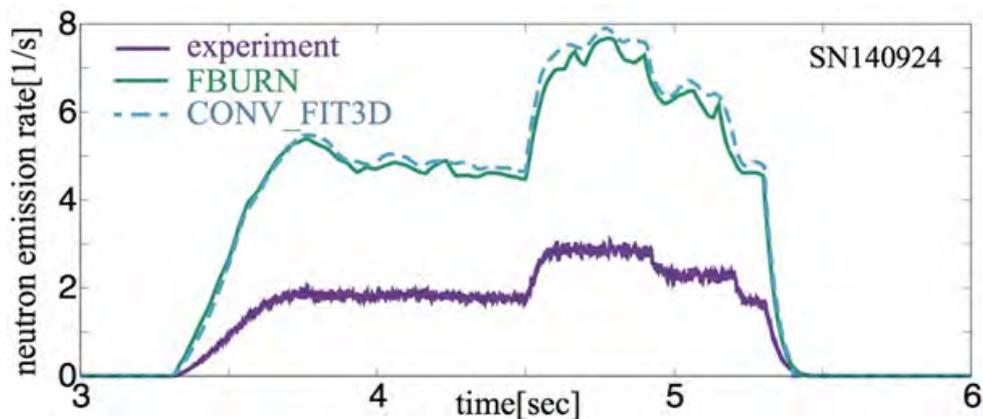


図 3.4-2 中性子発生率の実験結果並びに、FBURN 及び CONV\_FIT3D による計算結果の比較。

また、CONV\_FIT3D と FBURN は速度空間においてピッチ角の情報を持たないため、ビームイオン同士の相互作用を考慮することができない。このため、互いに逆向きの接線 NBI 同士の核融合反応を評価することができない。この効果の評価するためには、2次元速度空間の計算が可能な GNET-TD [3.4-4]や TASK/FP [3.4-5]を用いる必要がある。

中性子発生量に関する解析コードのみならず、数値実験炉プロジェクトとの連携を通じて、多様な物理課題に関する大規模シミュレーションコードや各種解析コードの整備・拡張、及びその実験検証が大幅な進展を遂げている。以下では、LHD プラズマを対象とした種々の研究課題に関する進展の概要のみを紹介する。

3次元 MHD 平衡解析として、入れ子状磁気面の存在を仮定する VMEC [3.4-6]が多数の解析の基盤として用いられるとともに、入れ子状磁気面の存在を仮定しない HINT/HINT2 [3.4-7, 3.4-8]の整備が進み、磁気島や周辺部のストキャスティク磁場をも取り込んだ様々な解析の基盤となっている。

MHD 安定性解析では、簡約化 MHD 方程式をマルチスケール時間発展法(平衡計算と不安定性計算の両者を交互に行い、平衡を計算する時に徐々にベータ値を上昇させる)で解く NORM [3.4-9]によって、LHD の磁気軸スイング実験における磁気軸位置と崩壊現象の発生の定量的関係についての考察 [3.4-10]などが行われた。さらに、MHD 方程式の時

間発展を 3 次元配位に対して直接に解く MIPS [3.4-11]の適用も進んだ。MIPS では、線形不安定な抵抗性バルーニングモード間のモード結合により、トロイダルモード数が 1 程度の低次モードが励起され、励起された低次モード自身のモード間結合により、大幅な圧力低下が起こることが示された [3.4-12]。さらに、LHD 実験で観測されている、崩壊現象が生じる直前に不安定モードの回転が停止し不安定性が急激に成長する現象に対して、プラズマフローによるモード回転がモードの成長を抑制しているのではないかと、という着想で、背景フローの 3 次元分布を考慮した MIPS 計算も進んでいる[3.4-13]。加えて、巨視的な現象を表す MHD モデルに、二流体効果や有限ラーマー半径効果などの微視的な効果を加えた拡張電磁流体力学モデルが整備され、LHD プラズマのバルーニング不安定性の二流体シミュレーションも行われた[3.4-14]。

周辺プラズマ解析では、3次元周辺プラズマ輸送コード EMC3-EIRENE [3.4-15]の計算領域をダイバータ板や第一壁まで拡張するために、周辺プラズマ全体を覆う計算グリッドの開発が行われた。この進展によって、開ダイバータ構造と閉ダイバータ構造の違いの中性ガス及びプラズマへの影響評価 [3.4-16]が可能となった。周辺部における炭素分光計測との比較を含めた不純物フローの研究[3.4-17]、ネオン及び窒素ガスパフ放電の不純物輸送研究[3.4-18]、ダスト輸送コード DUSTT と結合した不純物輸送研究[3.4-19]などが進展している。

新古典・乱流輸送解析にも大きな進展があった。大域的新古典輸送コード FORTEC-3D [3.4-20]と、局所近似に基づく従来の計算法との比較に際して、LHD プラズマを対象とした研究(さらに、他のヘリカル系配位への適用)が大きな役割を果たした。従来の局所近似で、磁気ドリフト項を、接線成分を含めて完全に無視してしまうことが、径電場によるドリフト項があまり大きくないイオンルートにおけるイオン新古典輸送の過大評価を引き起こしていることが明らかとなった [3.4-21]。FOTRTEC-3D は、高精度の新古典輸送解析として、LHD プラズマのフロー計測との比較や高イオン温度プラズマにおける新古典輸送の評価などに用いられている。また、乱流輸送研究は、ジャイロ運動論的ブラソフ方程式を解く GKV コード [3.4-22]によるこれまでの着実な進展や LHD プラズマへの適用[3.4-23]による実験検証などを経て、最近では、特に LHD 重水素実験の研究課題の主眼の一つである「同位体効果」に着目した研究が進展している。乱流状態から自発的に生成される帯状流を無撞着に取り入れたシミュレーションの結果、捕捉電子不安定性によって引き起こされた乱流はプラズマの熱・粒子輸送を増大させるが、捕捉電子とイオンの衝突が不安定性の成長を抑える働きをする、という新たな物理機構が発見された[3.4-24]。重水素プラズマでは波が成長しながら伝搬していく過程での衝突の働きが軽水素プラズマに比べて顕著であり、その結果として、乱流が抑制されると予測される。LHD 重水素実験において、同様の電子温度を実現するために必要な ECH 加熱パワーが、重水素プラズマの方が軽水素プラズマよりも小さい、という結果[3.4-25]が得られ、同位体効果の解明に向けた詳細比較が進展している。

LHD プラズマにおける高エネルギー粒子挙動に関するシミュレーション研究は、重水素実験での中性子計測データによって、より定量的議論が可能な段階となった。高エネルギー粒子駆動不安定性の理解と予測のため、MEGA コード[3.4-26]の適用が精力的に行われ、

アルヴェン固有モード、高エネルギー粒子駆動 GAM の空間分布など、3次元磁場構造での詳細な議論が行われている[3.4-27]。一方、NBI 加熱に伴う高エネルギー粒子の閉じ込めや関連する物理現象の解明に向けて、モンテカルロ法に基づく GNET コード[3.4-28]の LHD 実験結果との比較、実験解析への適用が行われている。重水素 NBI 加熱時の中性子発生率、トリトン閉じ込めの定量的な予測[3.4-29]に基づき、実験との詳細比較が進行している。また、プラズマ時間発展と複数イオン種との衝突を取り入れる拡張がなされ[3.4-4]、LHD 高イオン温度実験の加熱分布等も高精度に評価できるようになっている。GNET 等の磁気座標に基づくコードでは、最外殻磁気面 (LCFS) より外側での軌道を取り扱うことが難しい。LHD の外寄せ配位や高ベータ実験などでは、粒子軌道の磁気面からの逸脱が特に大きくなり、LCFS の外側での軌道が高エネルギー粒子閉じ込めにおいて重要となる。実座標を用いることで LCFS への再突入粒子を考慮することのできる MORH コード[3.4-30] が開発され、HINT2 の平衡を用いた軌道解析が行われている。また、統合解析スイート TASK [3.4-31]のモジュールであり、フォッカー・プランク方程式を解く TASK/FP の導入・整備により、NBI ブリップ実験におけるビームエネルギー分布関数の挙動解析[3.4-32]や、ビーム減衰過程における非線形衝突効果の検証計算[3.4-5]などが進展している。

LHD プラズマの統合輸送解析環境としては、LHD 実験解析型統合輸送解析スイート TASK3D-a (Analysis 版) の整備・適用が大幅に進展している。2012 年 9 月に初版 TASK3D-a01 をリリース[3.4-33]して以降、局所新古典熱・粒子拡散フラックスを評価する GSRAKE [3.4-34]、ECH 加熱分布を評価する LHDGauss [3.4-35]及び TRAVIS [3.4-36]、複数イオン種存在状況での新古典プラズマ流の解析のための DKES/PENTA [3.4-37] (プラズマシミュレータで計算実行するために必要な平衡や入力ファイルの自動的準備という緩い連携)、軽水素、重水素、ヘリウム存在下での NBI 加熱計算[3.4-38]などの機能拡張が行われた。これらの機能拡張[3.4-1]により、LHD 重水素実験における同位体効果研究の基盤となる解析データベースの作成が大きく進展した [3.4-39, 3.4-40]。

- [3.4-1] M. Yokoyama et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 126016.
- [3.4-2] S. Murakami et al., Trans. Fusion Technol. 27 (1995) 276.
- [3.4-3] K. Ogawa, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 60 (2018) 095010.
- [3.4-4] H. Yamaguchi and S. Murakami, Nucl. Fusion 56 (2016) 026003.
- [3.4-5] H. Nuga et al., accepted for publication in Nucl. Fusion (2018).
- [3.4-6] S.P. Hirshman and J. C. Whiston. Phys. Fluids 26 (1983) 3553.
- [3.4-7] T. Hayashi et al., Phys. Fluids B 2 (1990) 329 (1990).
- [3.4-8] Y. Suzuki et al., Nucl. Fusion 46 (2006) L19.
- [3.4-9] K. Ichiguchi, B. A. Carreras, J. Plasma Phys. 72 (2006) 1117.
- [3.4-10] K. Ichiguchi et al., Nucl. Fusion 55 (2015) 043019.
- [3.4-11] Y. Todo et al., Plasma and Fusion Res. 5 (2010) S2062.
- [3.4-12] M. Sato et al., Nuclear Fusion 57 (2017) 126023.
- [3.4-13] K. Ichiguchi et al., Proc. 26th IAEA Fusion Energy Conference, TH/P1-4, Kyoto, (2016).

- [3.4-14] H. Miura et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 076034.
- [3.4-15] Y. Feng et al., Contrib. Plasma Phys. 44 (2004) 57.
- [3.4-16] G. Kawamura et al., Contrib. Plasma Phys. 54 (2014) 437.
- [3.4-17] S. Dai et al., Nucl. Fusion 58 (2018) 096024.
- [3.4-18] G. Kawamura et al., Plasma Phys. Contr. Fusion 60 (2018) 84005.
- [3.4-19] M. Shoji et al., Nucl. Mater. Energy 12 (2017) 779.
- [3.4-20] S. Satake R. Kanno and H. Sugama, Plasma Fusion Res. 3 (2008) S1062.
- [3.4-21] B. Huang, S. Satake et al., Phys. Plasmas 24 (2017) 022503.
- [3.4-22] T.H. Watanabe and H. Sugama, Nuclear Fusion, 46 (2006) 24.
- [3.4-23] M. Nunami et al., Phys. Plasmas 19 (2012) 042504.
- [3.4-24] M. Nakata et al., Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 165002.
- [3.4-25] H. Takahashi et al., Nucl. Fusion 58 (2018) \*\*\*
- [3.4-26] Y. Todo et al., Phys. Plasmas 24 (2017) 081203.
- [3.4-27] H. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 175001.
- [3.4-28] S. Murakami et al., Nucl. Fusion 46 (2006) S425.
- [3.4-29] M. Homma et al., Plasma Fusion Res. 10 (2015) 3403050.
- [3.4-30] R. Seki et al., Plasma Fusion Res. 5 (2010) 014.
- [3.4-31] A. Fukuyama, <http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task>
- [3.4-32] H. Nuga et al., European Physics Society Conference 2017, P1.146 (Belfast, Jun. 2017).
- [3.4-33] M. Yokoyama et al., Plasma Fusion Res., Special Issue 7 (2012) 2403011.
- [3.4-34] C. D. Beidler and W. D. D'haeseleer, Plasma Phys. Contr. Fusion 37(1995) 463.
- [3.4-35] T. Ii. Tsujimura et al., Nucl. Fusion 55(2015)123019.
- [3.4-36] N. Marushchenko et al., Plasma Fusion Res. 2(2007) S1129.
- [3.4-37] D. A. Spong et al., Phys. Plasmas 12(2005) 056114.
- [3.4-38] P. Vincenzi et al., Plasma Phys. Control. Fusion 58(2016) 125008.
- [3.4-39] H. Yamada et al., 27th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P3-5 (Ahmedabad, Oct. 2018).
- [3.4-40] K. Tanaka et al., 27th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P3-6 (Ahmedabad, Oct. 2018).

### 3.5 安全管理機器

#### 3.5.1 法令に基づく管理区域の設定

##### (1) 管理区域

大型ヘリカル実験棟の管理区域は、一カ所の出入り口で入退管理を徹底させるため、入退管理室から全ての区域に行くことができるように一体化した管理区域を設定している。図3.5.1-1から図3.5.1-4に各階の管理区域平面図を示す。各階へは、管理区域内の階段又はエレベーターを利用して移動することができる。

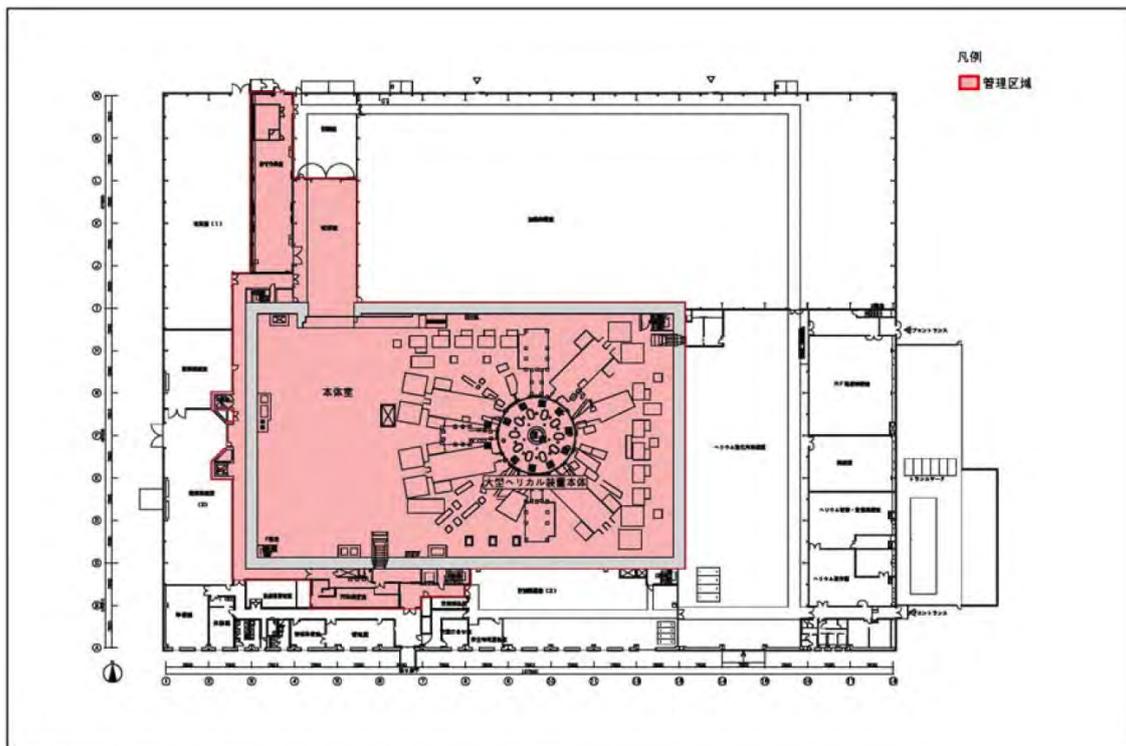


図 3.5.1-1 大型ヘリカル実験棟 1階管理区域平面図

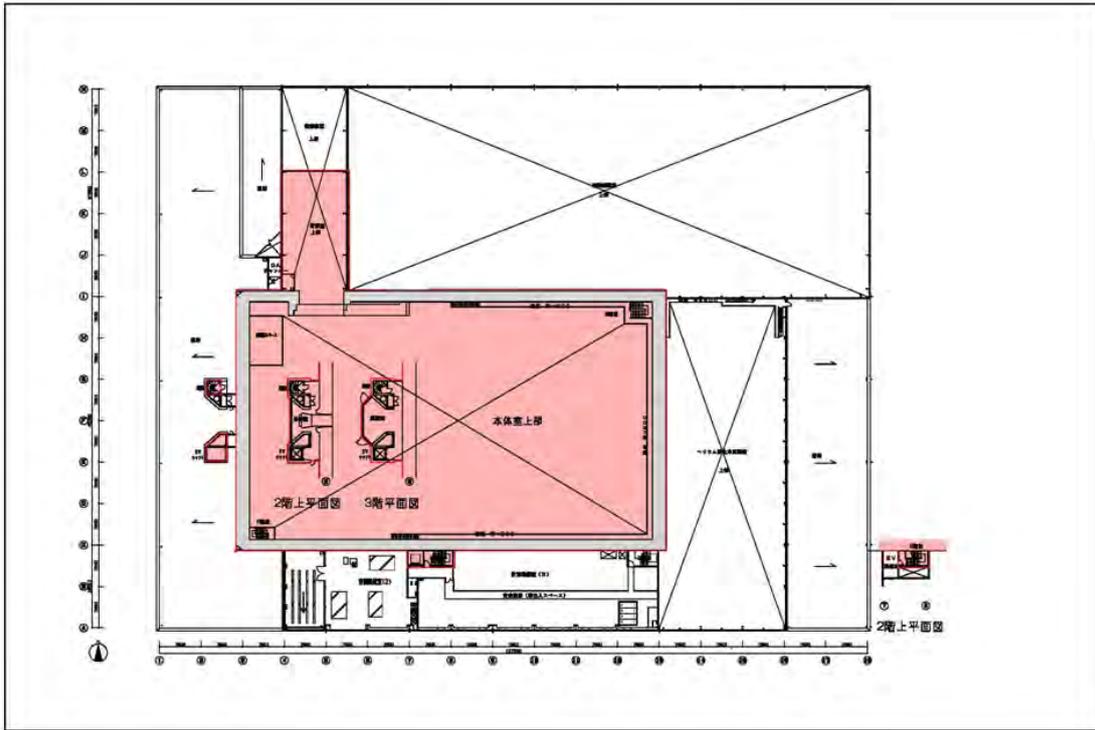


図 3.5.1-2 大型ヘリカル実験棟 2 階管理区域平面図

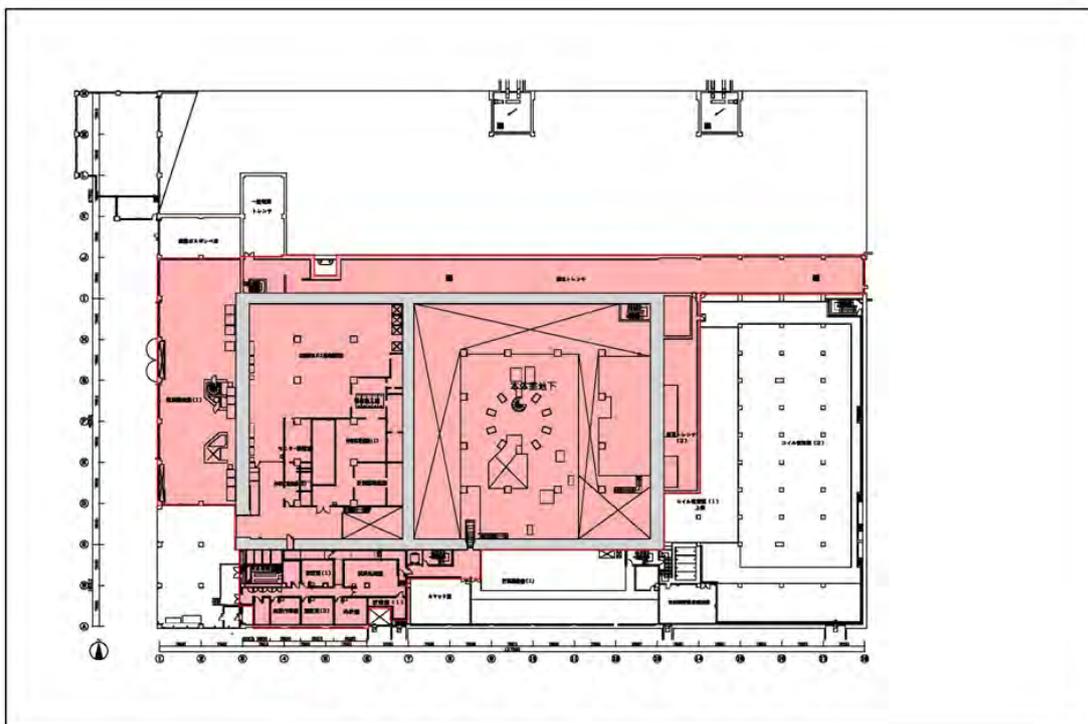


図 3.5.1-3 大型ヘリカル実験棟地下 1 階管理区域平面図

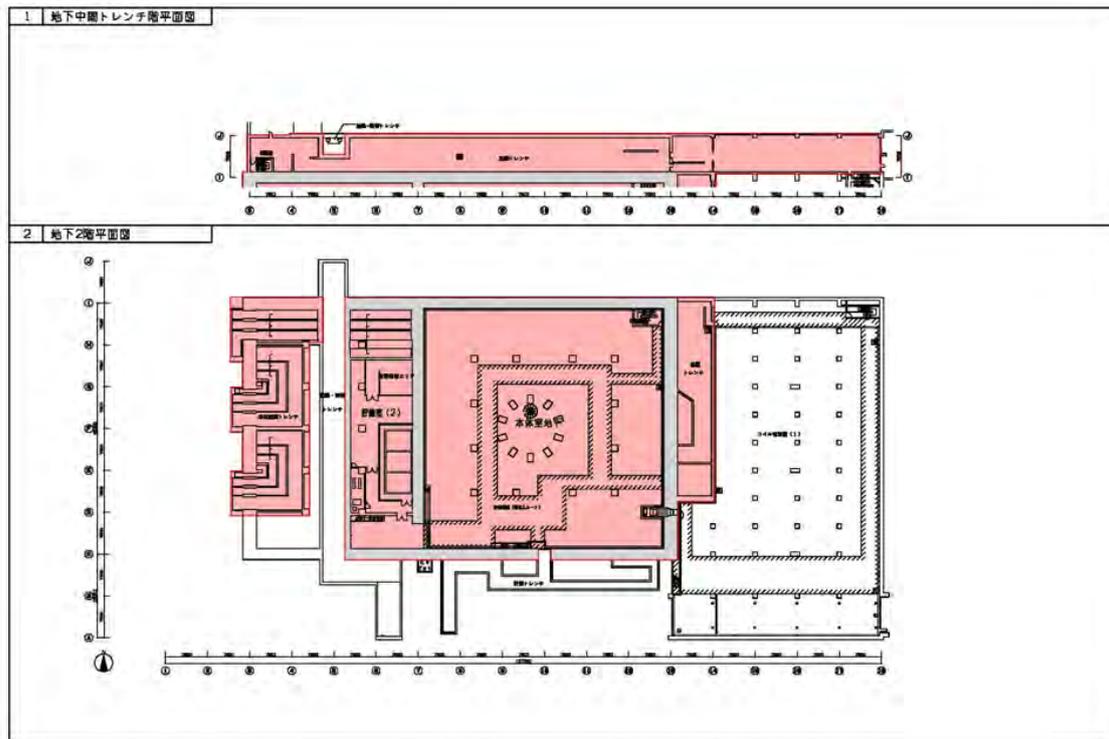


図 3.5.1-4 大型ヘリカル実験棟地下2階及び中間トレンチ管理区域平面図

## (2) 入退管理

大型ヘリカル実験棟1階の入退管理室に入退ゲート(図3.5.1-5)を設置し、大型ヘリカル実験棟の管理区域への入退を管理している。管理区域に入るには、必ずこのゲートを通過するようになっている。この入退ゲートはセキュリティ機能搭載のQRコード(以下、SQRC)によって認証を行うこととし、その個人認証用のSQRCを個人線量計に貼付し、配付している(図3.5.1-6)。従って、個人線量計を携帯していない者は、ゲートで認証することができず、入域できない。このようなシステムにより、入域者全員の個人線量計携帯を管理することができる。

なお、見学者等の一時立入者にはSQRCを貼った電子線量計を渡し、電子線量計にて入退ゲートの認証を行うこととしている。なお、セキュリティ機能によりコピーができなくなっているため、写真のようにSQRCは黒く撮影されるが、QRコードが書き込まれている。



図 3.5.1-5 入退管理室に設置された入退ゲート



図 3.5.1-6 SQRC の貼られた個人線量計と電子線量計  
(セキュリティ機能のため QR コードは黒く写る)

### (3) 電気錠

大型ヘリカル実験棟の主な扉は電気錠となっており、開閉状態は入退管理システムにより PC 上で、図3.5.1-7のように確認することができる。この画面上で電気錠の解錠・施錠の操作も行える。また、次の3.5.2節で述べる「放射線総合監視システム」の「ITV」により、扉付近の映像を入退管理室で視認することができるため、荷物の搬入等で扉を開ける場合は、入退管理室で電気錠の操作、監視ができるようになっている。

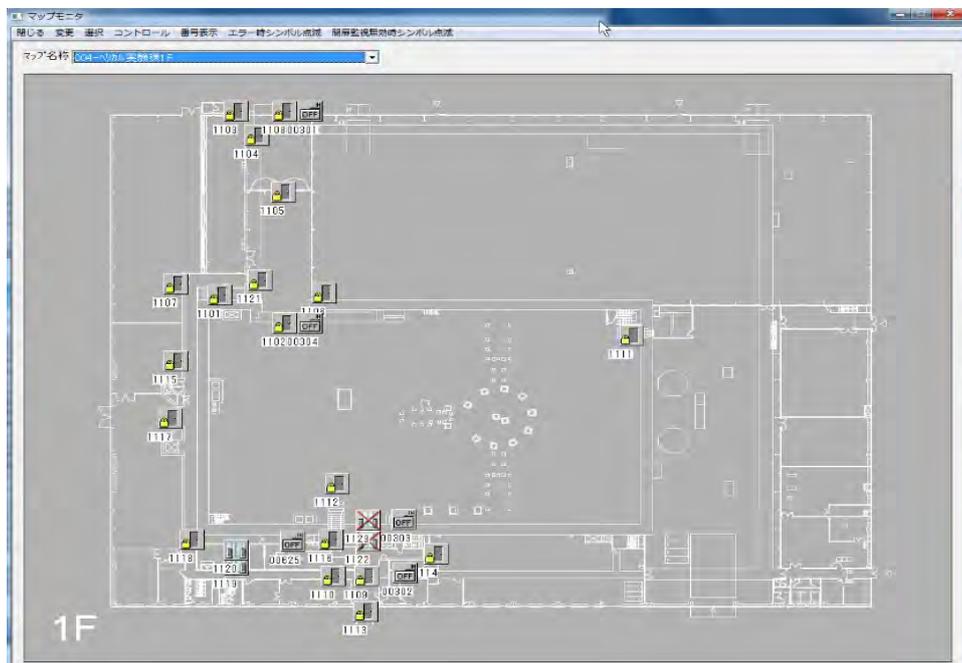


図 3.5.1-7 入退管理システムの電気錠状態モニター

本体室、本体地下室等は重水素プラズマ実験中に入室できない領域となっている。この領域に入域するには、入退管理室に設置された入退ゲートの他に更にゲートを通る必

要がある。これは実験開始前にこの領域に入域者がいないことを確認するためである。管理区域からの退出にあたっては、汚染検査室等で各種測定を行い、汚染がないことを確認してから退出する。例として、LHD 本体室(重水素実験中に入室できない領域)からの退出を説明する。本体室から出た者は、最初のゲートを通る。ゲートの先にある汚染検査室前室には、サーベイメータ及び搬出モニタが設置されているので、これにより作業者の汚染や持ち込んだ工具等を検査する。次に汚染検査室にて手を洗い、ハンドフットクロスモニタにて、手足の汚染をチェックする。このハンドフットクロスモニタは入退ゲートと連動しており、汚染のないことが確認されなければ入退ゲートが開かないシステムとなっている。ハンドフットクロスモニタでの検査が終わった後、作業着の着替えや靴の履き替えを行い、入退ゲートから退出する。なお、LHD 真空容器内作業を行う作業者は、作業の前後に呼気モニタによる検査も実施することとしている。呼気は、汚染検査室に設置された呼気捕集装置で採取され、後に液体シンチレーション計数装置にて測定される。これら一連の流れを図 3.5.1-8 に示す。

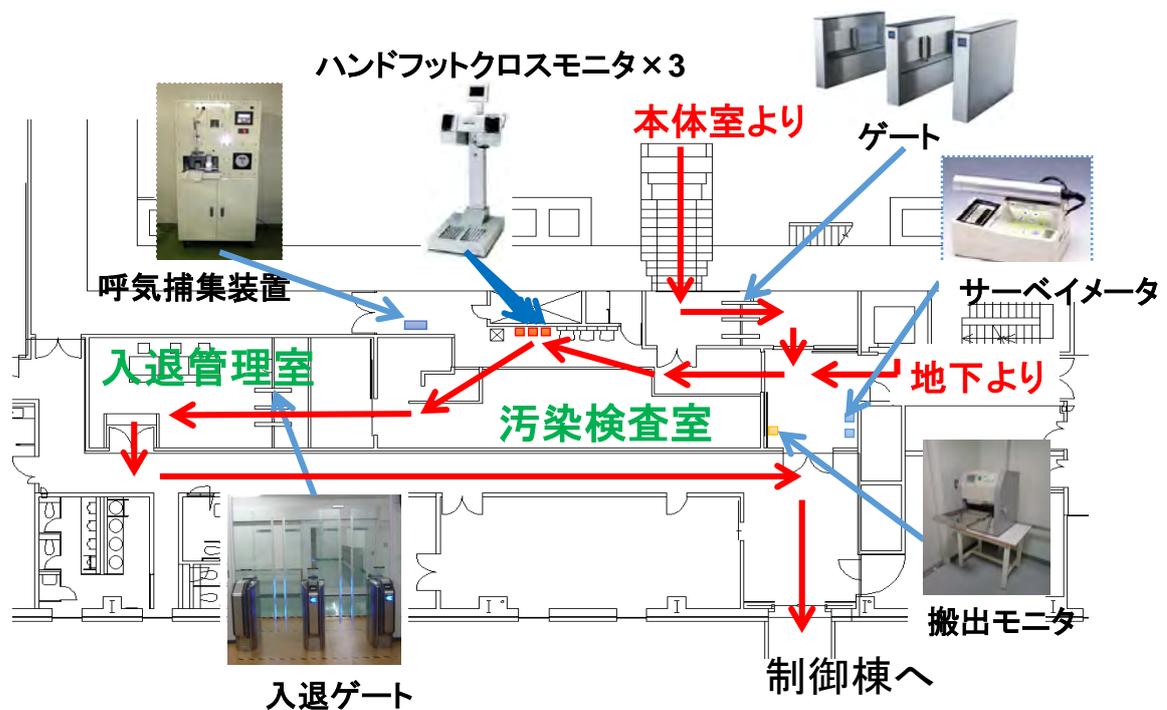


図 3.5.1-8 汚染検査室、及び入退管理室の退出時の流れ

入退管理室では、ITVにより出入り口付近の映像が監視できる他、放射線モニタリングシステム(RMSAFE)、排水管理装置、排水モニタ、室内ガスモニタ等の運転状況やデータを見ることができるようになっている。

汚染検査室には、汚染の拡大防止のため、作業着の着替え、履物の履き替え、手袋やヘルメットの着用等を行うエリア(更衣室)を設けている。入退管理室、及び汚染検査室の様子を図3.5.1-9に示す。また、汚染検査室には、汚染が見つかった場合に除染するための設備として、シャワーや洗濯機が設置されている。



図 3.5.1-9 入退管理室及び汚染検査室(更衣室)

### 3.5.2 放射線総合監視システム

放射線安全管理の情報を一元的に監視管理するために、放射線総合監視システムを構築し、制御棟の制御室で監視できるようにした。この放射線総合監視システムは、各種放射線管理機器からの情報を取り込み、一元的に管理するもので、運用において、管理値よりも低い値(規定値)を警報レベルとして設定し、その値に達した時は、警報を発して実験を自動的に停止させる。また、放射線測定器が正常に稼働していない、実験時に閉まっているべき扉が開いているなどの実験条件が整っていない場合は実験が始められない、もしくは、実験中に条件が崩れた場合は実験を停止させるインターロックシステムが構築されている。

稼働状態及び測定データがリアルタイムで数値が出る装置については、その値が制御室前方に設置する監視画面に表示される。また、入退管理システムにより、入室者の管理及び扉の電気錠の管理を行う。それに合わせて、ITVにて扉や本体室の監視を行うことができるシステムとした。放射線総合監視システムの概略を図 3.5.2-1 に示す。

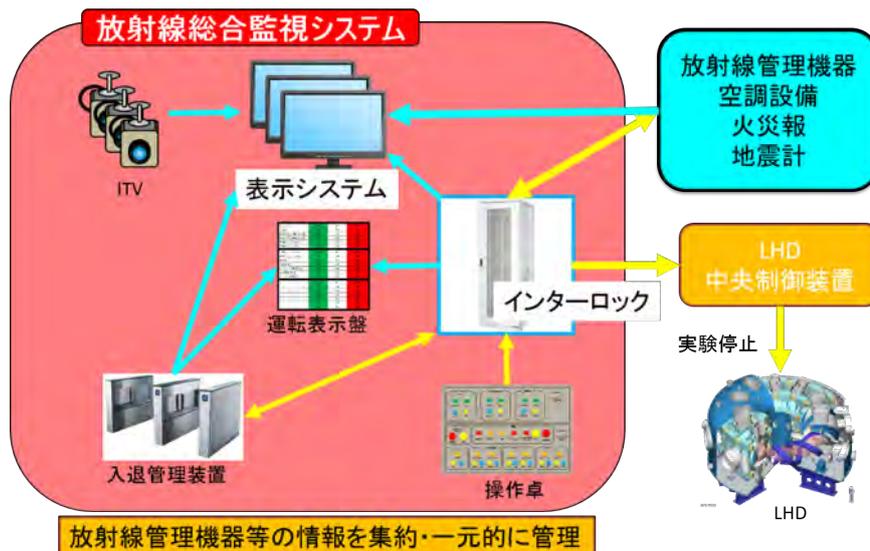


図 3.5.2-1 放射線総合監視システムの概略図

放射線総合監視システムでの主な放射線管理機器からのインターロック信号及び総合監視画面への運転状況データの流れを図 3.5.2-2 に示す。

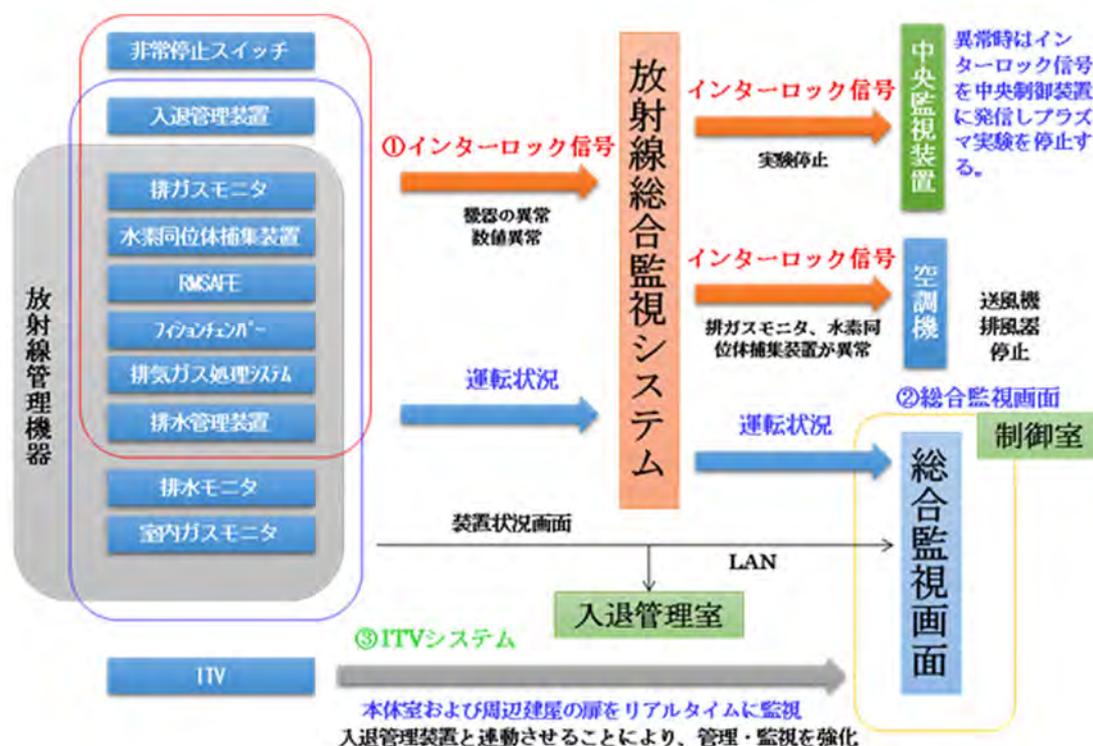


図 3.5.2-2 放射線総合監視システムの流れ図

### (1) インターロック

放射線総合監視システムは、上で示したように入退管理システム及び放射線管理機器からのインターロック信号により、LHD実験を自動停止させる機能を持つ。実験開始時に閉まっていなければならない扉が開いている場合は、実験開始に必要な通電モードやコンディショニングモードへの移行ができない。また、実験中に開いてはいけない扉が開くようなことがあれば、インターロックにより実験が停止する。また、本体室、本体室地下に入室者がいる場合も、実験が開始できない。インターロックシステムに組み込まれる放射線管理機器としては、中性子発生量を測定するフィッションチェンバー、プラズマ実験中に発生するトリチウムの除去を行う排気ガス処理システム、敷地境界や大型ヘリカル実験棟内の空間線量率を監視するRMSAFE、排気塔から出る空気中の放射能濃度を監視する排気ガスモニタと水素同位体捕集装置等が含まれる。

フィッションチェンバーは3台設置され、そのうち1台でも故障した場合(軽故障)には、実験を一旦停止させる。また、3台中2台が故障した場合(重故障)には、実験を再開しない。

排気ガスモニタと水素同位体捕集装置は、それぞれバックアップのため2台用意した。なお、水素同位体捕集装置は、捕集した後に液体シンチレーション計数装置にて測定を行うためリアルタイムでデータが出ないので、担当者が液体シンチレーション計数装置の最新の

測定結果を確認して、規定値以上の場合は停止信号を入れる。

排気ガスの放射能濃度が設定値より高くなった場合、もしくは計測ができなくなった場合は、排気を止めるために送風機・排風機を停止させる。排気ガスモニタと水素同位体捕集装置が停止した場合、又は計測値が規定値を超えた場合は、送風機・排風機を停止させ、その前もしくは後ろのダンパーを閉じる。

排水は、測定や下水への排水は人の操作によるバッチ処理であるため、インターロックシステムには入れない。満水などの警報信号は画面で確認できる。

## (2)ITV

入退管理による扉の管理とともにITVにより管理区域内の扉、本体室、大型ヘリカル実験棟出入口の状況をリアルタイムに監視することができる。これにより災害時の状況の確認、不審者の侵入の確認等が可能になり、セキュリティ対策の強化となった。

## (3)総合監視画面

入退管理状況、放射線管理機器の状態及びデータ、ITVの映像を制御室で監視できる総合監視画面と運転表示盤を制御室前方左に設置した(図 3.5.2.-3)。これにより放射線管理機器からの信号をリアルタイムで監視できる。放射線監視運転員は総合監視画面により 365 日 24 時間、放射線総合監視システムを監視している(図 3.5.2-4)。



図 3.5.2.-3 総合監視画面



図 3.5.2.-4 制御室での監視状況

### 3.5.3 放射線計測

#### 3.5.3.1 LHD重水素実験に起因する敷地境界線量(年間)

LHD重水素実験に起因する放射線量を正確に計測するため、実験開始10秒前からデータを取得し、このデータからバックグラウンド線量率を評価し、プラズマ実験中のデータから差し引いた。RMSAFEのICポストで測定した値をもって敷地境界線量とする。図3.5.3.1-1に、RMSAFEのICポスト地点、及びLHD重水素実験に起因する敷地境界線量の評価のためのデータ収集システム動作概要を、図3.5.3.1-2に、第19サイクル実験期間のLHD重水素実験開始以降のRMSAFEによる敷地境界積算線量の推移をそれぞれ示す。第19サイクル実験期間のLHD重水素実験開始以降の研究所管理値(年間)に対する敷地境界積算線量の割合は、 $0.00 \pm 0.05\%$ であった。

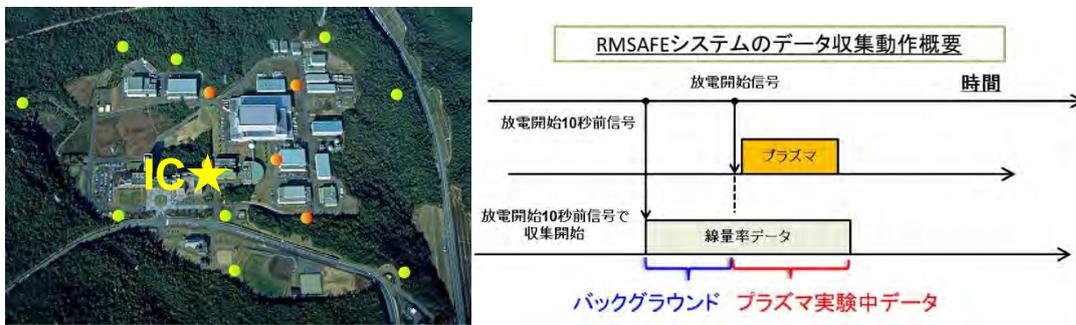


図 3.5.3.1-1 RMSAFEのICポスト地点(左図)、及びLHD重水素実験に起因する敷地境界線量の評価のためのデータ収集システム動作概要(右図)

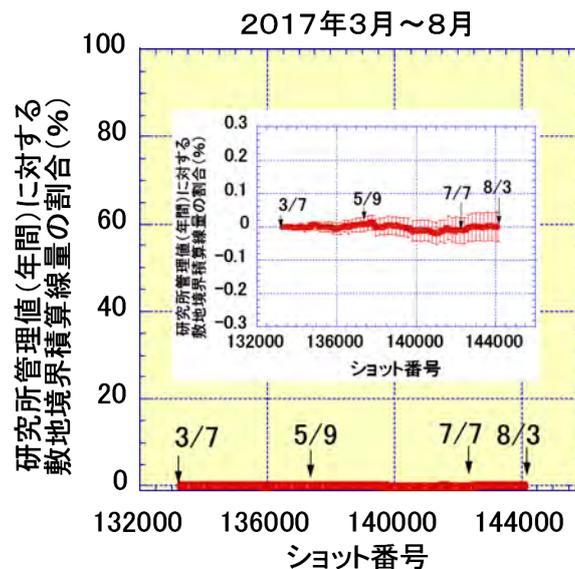


図 3.5.3.1-2 第19サイクル実験期間のLHD重水素実験開始以降のRMSAFEによる敷地境界積算線量の推移

### 3.5.3.2 環境水中トリチウム濃度の推移

核融合科学研究所とその周辺において環境水を採取し、低バックグラウンド液体シンチレーション計数装置を用いてトリチウム濃度測定を行っている[3.5.2-2]。環境水の採取地点と環境水中トリチウム濃度の推移を図 3.5.3.2-1 に示す。LHD重水素実験開始以降の環境水中トリチウム濃度は、過去の変動範囲内であった。

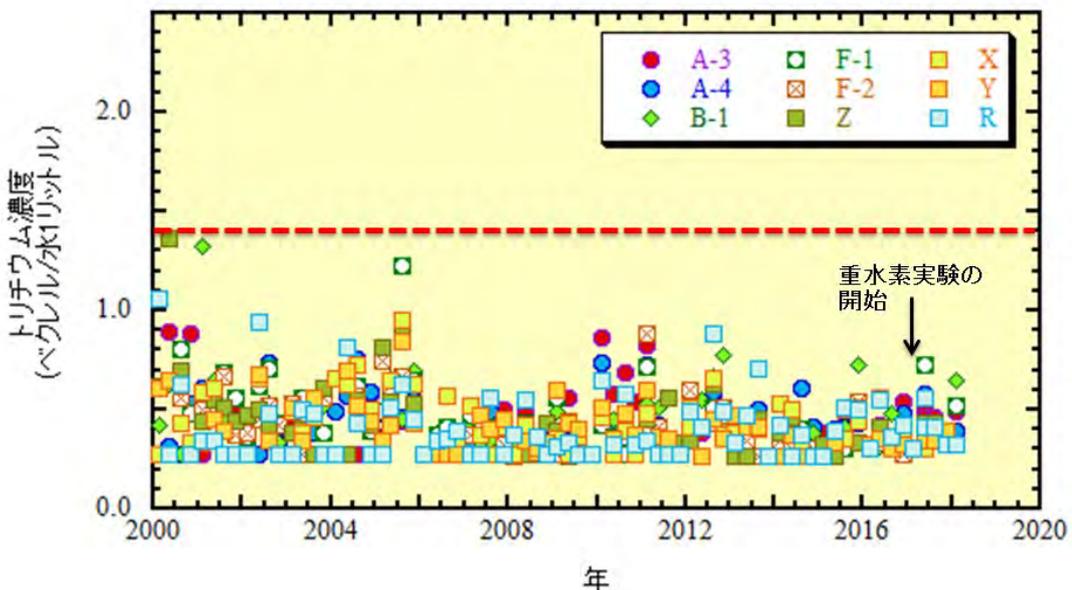
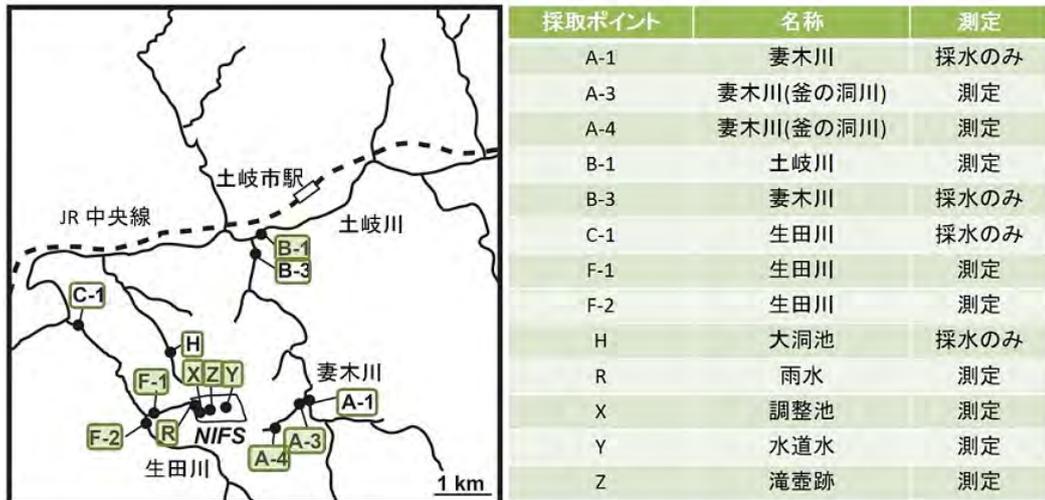


図 3.5.3.2-1 環境水の採取地点(上図)と環境水中トリチウム濃度推移(下図)(赤点線:2000～2016年の変動範囲:検出下限値以下(ND)～1.4 Bq/l)

### 3.5.3.3 環境放射線量の推移

土岐市内、多治見市内、及び核融合科学研究所敷地内にガラス線量計を設置して、環境放射線量の測定を行っている[3.5.3-3, 3.5.3-4, 3.5.3-5]。ガラス線量計の設置地点を図3.5.3.3-1に示す。また、土岐市内、多治見市内、及び研究所敷地内における環境放射線量の推移を図3.5.3.3-2に示す。LHD重水素実験に起因する環境放射線量の変化は認められなかった。



図 3.5.3.3-1 ガラス線量計の設置地点(上図:土岐市内及び多治見市内、下図:核融合科学研究所敷地内)

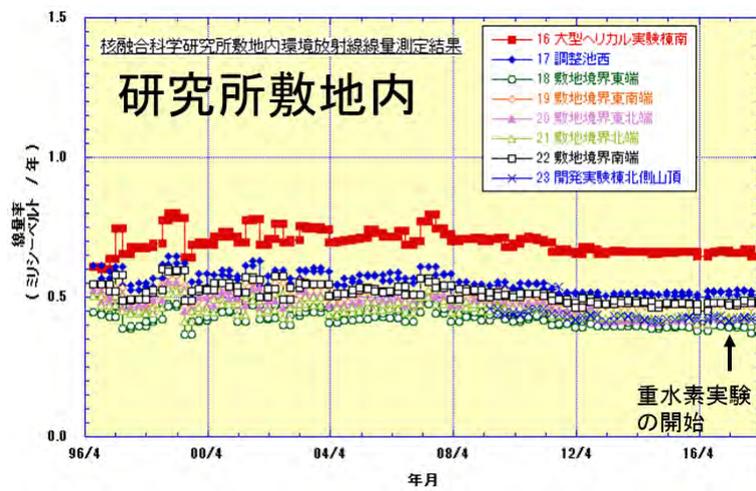
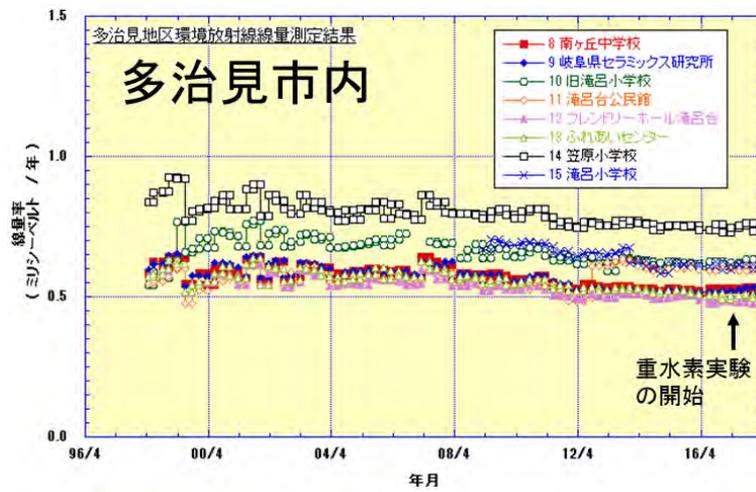
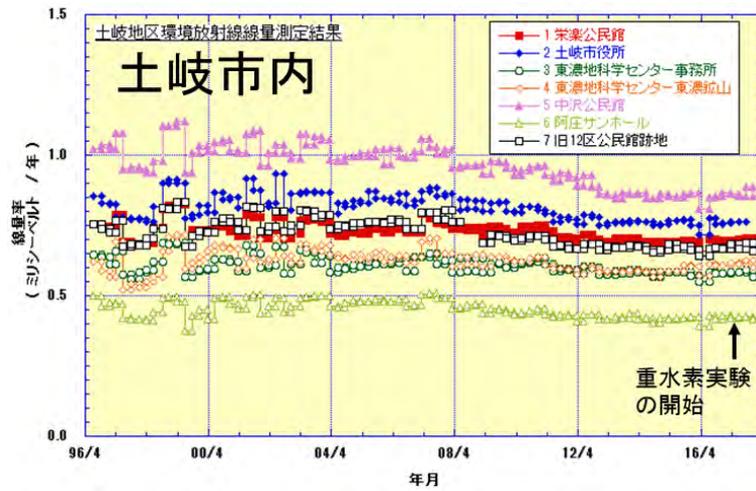


図 3.5.3.3-2 土岐市内(上図)、多治見市内(中図)、及び核融合科学研究所敷地内(下図)における環境放射線量の推移

### 3.5.3.4 大型ヘリカル実験棟本体室内の中性子分布計測

プラズマ実験中に発生する中性子の本体室内分布計測を行った。インジウム箔を本体室床面に設置し、実験後に取り出し、その放射化量を測定することで中性子束を推定した。図 3.5.3.4-1 に大型ヘリカル実験棟本体室内床面における熱中性子束分布を示す[3.5.3-6]。

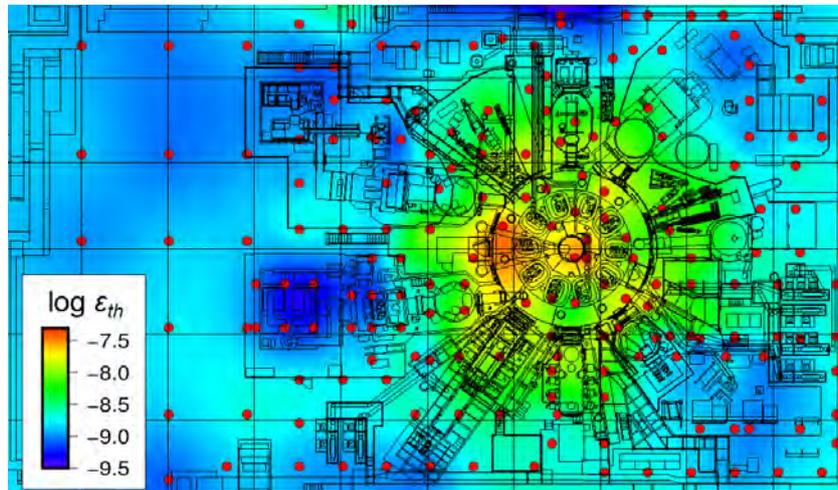


図 3.5.3.4-1 大型ヘリカル実験棟本体室内床面における熱中性子束分布 (赤点:測定点の位置)

[3.5.3-1] LHD重水素実験放射線管理年報(2017年3月6日～2018年3月31日)

[3.5.3-2] N. Akata, M. Tanaka, H. Kato, H. Yamanishi, H. Kakiuchi, H. Hayashi, H.

Miyake and K. Nishimura, “Long-term monitoring of tritium concentration in environmental water samples collected at Tono area, Japan”, Plasma Fusion Res. Lett. 11 (2016) 1305032.

[3.5.3-3] H. Obayashi, H. Amano, K. Komura, Y. Sakuma, J. Kodaira, H. Sakamoto,

Y. Mizuguchi, T. Hayashi and K.L. Tan, “Preliminary surveillance of prospective site - Environmental considerations -”, Nucl. Eng. Des., 4 (1987) 425-446.

[3.5.3-4] 山西 弘城, 佐久間 洋一, 中村 尚司, “核融合施設の放射線計測と監視技術”, プラズマ・核融合学会誌, 74 (1998) 717-727.

[3.5.3-5] Y.R. Akhmad, Y Ikebe, M. Shimo, T. Iida, H. Obayashi, Y. Sakuma, H. Yamanishi, and J. Kodaira, “Separation methods of TLD dose components for environmental radiation monitoring”, Hoken Butsuri, 29 (1994) 399-409.

[3.5.3-6] M. Kobayashi, T. Tanaka, T. Nishitani, K. Ogawa, M. Isobe, A. Kato, T. Saze, S. Yoshihashi, M. Osakabe, LHD Experiment Group, “First measurements of thermal neutron distribution in the LHD torus hall generated by deuterium experiments”, Fusion Eng. Des., 137 (2018) 191-195.

### 3.5.4 トリチウム除去装置(排気ガス処理システム)

LHD の重水素実験で発生するトリチウム量は、年間最大 1.5 Ci (55.5 GBq)を想定している。これは、日本で初めてプラズマ発生装置に認可された JT-60U(量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所)と同じレベルである。JT-60U では、真空容器から排出されるトリチウムを、トリチウム濃度が施設排出規制値以下であることを確認し、排気塔から放出した [3.5.4-1]。核融合科学研究所では、排気塔からのトリチウム年間放出量を 0.1 Ci (3.7 GBq) 以下と規定している。そのため、安全管理計画に基づいて LHD 及び周辺付帯設備からの排気ガスに含まれるトリチウムを回収除去する排気ガス処理システムを設置した。要求されるトリチウム回収性能は 95%以上である。トリチウムの回収手法は、触媒酸化法と水分回収法を組み合わせた既存の方式とした。この手法はトリチウム取扱施設で運用され、実績のある方式である [3.5.4-2, 3]。

重水素プラズマ実験では、LHD や周辺機器の運転状況、実験準備や実験条件、メンテナンス作業などにより被処理ガスの組成や流量が変わる[3.5.4-4]。従って、排気ガス処理システムは、非定常かつ広範囲の処理流量/水素濃度、実験機器の多様な排気要請に対応しなければならない。これらの処理要件を満たすため、処理仕様の異なる 2 種類のトリチウム除去装置、酸化触媒・吸湿剤型除去装置(以下、MS 型装置)と酸化触媒・高分子膜型除去装置(以下、PM 型装置)を設計し、2014 年 12 月より建設を開始した。排気ガス処理システムは、水素ガスを用いた総合性能試験を経て 2016 年 3 月に竣工した [3.5.4-5]。総合性能試験結果を基にシステムの最適化などを行い、2016 年 12 月から運用を開始した。2017 年 3 月から開始した重水素実験で適用され、実験終了後のメンテナンス期間を含めて、現在まで問題なく運用されている。排気ガス処理システムの外観写真を図 3.5.4-1 に示す。以下に各装置の概要と運用結果を簡単に記載する。



図 3.5.4-1 排気ガス処理システムの外観

## (1) MS 型装置

MS 型装置は、プラズマ実験期間の真空排気ガス処理(小流量/高濃度水素・トリチウム)に適用している。MS 型装置の概略構成を図 3.5.4-2 に示す。MS 型装置には、主に主系統、貯留系統、吸湿剤の再生系統がある。主系統は、主にプラズマ実験中の排気ガス処理を目的として、水素ガスの酸化処理用低温酸化触媒(200℃)、炭化水素ガスの酸化処理用高温酸化触媒(450℃)と 2 塔切り替え方式の吸湿剤から構成される。週末に行われる NBI のクライオポンプ再生運転時には、一時的に大量の水素ガスが排気されるため、貯留系統内の大型タンクに排気ガスを貯留する。貯留した排気ガスは、水素濃度が 1%を超えないように流量を制御しながら主系統に導入して回収処理を行う。吸湿剤は定期的に切り替えて回収処理を行い、使用していた吸湿剤は再生系統を用いてトリチウム含有水の加熱脱着処理を行う。

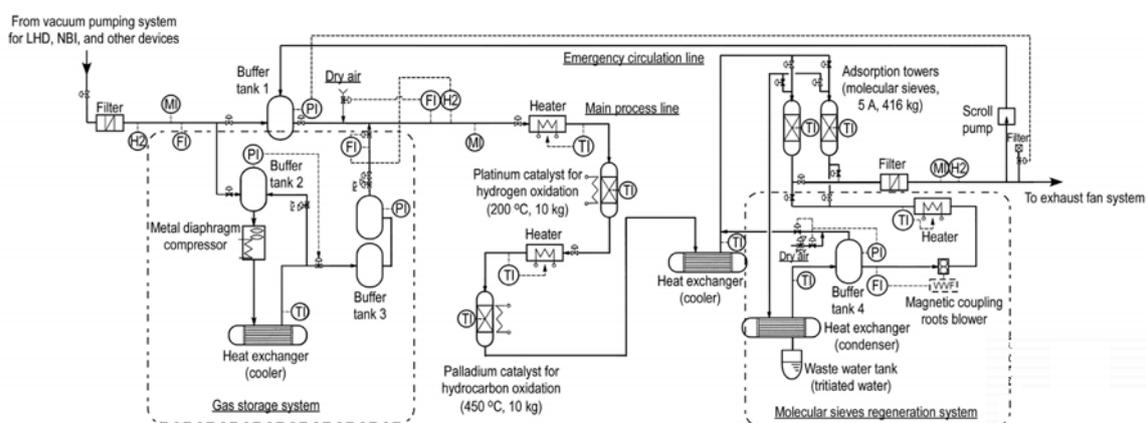


図 3.5.4-2 MS 型装置 概略構成図 [3.5.4-5]

## (2) PM 型装置

PM 型装置は、真空容器の粗引き排気ガス処理や、保守作業期間の真空容器内パージ空気処理(大流量/極低濃度トリチウム)に適用している。PM 型装置の概略構成を図 3.5.4-3 に示す。PM 型装置では、300 Nm<sup>3</sup>/h のパージガス流量に対応しなければならない。吸湿剤で大風量のガスを処理するためには、大量の吸着剤が必要となり、装置システムが大きく、設置場所を確保することが困難となる。そこで、水分回収手法として高分子膜分離法を用いた [3.5.4.-6, 7]。高分子膜分離法は、小型で連続処理が可能であるため設置面積が小さく、再生運転が不要であるためエネルギー消費量も低減できる。一方、真空容器粗引き排気運転時の非定常な排気ガス処理に対応するため、吸着塔も 1 塔設置した。

真空容器メンテナンス時は、真空容器内に本体室内の空気を取り入れて作業従事者の作業環境を確保する。真空容器内をパージした空気には、僅かであるがトリチウム水蒸気が含まれる。パージ空気中のトリチウムは極低濃度となるため、PM 型装置の入口で比例計数管によりトリチウム濃度を監視し、トリチウム濃度が  $6 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>3</sup> (排気塔トリチウム濃度換算値: 約  $1.5 \times 10^{-4}$  Bq/cm<sup>3</sup>)を下回る場合は、メンテナンスモードに切り替えて排気塔へ排出した。

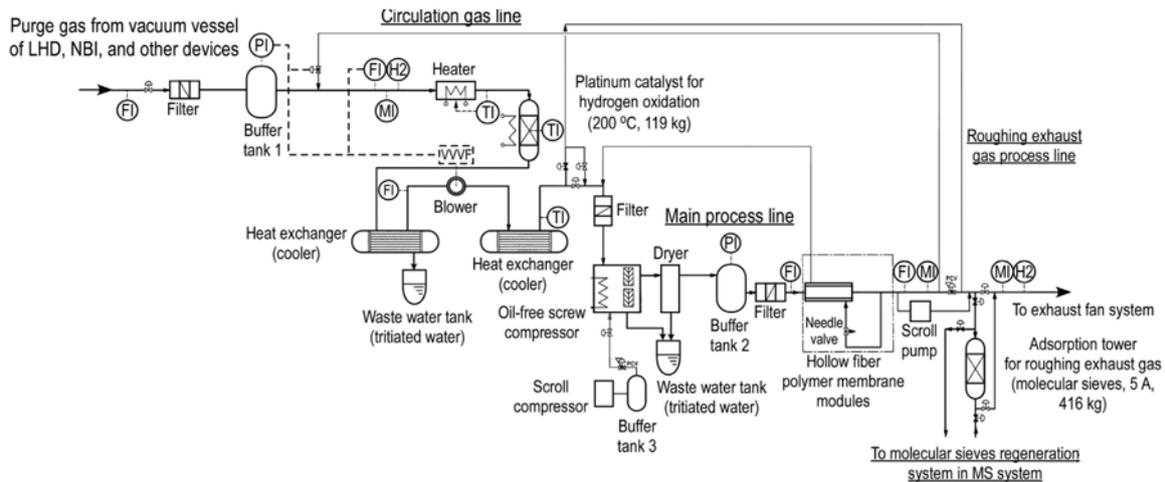


図 3.5.4-3 PM 型装置 概略構成図 [3.5.4-5]

### (3) 運用結果

重水素実験で生成されたトリチウムは、実験ガスである水素・重水素ガスとともに排気され、排気ガス処理システムで回収した。トリチウム回収率は 95%以上を達成し、開発した排気ガス処理システムで、極少量のトリチウムも回収除去できることを実証した。回収されたトリチウム含有水は、定期的な地域毎の集荷に合わせて公益社団法人日本アイソトープ協会へ引き渡した [3.5.4-8]。

[3.5.4-1] A. Oikawa et al., Fusion Sci. Technol. **41** (2002) 612-616.

[3.5.4-2] “Safe Handling of Tritium: Review of data and experience”, IAEA Technical Reports Series No. 324, (1991).

[3.5.4-3] “Tritium Handling and Safe Storage”, DOE-STD-1129-2015, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., (2015).

[3.5.4-4] M. Tanaka et al., Plasma Fusion Res. **11** (2016) 2405055.

[3.5.4-5] M. Tanaka et al., Fusion Eng. Des. **127** (2018) 275-283.

[3.5.4-6] Y. Asakura et al., J. Nucl. Sci. Technol. **49** (2012) 1018-1027.

[3.5.4-7] M. Tanaka, Fusion Eng. Des. **136** (2018) 141-145.

[3.5.4-8] 「LHD重水素実験放射線管理年報(2017年3月6日～2018年3月31日)」、核融合科学研究所 重水素実験推進本部 (2018).

## 4. 重水素実験の初期成果と今後の研究展開

### 4.1 運転領域の拡大

LHD における重水素実験計画では、同位体効果を活用した運転領域拡大を実証するために、重水素ビームによるNBI加熱が計画され、垂直NBIの入射電力が12MWから18MWに増強された。これらの加熱装置を活用することで可能となる高温度領域の拡大と関連する輸送研究を重点課題として位置付け、以下に示す課題に取り組む計画を遂行している[4.1-1]。

- (1) 高温度領域の拡大
- (2) 同位体効果の検証とその活用
- (3) 乱流輸送特性の検証
- (4) 不純物輸送機構の同定

これらの課題は、高性能化テーマグループとコア輸送テーマグループが協力して取り組んでいる。ここでは、重水素実験の初期成果として、LHD の第 19 サイクル実験で集中的に取り組まれた高イオン温度領域拡大に関する結果を上記 4 項目に沿ってまとめる。

#### 4.1.1 高温度領域の拡大

重水素実験において、ヘリカル系で初めてイオン温度 10keV を達成した[4.1-2,-3]。図 4.1.1-1 にそのプラズマを示す。コア領域に急峻なイオン温度勾配(イオン内部輸送障壁:イオン ITB)が形成され、電子温度の約 2 倍のイオン温度が実現している。放電波形には、間欠的な放射損失の増大とそれに同期した中性子発生率の減少、また、放電後半には、中心イオン温度の減少が観測されている。これは、高速イオン励起交換型 MHD 不安定性(EIC)の間欠的不安定化によるものである。更なる高イオン温度領域拡大やイオン ITB の定常化には、この EIC 制御が重要になることを見出したことは、新しい発見であった。初期的な結果ではあるが、ECH 加熱の重畳や RMP の重畳による EIC の安定化も観測されており、今後、更なる制御手法の開発が期待されている。

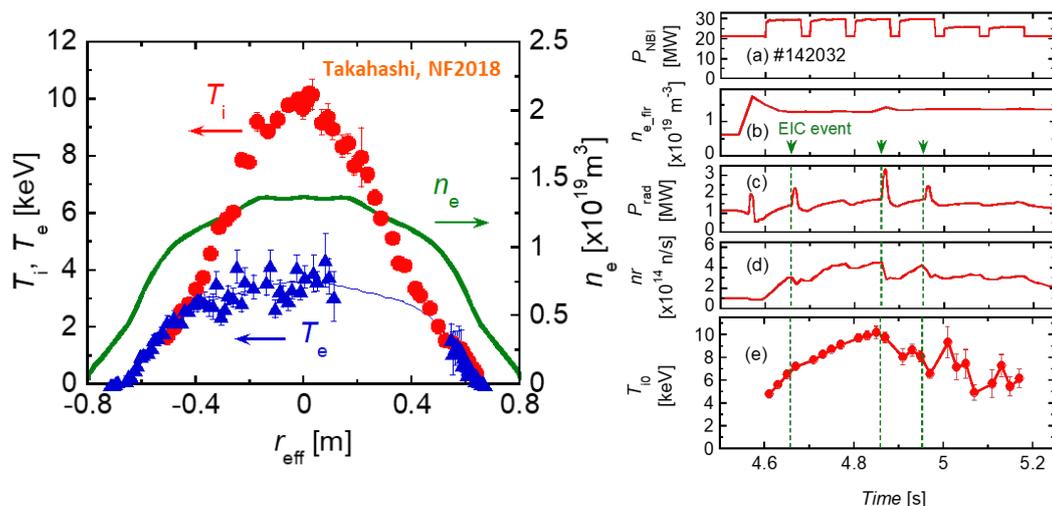


図 4.1.1-1 (左)イオン温度、電子温度、電子密度の分布。(右)放電波形(a)NBI 加熱、(b) 線平均密度、(c) 放射損失パワー、(d) 中性子発生率、(e) 中心イオン温度。

### 4.1.2 同位体効果の検証とその活用

イオン ITB プラズマにおける同位体効果検証のために、重水素を含むプラズマと重水素を含まないプラズマの比較を行った結果を図 4.1.2-1 に示す。中心イオン温度は、重水素を含むプラズマの方が高いことが分かる。この2つのプラズマは、加熱パワーもイオン種比率も異なるため、GyroBohm 則に沿った規格化をした熱輸送を比較した。重水素を含むプラズマは、コア領域と周辺領域でイオン熱輸送が低減していることが分かる。

GyroKinetic Vlasov (GKV) コードを用いた線形成長率の計算は、コア領域でイオン温度勾配(ITG)モードが不安定化し、周辺では、捕捉電子モードが不安定化することが示された。この2つの放電の比較では、重水素を含むプラズマの方が、温度勾配が大きいにも関わらず、ほぼ同程度のモードの成長率が得られており、実験と矛盾しない結果が得られている。

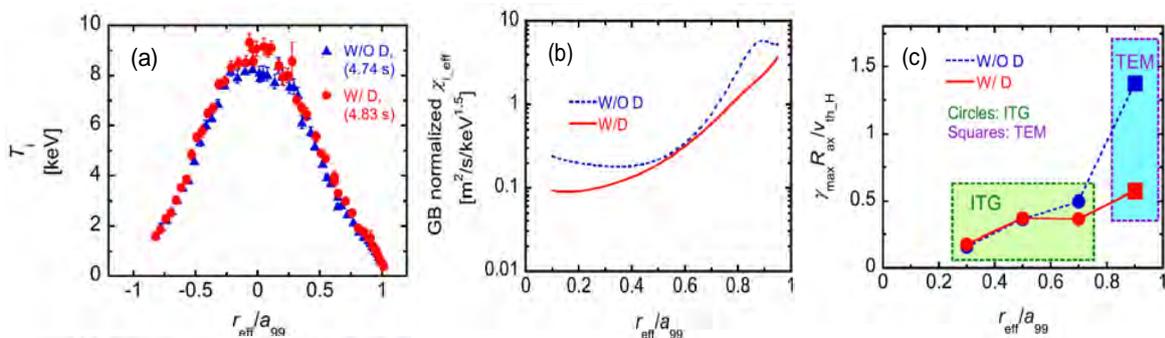


図 4.1.2-1 (a)イオン温度分布の比較、(b) GyroBohm 則に基づいて規格化されたイオン熱輸送、(c) Gyrokinetic Vlasov (GKV)コードを用いた線形成長率の比較[4.1-4]。

### 4.1.3 乱流輸送特性の検証

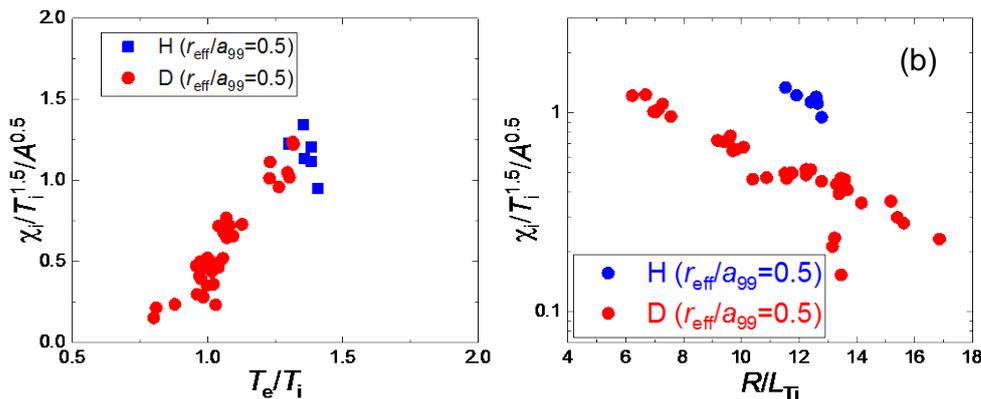


図 4.1.3-1 イオン熱輸送の(a)温度比依存性、(b) イオン温度勾配依存性[4.1-6]。

イオン ITB プラズマのコア領域では、ITG モードが乱流輸送の担い手であることが GKV 計算により示されている[4.1-5]。ITG モードは、電子とイオンの温度比とイオン温度勾配に敏感であるため、イオン熱輸送の温度比依存性とイオン温度勾配依存性を調べた。その結

果を図 4.1.3-1 に示す。温度比依存性は、ITG モードの特徴を示したが、イオン温度勾配依存性は、ITG モードと逆の依存性を示した。これは、温度勾配に依存した乱流抑制機構の存在を示していると考えられる。また、水素プラズマと重水素プラズマの違いも温度勾配依存性には顕著に見られる。この実験観測結果を説明できる乱流抑制機構として、ExB シアが考えられる。ExB シアは、温度勾配と規格化ラーマー半径に依存することが理論的に予測されており、系統的な実験と大域的な非線形輸送計算により検証を進める予定である。

#### 4.1.4 不純物輸送機構の同定

イオン ITB プラズマでは、不純物イオンのコア領域からの吐出しによる凹型不純物分布（不純物ホール）形成が観測されている[4.1-7]。これは不純物蓄積が生じないというトカマクプラズマとは異なる利点として重要な要素であるが、その輸送機構は明らかになっていない。また、熱輸送改善との関連も指摘されている[4.1-8]。重水素実験により、不純物輸送機構が完全に同定できた訳ではないが、注目すべき観測結果が得られている。その一例として、(1)重水素プラズマでも不純物ホールは形成される。(2)不純物吐出し速度は、若干遅い。(3)イオン熱輸送改善における不純物密度依存性の観測（図 4.1.4-1(a)）。(4)不純物密度のピーク度とイオン熱輸送が逆相関する（図 4.1.4-1(b)）[4.1-8,-10]。(1)、(3)については、基本的に水素、重水素プラズマで同様の性質であるが、(2)、(4)については、重水素プラズマで初めて観測された現象である。この 2 つの性質をうまく活用することで、イオン ITB の持続時間を重水素プラズマでは、飛躍的に伸長できる可能性があり、今後の新たな研究課題の一つとなっている。

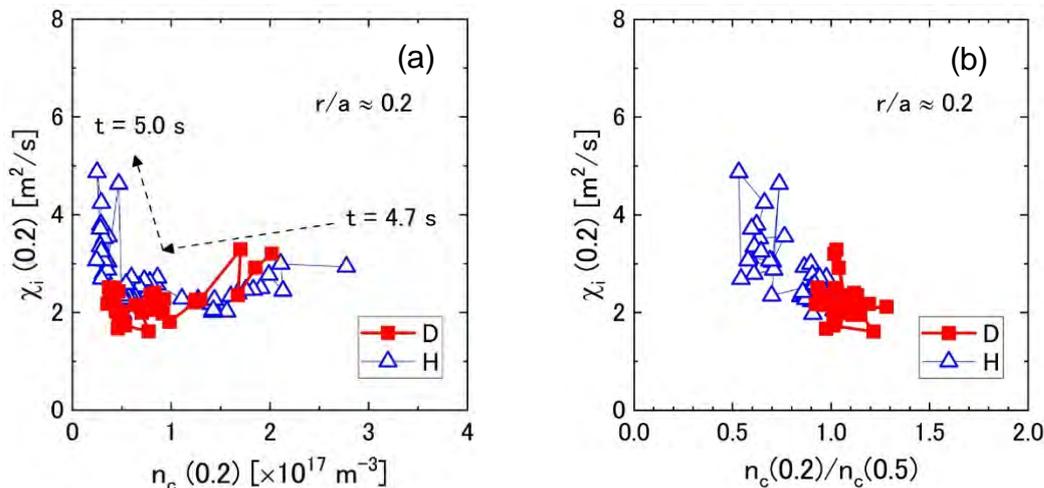


図 4.1.4-1 イオン熱輸送の(a)炭素不純物密度依存性、(b)炭素不純物のピーク度依存性[4.1-9,-10]。

#### 4.1.5 運転領域拡大に関するまとめと今後の課題

ここでは、イオン温度領域拡大に関する成果について述べた。第 19 サイクルから開始された重水素プラズマ実験で、同位体効果を活用してイオン温度 10keV を達成し、乱流輸送抑制機構に関する理解の進展、不純物輸送に関する新たな現象の観測など、飛躍的な研究の進展があった。また、間欠的な MHD 不安定性や不純物密度分布と熱輸送の関連など

新しい研究課題の発見もあり、それらに取り組むことにより、運転領域拡大だけでなく、不純物輸送機構そのものに迫る研究の展開も期待されている。また、ここでは触れなかったが、電子加熱重水素プラズマでもより少ない加熱パワーで、電子温度 10keV を達成するなど、高電子温度領域拡大と高密度化に関しても今後進展が期待できる成果が得られており、高イオン温度と高電子温度領域の更なる拡大についても精力的に取り組む予定である。

重水素実験後半には、高ベータ化、高密度化、高3重積化、定常化などにも取り組むことで、総合性能としてのヘリカル核融合炉設計のためのデータベース構築に貢献する計画である。

[4.1-1] 自然科学研究機構核融合科学研究所 平成 26 年度外部評価報告書

[4.1-2] 永岡賢一他、招待講演 Plasma Conference2017、姫路商工会議所、2017 年 11 月。

[4.1-3] H. Takahashi, K. Nagaoka, K. Mukai, et al., invited talk at International Stellarator/Heliotron Workshop 2017

[4.1-4] H. Takahashi, K. Nagaoka K. Mukai, et al., Nuclear Fusion, 58 (2018) 106028.

[4.1-5] M. Nakata et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 58 (2016) 074008..

[4.1-6] K. Nagaoka, H. Takahashi, et al., 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, 22-27 Oct. 2018.

[4.1-7] M. Yoshinuma, et al., Nuclear Fusion, 49 (2009) 062002.

[4.1-8] M. Osakabe, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 56 (2014) 095011.

[4.1-9] K. Mukai, K. Nagaoka, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 60 (2018) 074005.

[4.1-10] K. Ida, et al., 27th IAEA Fusion Energy Conference, Ahmedabad, India, 22-27 Oct. 2018.

## 4.2 同位体効果

重水素実験において同位体効果の検証とその物理機構の解明は最も重要な研究課題であり、高性能化テーマグループ、及び、コア物理テーマグループで精力的に実験と解析に取り組んだ。2017 年の第 19 サイクルの実験では、高性能化グループで高性能プラズマであるイオン温度 10keV を目指すと同時に、コア物理グループでは詳細なパラメータスキャンを行い、理論シミュレーションとの比較に取り組んできた。特に、コア物理グループの実験では軽水素、及び重水素の純度を高め、ヘリウムの含有量をできるだけ小さくし、H,D のイオン種の違いによる輸送の違いを明らかにできる条件で実験を行ってきた。以下に現在までの実験経過と解析結果を報告する。

### 4.2.1 巨視的なエネルギー閉じ込め

図 4.2.1-1 に第 19 サイクルで取得した巨視的なエネルギー閉じ込め時間( $\tau_E$ )と国際ステラレータースケールリング 2004(ISS04)[4.2-1]との比較を示す。図 4.2.1-1(a)に ECH 加熱プラズマを図 4.2.1-1(b)に NBI 加熱プラズマの比較を示す。実験は全て磁気軸位置  $R_{ax}=3.6m$  で

行った。 $f_{ren}$  は異なる磁場配位間の比較を行うための較正係数であり、図 4.2.1-1 においては、ECH、NBI 加熱プラズマとも 0.93 である。閉じ込め領域におけるイオン種は  $H^+$ 、 $D^+$ 、 $He^{2+}$ 、 $C^{6+}$  である。これらのイオン種において  $C^{6+}$  の密度は 1% 以下である。 $He^{2+}$  は放電洗浄による残留成分が 5~10% 程度ある。残りが  $H^+$ 、 $D^+$  となるが、H、D プラズマにおいては H 純度 ( $H^+/(H^++D^+)$ )、D 純度 ( $D^+/(H^++D^+)$ ) がそれぞれ 80% 以上のものを解析対象とした。

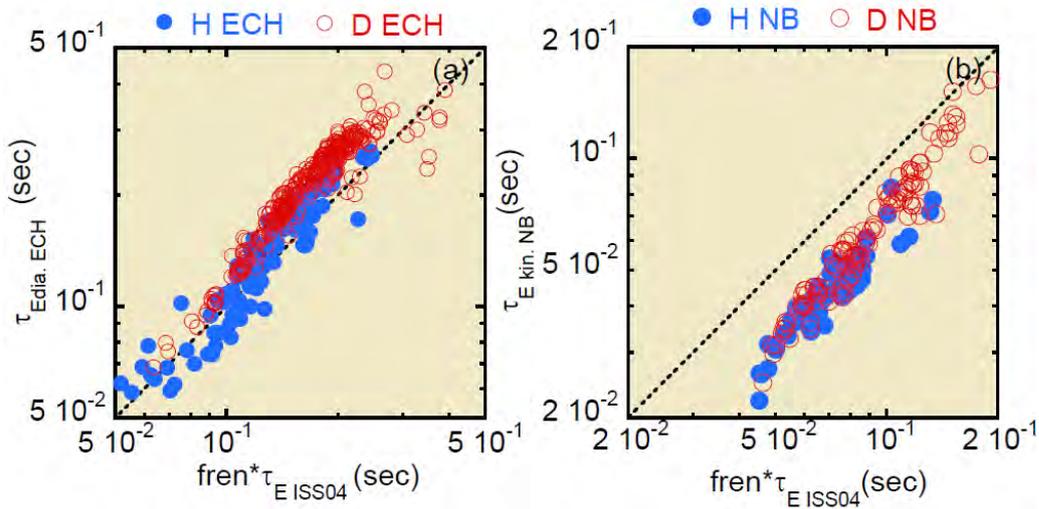


図 4.2.1-1 2017 年第 19 サイクル実験における tE の ISS04 スケーリング予測値との比較 (a) ECH 加熱プラズマ、(b) NBI 加熱プラズマ

ECH プラズマにおいては入射パワーは 0.6-3.9MW、線平均電子密度 ( $\bar{n}_e$ ) は  $0.3-3.8 \times 10^{19} m^{-3}$  の範囲でパワーをスキャンした。トロイダル磁場 ( $B_t$ ) は 2.75T に固定した。また、蓄積エネルギーは反磁性ループコイルで評価した。図 4.2.1-1(a) に示すように H プラズマにおいては  $\tau_E$  の実験値はほぼ ISS04 の予測に沿う。一方、D プラズマの  $\tau_E$  は、多くのデータ点が ISS04 の予測値より高い値を示した[4.2-2]。

NBI プラズマにおいて、入射パワーは、1.0-20.1MW、ただし、垂直入射ビームについては荷電交換分光計測用に 20ms の短パルスで入射しており、加熱にはほとんど貢献していない。データセットは ion-ITB が形成されない通常閉じ込め(normal confinement)である。 $\bar{n}_e=0.7 - 7.4 \times 10^{19} m^{-3}$  の範囲でスキャンし、 $B_t=2.75, 1.68, 1.375T$  の異なる三つの磁場強度でデータを取得した。蓄積エネルギーは  $n_e, T_e, T_i$  の分布より評価した。図 4.2.1-1(b) に示すように H プラズマ、D プラズマの違いは明確でない。また、両データともに ISS04 の予測値を下回っている。ISS04 は LHD の初期の実験データで NBI の加熱が最大 6MW 程度のデータベースから導出したもので、加熱パワーの増大による閉じ込め劣化(power degradation)の外挿性が十分でなかったと考えられる。

より詳細な H、D プラズマにおける閉じ込めの比較を行うために回帰解析を行うことにより、第 19 サイクルの実験データでスケーリングを導出した。その結果、ECH プラズマでは下記のスケーリングを得た。

$$\tau_{E \text{ dia.ECH}} \propto A^{0.24 \pm 0.01} \bar{n}_e^{0.58 \pm 0.01} P_{abs}^{-0.52 \pm 0.01} \quad (4.2.1-1)$$

一方、NBI プラズマでは下記のスケーリングを得た。

$$\tau_{E \text{ kin.NBI}} \propto A^{0.01 \pm 0.02} \bar{n}_e^{0.78 \pm 0.01} P_{abs}^{-0.87 \pm 0.01} B_t^{0.85 \pm 0.02} \quad (4.2.1-2)$$

図 4.2.1-2 に示すように両スケーリングとも高い相関係数で実験データを再現している。NBI プラズマのスケーリングは ion-ITB が形成されていない通常放電より導出したが、図 4.2.1-2 に示すように ion-ITB のデータにもほぼ沿うことが示されている。

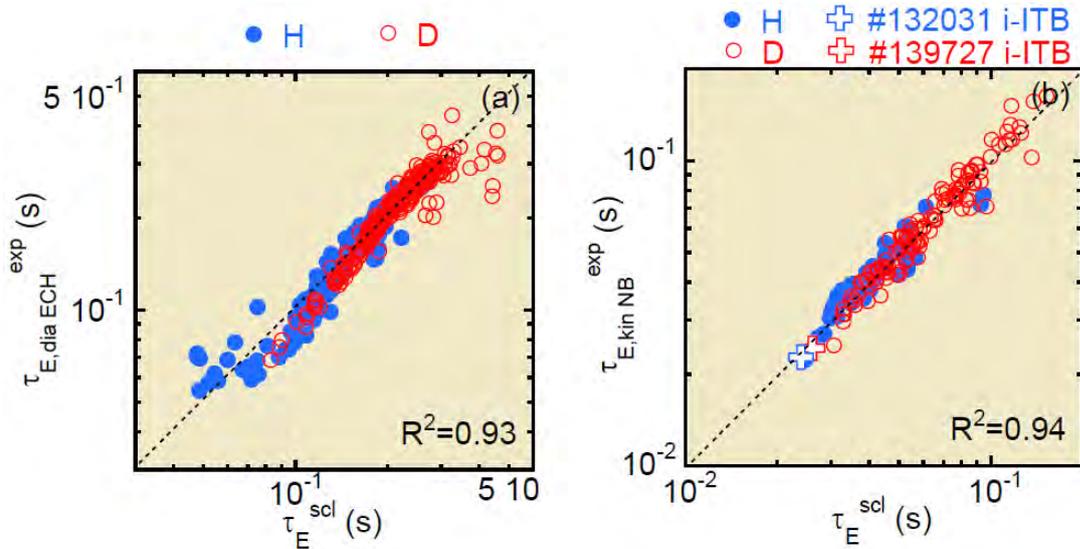


図 4.2.1-2 2017 年第 19 サイクル実験における tE のスケーリング予測値との比較 (a) ECH 加熱プラズマ、(b) NBI 加熱プラズマ

表 4.2.1-1 スケーリングインデックスの比較

Scaling parameter	A	P <sub>abs</sub>	n <sub>e</sub>	B <sub>t</sub>
LHD ECH	0.24 ± 0.01	-0.52 ± 0.01	0.58 ± 0.01	-
LHD NB	0.01 ± 0.02	-0.87 ± 0.01	0.78 ± 0.01	0.85 ± 0.02
ISS04	-	-0.61	0.54	0.84
ITER97-L mode	0.2	-0.73	0.4	0.03
IPB98(y,2) ELMy H mode	0.19	-0.69	0.41	0.15
JET ILW L	0.15 ± 0.02	-0.63 ± 0.02	-	-
JET ILW H	0.4	-	-	-

表 4.2.1-1 に、スケーリングのインデックスの比較を示す。ECH プラズマは炭素壁のトカマク L mode. H mode とほぼ同様のイオン質量依存性を示す。それに対して NBI プラズマのイオン質量依存性は弱い。現在のところ、ECH プラズマと NBI プラズマでの質量依存性の違いの原因は分かっていない。また、吸収パワーに対するインデックスについて、ECH プラズマは ISS04 と同等であるが、NBI プラズマは ISS04 より強い加熱増加による閉じ込め劣化を示している。

#### 4.2.2 粒子輸送及び不純物輸送

巨視的な粒子閉じ込め時間 ( $\tau_p$ ) について図 4.2.1-1 と同じデータセットについて評価した。主要なイオン種は  $H^+$ 、 $D^+$ 、 $He^{2+}$  なので粒子ソースを相対較正された  $H\alpha$ 、 $D\alpha$ 、 $HeI$  の発光強度の和より評価し、定常状態において線平均電子密度をこれらの発光強度で規格化し、 $\tau_p$  を評価した。その結果、ECH プラズマにおいては下記のスケーリングを[4.2-2]、

$$\tau_{P\ ECH} \propto A^{-0.33 \pm 0.02} \bar{n}_e^{0.52 \pm 0.02} P_{abs}^{-0.69 \pm 0.02} \quad (4.2.2-1)$$

NBI プラズマにおいては下記のスケーリングを得た[4.2-3]。

$$\tau_{P\ NBI} \propto A^{-0.26 \pm 0.04} \bar{n}_e^{0.25 \pm 0.03} P_{abs}^{-0.89 \pm 0.03} B_t^{1.11 \pm 0.04} \quad (4.2.2-2)$$

図 4.2.2-1 に示すように、これらスケーリングは実験データを再現している。 $\tau_E$  のスケーリングに対して、 $\tau_p$  のスケーリングは ECH プラズマ、NBI プラズマともにイオン質量に対するインデックスが負となっており、D プラズマの方が H プラズマより巨視的な粒子閉じ込めが悪いことを示している。ECH プラズマについては、粒子ソースを真空容器内の中性粒子圧力で評価して  $\tau_p$  を評価したが、同様に D プラズマの方が粒子閉じ込めが悪いことが分かった。また、ECH プラズマにおいて密度変調実験を行って周辺の拡散係数を比較したところ、D プラズマの方が拡散係数が大きくなっており、これらの巨視的な粒子輸送が D の方が悪いことを裏付けている。

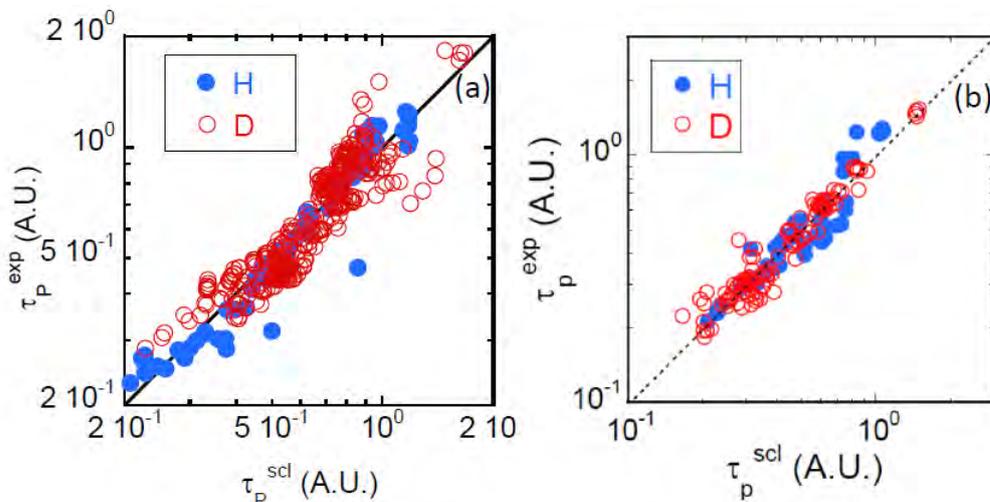


図 4.2.2-1 2017 年第 19 サイクル実験における  $\tau_p$  のスケーリング予測値との比較 (a) ECH 加熱プラズマ、(b) NBI 加熱プラズマ

不純物輸送はプラスチックペレットに不純物粒子を封入した TESPEL(Tracer EncapSulated PELlet)を用いて評価を行った。図 4.2.2-2 に ECH プラズマにおいてバナジウム粒子を封入した TESPEL を入射した時の、21 価のバナジウムイオン( $V^{21+}$ )の時間変化を示す。TESPEL は規格化位置 0.8 程度で溶発しており、溶発した空間位置近辺の不純物輸送を評価することができる。図 4.2.2-2 に示すように、D プラズマの方が発光の減衰時間が長く、 $V^{21+}$ の閉じ込め時間が長いことを示している。これは粒子輸送とは逆の傾向を示している。粒子輸送の評価ではプラズマ周辺部の発光から評価していることに値して  $V^{21+}$ の発光はコア領域の輸送を反映していること、多価イオンである  $V^{21+}$ の方が新古典輸送においては径電場の影響をより受けやすいことが違いの原因と考えられるが、今後詳細な解析と実験結果の蓄積が必要である。

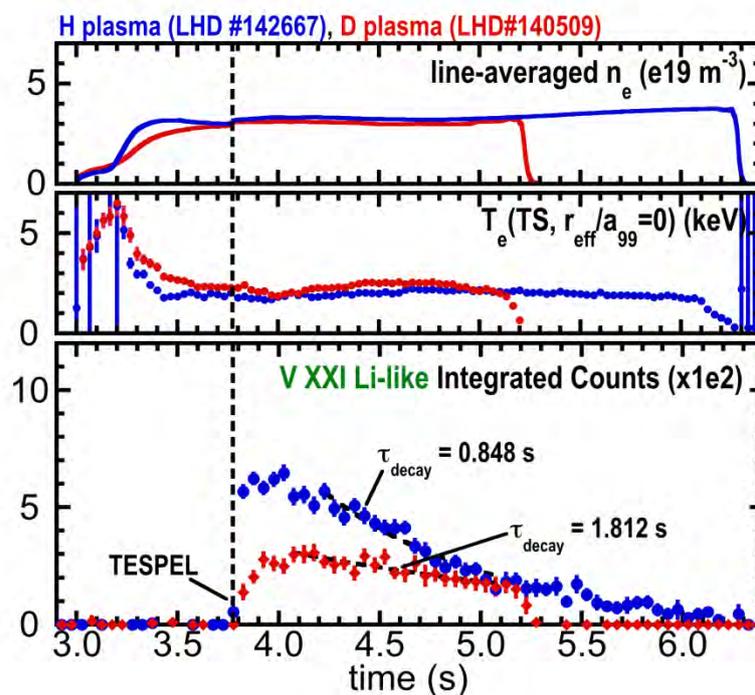


図 4.2.2-2 TESPEL を用いた不純物輸送の実験

#### 4.2.3 乱流揺動計測と非線形シミュレーションとの比較

LHD において電子の熱輸送、イオンの熱輸送、粒子輸送、不純物輸送の乱流駆動成分はイオン温度勾配不安定性 (ion temperature gradient mode; ITG) 及び補足電子不安定性 (trapped electron mode; TEM) が乱流輸送に大きく寄与していると考えられる。ITG の場合はポロイダルマッハ数が大きい場合は乱流を抑制する帯状流が強く励起されることが予測されている[4.2-5]。また、TEM 粒子間衝突による安定化の効果が D プラズマの方が大きいことが予測されている[4.2-6]。さらに、ITG、TEM ともに密度勾配が正になる領域 (小半径外側に向かって密度が増加) では ITG、TEM ともに線形成長率が下がること示されている[4.2-7]。

図 4.2.3-1 は ECH プラズマにおける  $n_e$ 、 $T_e$ 、ECH deposition、乱流揺動レベルの比較を

示す。この比較では線平均電子密度はほぼ同じで、図 4.2.3-1 (c)に示すように ECH の deposition 分布もほぼ同じであるが、図 4.2.3-1 (a)、(b)に示すように  $n_e$ 、 $T_e$  分布が大きく異なり、 $T_e$  は内部領域で D の方が高く、 $n_e$  分布は H プラズマがフラットであるのに対して、D プラズマは強いホローな分布になっている。二次元位相コントラストイメージング[4.2-8]で計測した乱流揺動は、図 4.2.3-1 (d)に示すように D プラズマの密度勾配が正となる領域で大きく減衰している。このように、H プラズマと D プラズマで乱流の構造が大きく異なる場合も観測されており、今後理論シミュレーションとの比較により物理機構の解明に取り組む。

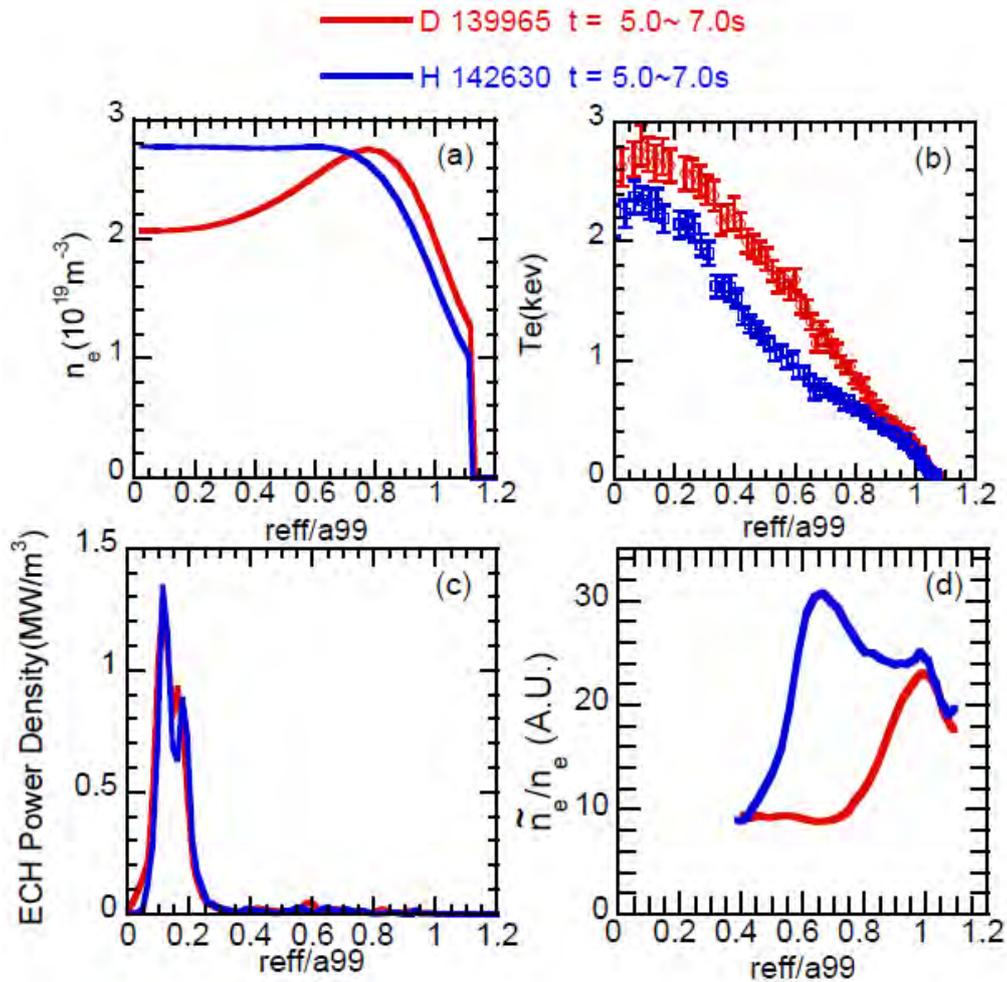


図 4.2.3-1 H プラズマ、D プラズマの分布の比較(a)  $n_e$ 、(b)  $T_e$ 、(c) ECH deposition、(d) 揺動レベル

非線形シミュレーションはジャイロ運動論グループにより開発された GKV コードを用いて行った[4.2-9]。図 4.2.3-2 に示す NBI 加熱の ion ITB が形成されている H、D プラズマにおいてイオン加熱が図 4.2.3-2 (d)に示すようにほとんど同じにも関わらず、内部領域でイオン温度が D プラズマの方が明確に高く、内部領域でイオンの熱輸送が改善していることを示唆している。図 4.2.3-3 にこの放電における規格化位置 0.5 における非線形シミュレーションの比較を示す。図 4.2.3-3(a)に示すように非線形イオン熱流束は H プラズマより D プラズマの方が小さく、図 4.2.3-3(b)に示すように帯状流のエネルギーは H プラズマより D プラズマの方が大きいことが明らかになった。これらの結果は、内部領域で D プラズマの方が H プラ

ズマよりイオン温度が高いことを定性的に説明でき、実験における熱流束もシミュレーションにおける熱流束も双方ともに 1/3 程度になっていることが示された。しかしながら、定量的に実験の熱流束とシミュレーションの熱流束の間にファクター2~3 程度の開きがある。これは、第一に現状の GKV では  $E_r$  及び  $E_r$  シアによる乱流の抑制効果が含まれておらず、シミュレーションは熱流束を過大評価すること、第二にイオン加熱が強い実験ではイオン温度分布が強い硬直性(stiffness)を持ち、わずかな規格化イオン温度勾配の違いでイオンの熱流束が大きく影響を受けることが可能性として考えられる[4.2-10]。

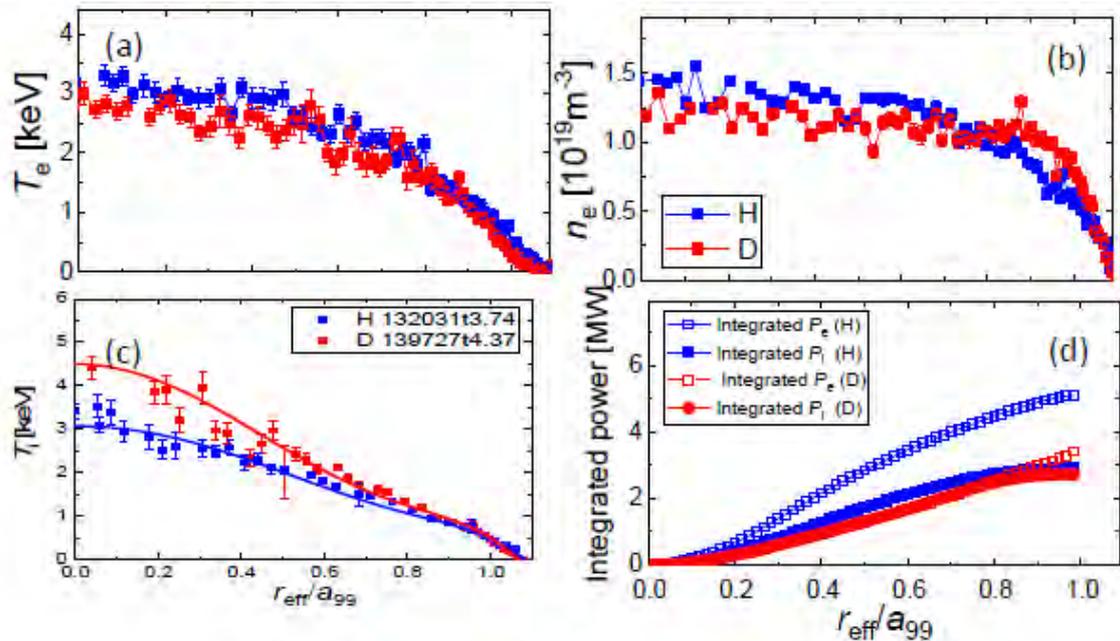


図 4.2.3-2 イオン ITB が形成された H, D プラズマの比較。(a)  $T_e$  分布、(b)  $n_e$  分布、(c)  $T_i$  分布、(d) 体積分した加熱パワー分布

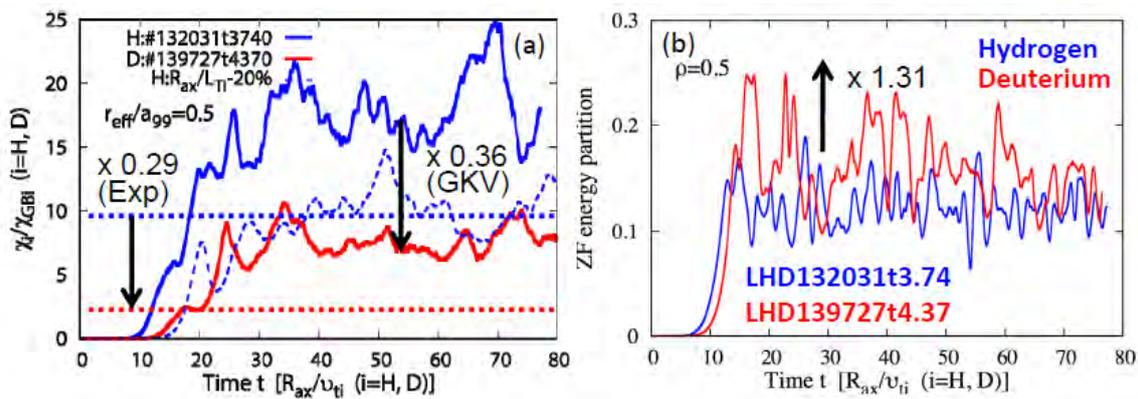


図 4.2.3-3 GKV によって計算された規格化小半径( $r_{\text{eff}}/a_{99}$ )位置 0.5 における (a)非線形イオン熱流束、(b)带状流のエネルギー

図 4.2.3-3 (a)に示されるように、H プラズマの規格化イオン温度勾配を 20%程度小さくすると、実験とシミュレーションのイオン熱流束はほぼ一致した。今後は、 $E_r$  及び  $E_r$  シアの効果

を含むようにコードを改良すること、並びに、規格化温度勾配などの入力パラメーターの変化に対する熱流束の変化も確認しておくことが必要である。さらに、図 4.2.3-3 の違いは何に起因するのか、例えばイオン種の違いやプラズマパラメーター ( $n_e, T_e, T_i$  の規格化勾配、 $T_e/T_i$  比、種突周波数、 $\beta$  値) の違いによるのかということに焦点を当てて、シミュレーションの入力パラメーターをスキャンして明らかにする必要がある。

#### 4.2.4 まとめと今後の課題

第 19 サイクルの実験で多くの実験データを取得し、解析を進めてきたが、同位体効果は輸送チャンネル(熱、粒子、不純物)、及び空間領域(プラズマ内部、プラズマ周辺部～巨視的な輸送)で異なる可能性が高い。例えば、図 4.2.3-1 及び図 4.2.3-2 に示されるように、規格化位置 0.5 付近では D プラズマにおいて輸送が明確に低減しているが、この二つのプラズマは図 4.2.1-2 に示されるように巨視的な閉じ込め時間にほとんど差がなく、normal confinement のスケールングにほぼ沿う。同様に強い電子加熱における電子 ITB においても、プラズマ内部領域では D プラズマで明確な輸送の低減が観測されている[4.2-11]。このような領域では新古典寄与が半分程度寄与するため[4.2-12]、乱流輸送だけでなく新古典輸送についても詳細な解析が必要である。

[4.2-1] H. Yamada et al, Nucl. Fusion 45 (2005) 1684

[4.2-2] K. Tanaka et al, Proceeding of FEC2018

[4.2-3] H. Yamada et al, Proceeding of FEC2018

[4.2-4] N. Tamura et al, Proc. 45th EPS Conf. on Plasma Physics (2-6 July 2018, Prague, Czech Republic) Vol.42A, European Physical Society,(2018) pp.1624.

[4.2-5] T.H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami Nucl. Fusion 51 (2011) 123003

[4.2-6] M. Nakata et al, Phys. Rev. Lett. 118, (2017), 165002

[4.2-7] M. Nakata et al, Plasma Phys. Control. Fusion 61 (2019) 014016

[4.2-8] K. Tanaka et al, Rev. Sci. Instrum. 79, (2008), 10E702

[4.2-9] M. Nakata et al, presented at EPS conference 2018

[4.2-10] A. Ishizawa et al, Nucl. Fusion 55 (2015) 043024

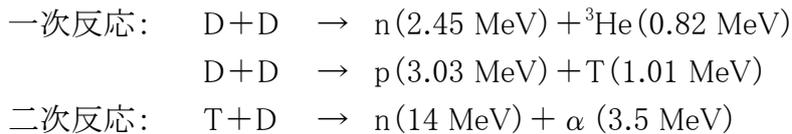
[4.2-11] H. Takahashi et al, Nucl. Fusion 58 (2018) 106028

[4.2-12] F. Warmer et al, Nucl. Fusion 58 (2018)106025

### 4.3 高エネルギー粒子閉じ込め

#### 4.3.1 高エネルギー粒子の古典的な閉じ込めに対する理解

LHD 重水素実験においては、将来の核融合炉における  $\alpha$  粒子の閉じ込めの評価に資するため、NBI によって生成される高エネルギーイオンの閉じ込め性能の評価を進めた。重水素プラズマでは温度やエネルギーに応じた確率で重水素同士による核融合反応が起き、それに伴い中性子が放出される。重水素プラズマ中で起きる核融合反応について以下に記す。



重水素 NBI 加熱実験において、中性子は、①熱核融合反応(バルクイオン同士の反応)、②ビーム成分とバルクイオンの反応、③ビーム成分同士の反応の 3 つの過程で発生する。通常、過程②、いわゆる TCT(two-energy-component torus)反応により発生する中性子が支配的である。別の角度から見れば、発生する中性子は、NBI によりプラズマ中に生成された高エネルギーイオンの閉じ込め情報を有していると言える[4.3-1]。

重水素実験開始に伴い、まずは、MHD 不安定性が観測されない電子サイクロトロン加熱プラズマにおいて、ビームの減速時間よりも十分に短いパルス幅の NB(Neutral Beam)を入射することにより、デルタ関数的なエネルギー分布を持つビームイオンをプラズマ中に生成し、ビームイオンの減速が古典的か否かについて調査した[4.3-2]。図 4.3.1-1 に示すように、ビームイオンの巨視的な閉じ込めを反映する総中性子発生率( $S_n$ )の時間変化、並びに絶対値は、新古典的輸送モデルである GNET コードによる予測と非常によく一致を示した[4.3-3]。MHD 不安定性が観測されない LHD プラズマにおいては、ビームイオン閉じ込めについて新古典的モデルで記述できることを明らかにした。また、ビームイオン同士の衝突効果により、ビームイオンの減衰時間が変化することが実験的に示され、TASK-FP コードによって傾向の一致を見た[4.3-4]。

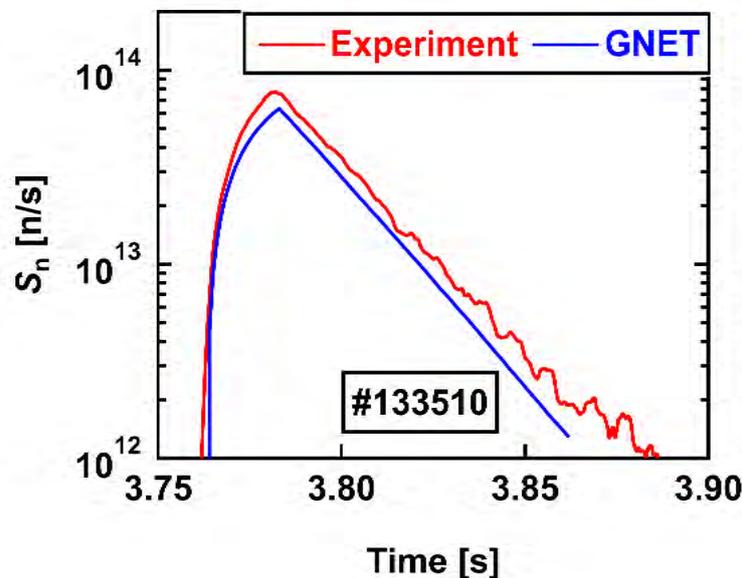


図 4.3.1-1 短パルス NB 入射実験の結果。赤線:実験結果、青線:GNET によるシミュレーション結果

次に、中性子発生率( $S_n$ )の電子密度依存性を調べたところ、図 4.3.1-2 に示すように、フォッカープラנק方程式に基づくモデルで事前に予測された通り[4.3-1]、電子密度の上昇に伴って  $S_n$  が上昇し、電子密度が  $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  の近辺で  $S_n$  のピークが現れ、更に高い電子

密度の領域では  $S_n$  が徐々に低下する結果が得られた[4.3-5]。磁気軸の内側へのシフトに従って  $S_n$  の増加が見られ、最大中性子発生率として  $3.3 \times 10^{15}$  n/s を得た[4.3-6]。

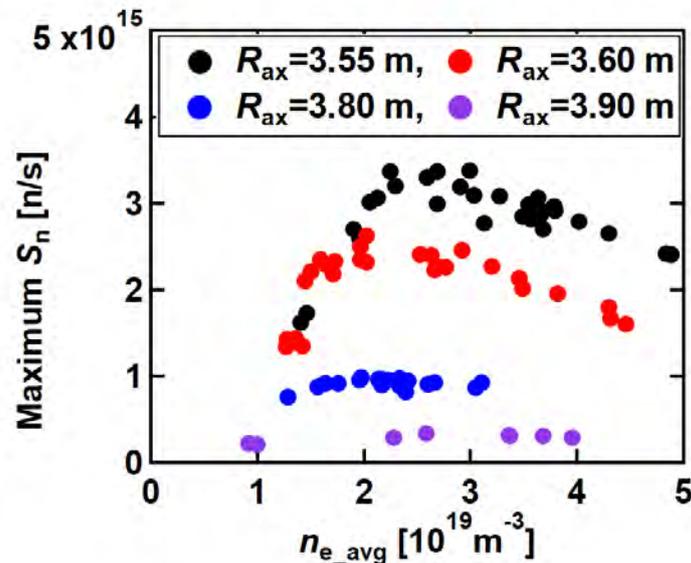


図 4.3.1-2 中性子発生率の密度依存性。真空磁気軸位置 3.55m 配位 (●)、3.60m 配位 (●)、3.80m 配位 (●)、及び 3.90m 配位 (●) に対する中性子発生率。電子密度が  $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  近傍で中性子発生率のピークが見られる。

異なる磁気軸位置の磁場配位下の MHD 不安定性が観測されない放電において、3.3.1.1 節で紹介された垂直中性子カメラ(VNC)を用いて線積分中性子発生率分布の取得を行った。中性子パルス計数率は、磁気軸の内側シフトに伴って増加し、 $S_n$  計測と同様の結果が得られた[4.3-7]。線積分中性子分布の径方向におけるピーク位置は、磁気軸位置を外寄せにするに従って外側へ移動するという結果が得られ、VNC が設計通り機能していることを確認した[4.3-8]。

重水素プラズマでは、DD 核融合反応の結果、トリトン、 $^3\text{He}$  イオン、陽子といった MeV 領域の荷電粒子が生成される。これらは、生成時に速度空間において等方的な形で放出される。DD 反応で発生した 1 MeV 近傍のトリトンは、その運動パラメーター(ラーマー半径及び歳差ドリフト周波数等)が将来の核融合炉における DT 核融合反応で生成される  $\alpha$  粒子のそれと非常に近く、アルファ粒子の模擬粒子として扱うことができる。LHD において、トリトンとバルクの重水素イオンとの 2 次的な核融合反応の結果生成する 14 MeV 中性子の計測を行うことで、ヘリカル装置において世界で初めてとなるトリトンを用いたアルファ粒子閉じ込め模擬実験を行った[4.3-9]。放射化箔法で相対較正されたシンチレーティングファイバー検出器を用いることで、DT 中性子フラックスの時間発展を計測し、DD 中性子発生量と DT 中性子発生量の比で定義されるトリトン燃焼率を取得した[4.3-10]。DD と DT 核融合反応の反応率のエネルギー依存性から予測されたとおり、DT 中性子発生率の立ち上がり時間は、総中性子発生率のそれよりも長いことが分かった[4.3-11]。磁気軸位置の異なるプラズマにお

いてトリトン燃焼率を取得した結果[4.3-12]、図 4.3.1-3 に示すように、磁気軸を内側に寄せることで、トリトン燃焼率が顕著に増加した[4.3-6]。ローレンツ軌道計算によるトリトンの即発損失の評価[4.3-13]、及び GNET シミュレーションにおいても同様の傾向が得られ、トリトン燃焼率の増大はヘリカルリップル捕捉軌道を持つトリトンの閉じ込めの改善によるものだということが分かった[4.3-3]。GNET コードは、実験観測で得られたトリトン燃焼率に比して低い値を示した。これについては、同コードは最外殻磁気面を粒子損失の境界としていることが原因の一つと考えられる。重水素実験第1年次の最大トリトン燃焼率は、磁気軸位置3.55 mで得られ、その値は0.45%であり、小半径において LHD と同等なトカマク装置におけるそれと同程度であった。

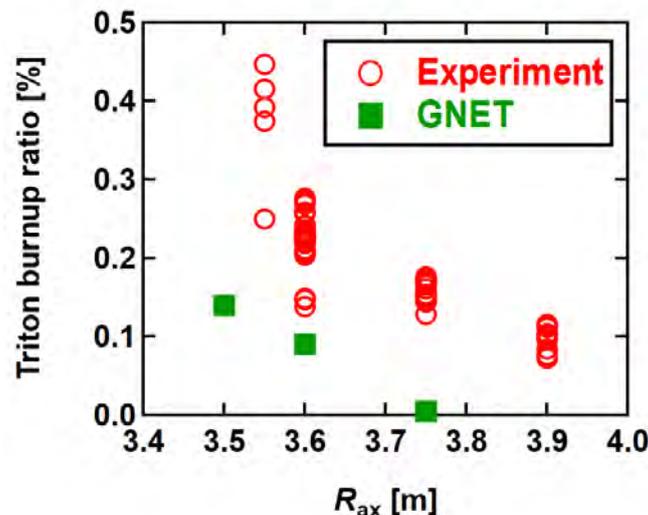


図 4.3.1-3 トリトン燃焼率の磁気軸位置依存性。実験結果(○)は、GNET シミュレーションによる予測(■)と同様の傾向を持つことが分かった。

軽水素ビームと重水素プラズマの核弾性散乱効果によって重水素プラズマにノックオンテールが観測されるかの検証実験が行われた。中性子の減衰の形から、ノックオンテールの形成が示唆された[4.3-14]。

#### 4.3.2 高エネルギー粒子と MHD 不安定性との相互作用

2015 年度までに実施された LHD 軽水素実験において、高エネルギー粒子とアルフベン固有モードなどの高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性との相互作用は SLIP や E//B-NPA を用いて、精力的に行われてきている[4.3-15~19]。重水素実験実施に伴い、前節に示したように、中性子計測が高エネルギー粒子の振る舞いを調べる強力なツールとして利用可能となったため、MHD 不安定性と高エネルギー粒子の相互作用に関する研究の一層の進展が期待されている。一方で、アルフベン固有モードモードと高エネルギー粒子の相互作用を調べる実験は、ECH 非共鳴磁場である 0.5~1 テスラの範囲で実施されていたが、負イオン源 NBI を重水素化した場合には NBI によるプラズマ立ち上げが困難であるため、現状では重水素実験で実施することができていない。アルフベン固有モードモードと高エネ

ルギー粒子の相互作用に関する研究の進展は、3.2.2 節に示されているように 56GHz ジャイロトロンを整備後に展開されることが期待される。ここでは、最近、高イオン温度放電において、プラズマの高イオン温度化を阻害し、問題となっている新たな MHD 不安定性と高エネルギー粒子の相互作用について説明する。

軽水素による高イオン温度プラズマ生成実験において、高エネルギー粒子と背景プラズマの MHD 不安定性が共鳴することにより、バースト的な粒子の掃き出しを伴う新しい不安定性が発見された[4.3-20]。この現象は、高エネルギー粒子駆動交換型不安定性 (EIC: Energetic particle driven resistive InterChange mode) と命名され、高イオン温度達成を阻害する現象として、発生メカニズムと制御方法の研究が精力的に行われている。本現象は軽水素放電で発見されたものであるが、EIC が引き起こすと思われる高エネルギー粒子の輸送とその定量的評価が、重水素実験により可能となった中性子計測により明らかになりつつある。本節では、重水素実験により可能となった、高エネルギー粒子損失の定量的評価と、明らかになりつつある EIC の発生メカニズム及びその制御方法開発の進展について述べる。

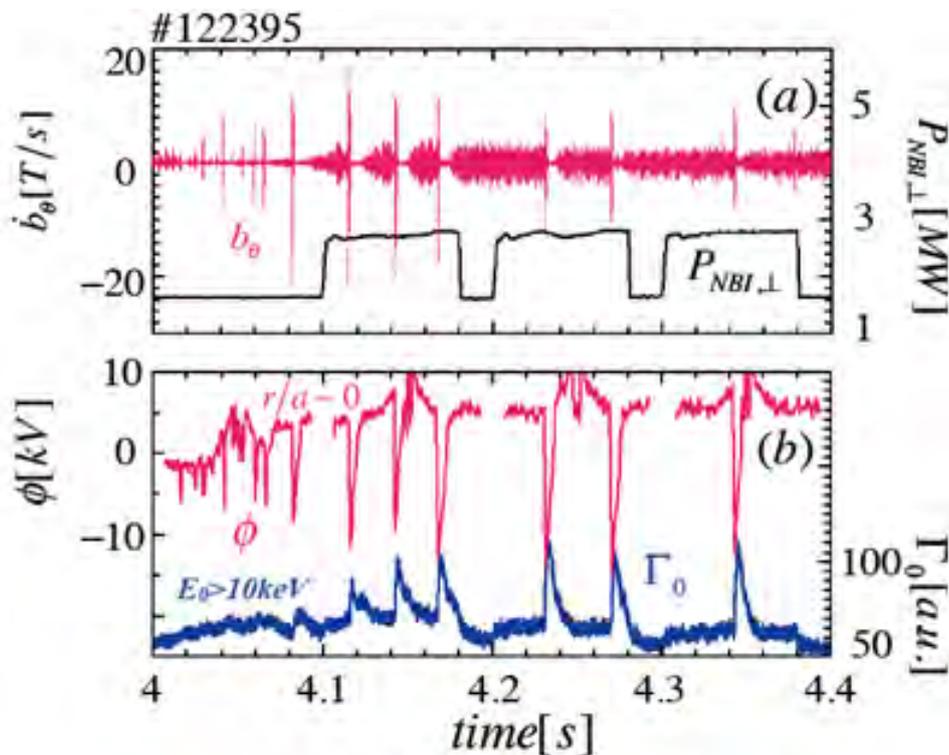


図 4.3.2-1 軽水素放電で発見された、EIC 発生時の(a)磁場揺動、(b)プラズマ電位変化(赤線)、及び中性粒子束(青線)の時間変化。参考のため、NBI4 号機の入射加熱電力(黒線)を図(a)に示した。

図 4.3.2-1 に軽水素放電で発見された、EIC の典型的磁場揺動と重イオンビームプローブ (HIBP) により測定されたプラズマポテンシャル揺動、高速中性粒子エネルギー分析器 (NPA) により測定された中性粒子束の時間変化を示す。参考のために垂直入射 NBI (4 号機) の入射パワーの時間変化も示す。NBI4 号機が入射された直後に、バースト的な磁場揺動が発生し、同時にプラズマ電位と中性粒子束もバースト的な磁場揺動に対応して増加し

ている。このことは、EIC がプラズマ中の高エネルギー粒子を再分配し、プラズマの電位構造を大きく変化させ、かつ高エネルギー粒子の損失をもたらしていると考えられる。EIC による高エネルギー粒子の損失は、加熱効率を劣化させ、かつ高イオン温度達成を妨げるものである。従って、定常ヘリカル核融合炉の実現のためには、EIC を制御しつつ高イオン温度を達成するシナリオを構築しなければならない。

図 4.3.2-2 に、軽水素放電(上図)と重水素放電(下図)での EIC 発生時の磁場揺動強度、プラズマ蓄積エネルギー(プラズマベータ値)の変化の比較、重水素放電では中性子発生率を示す。参考のために、NBI4 号機の入射パワーも示した。軽水素、重水素放電ともに、NBI4 号機入射のタイミングで、バースト的な磁場揺動が観測されている。特に下図に示すように、重水素放電では、バースト的な磁場揺動に対応して、プラズマ蓄積エネルギーが減少し、中性子発生率も最大で 60%減少している。重水素実験で整備された中性子計測により、EIC による高エネルギー粒子の輸送と損失が、定量的に明らかになった。また、軽水素放電と重水素放電での EIC 発生時の磁場揺動を比較すると、軽水素放電では短い周期でバースト的な揺動が観測されるのに対し、重水素放電では周期が長くなり、バースト発生時の磁場揺動強度が軽水素放電より大きくなっている。これは、駆動される EIC が軽水素イオンと重水素イオンで異なっていることを示唆しており、EIC 発生メカニズムを理解する上で重要な知見である。

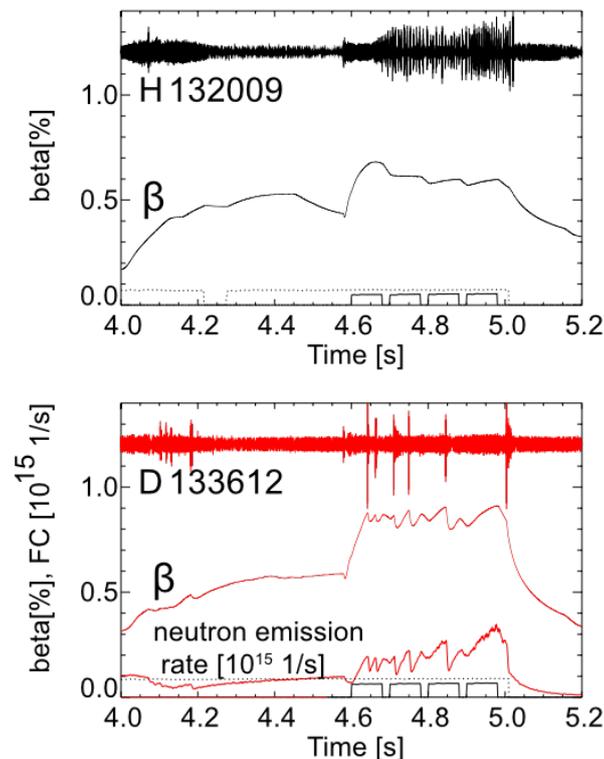


図 4.3.2-2 軽水素放電と重水素放電での EIC 発生時の磁場揺動とプラズマ蓄積エネルギー(ベータ値)、垂直 NBI の入射パワー。重水素放電のみ中性子発生率も示した。

重水素実験により明らかになった EIC 発生メカニズムを以下で説明する。EIC は高エネルギー粒子と背景プラズマの MHD 不安定性が共鳴することで発生すると考えられるので、トカマクプラズマで見られるフィッシュボーン不安定性と同じ解釈が成り立つと考えられてきた。従って、以下の 3 点が EIC の発生条件と考えられる。つまり、(1) 背景プラズマの抵抗性交換型モードが安定かわずかに不安定であること、(2) 大きな高エネルギー粒子寄与の非等方圧力勾配が存在すること、(3) 高エネルギー粒子の歳差運動周期が背景プラズマの抵抗性交換型モードの周波数に共鳴できること、である。理論的には、ヘリカル補足粒子の歳差運動周期を  $\omega$  とすると、共鳴条件は  $-1.2\omega$  と導かれる[4.3-21]。軽水素と重水素では、垂直入射 NBI の加速電圧が違うので、ヘリカル補足粒子の歳差運動周期が異なる。軽水素放電と重水素放電の EIC 発生時の、抵抗性交換型不安定性のモード周波数を比較すると、前述の共鳴条件とよく一致することが分かった。また、重水素イオンは、軽水素イオンに比べ、軌道幅が大きい。トカマクのフィッシュボーン不安定性がキンク型不安定性と共鳴するのに対し、EIC は抵抗性交換型不安定性と共鳴する。抵抗性交換型不安定性はモード構造が有理面に局在化しているので、軌道幅の大きい重水素イオンが抵抗性交換型不安定性と共鳴するには、より大きな非等方圧力成分が必要なが分かった。これが、図 4.3.2-2 で議論したように、重水素プラズマの場合はバース現象発生周期が長くなり(より大きい非等方圧力が必要となり)、バース発生時の揺動強度が増大する理由であることが分かった。

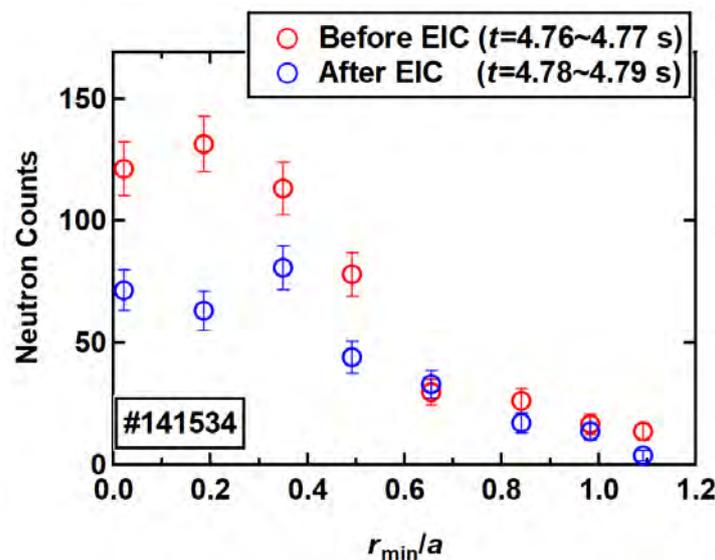


図 4.3.2-3 EIC 発生前後の線積分中性子発生率分布。EIC の発生によって中心視線の中性子計数が大きく減少している。

図 4.3.2-3 に、VNC を使って観測された EIC 発生前後における中性子発生率の線積分空間分布を示す[4.3-23,24]。この図で示されるように、VNC 中心視線( $r_{\min}/a < 0.5$ )の中性子パルス計数が顕著に減少することが分かり、一方で周辺視線においては変化がないことが確認された。MORH コードで計算されたビームイオン密度分布と VNC 視線の比較を行うことによって、この線積分中性子発生率分布の減少が EIC を励起するヘリカルリップル捕捉高

速イオンが損失していることに対応していることが明らかとなった[4.3-24]。

EIC 発生メカニズムが明らかになることで、EIC 抑制のシナリオ検討にも取り掛かることができる。前述のように、EIC はヘリカル補足粒子の歳差運動と背景プラズマの抵抗性交換型不安定性が共鳴して発生するので、ヘリカル補足粒子の軌道、もしくは抵抗性交換型不安定性のモード構造を制御することで抑制が可能と考えられる。そこで、ヘリカル捕捉粒子の軌道制御は外部共鳴磁場摂動(RMP)、モード構造は ECH 入射により制御することを試みた。結果として、RMP 重畳、ECH 入射により EIC を制御することに成功したが、完全に抑制することには成功していない。例えば、ECH を入射して EIC が抑制される場合がある一方、ほぼ同条件にも関わらず EIC が発生する高イオン温度放電も存在する。今後、VNC による線積分中性子発生率空間分布計測や SLIP による損失イオン計測を用いて、考察を深める必要がある。

- [4.3-1] M. Osakabe et al., “Current Status of Large Helical Device and Its Prospect for Deuterium Experiment”, *Fusion Science and Technology* 72 (2017) 199.
- [4.3-2] T. Nishitani et al., “Fast ion confinement study by neutron emission rate measurement after short pulse NB injection in the Large Helical Device”, *Plasma and Fusion Research* 13 (2018) 3402024.
- [4.3-3] H. Nuga et al., “Analysis of beam slowing-down process in LHD based on Fokker-Planck operator including beam-beam Coulomb collision effect”, accepted for publication in *Nuclear Fusion*.
- [4.3-4] K. Ogawa et al., “Energetic-ion Confinement Studies by Using Comprehensive Neutron Diagnostics in the Large Helical Device”, Preprint of the 27th IAEA Fusion Energy Conference, Gandhinagar, India, 22-27 October 2018 EX/P3-20.
- [4.3-5] M. Isobe et al., “Neutron Diagnostics in the Large Helical Device”, *IEEE Transactions on Plasma Science* 46 (2018) 2050.
- [4.3-6] M. Isobe et al., “Fusion neutron production with deuterium neutral beam injection and enhancement of energetic-particle physics study in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 082004.
- [4.3-7] H. Kawase et al., “Initial results of neutron emission profile measurements in LHD deuterium plasmas”, *Plasma and Fusion Research* 13 (2018) 3402122.
- [4.3-8] K. Ogawa et al., “The Large Helical Device Vertical Neutron Camera Operating in the MHz Counting Rate Range”, accepted for publication in *Review of Scientific Instruments*.
- [4.3-9] K. Ogawa et al., “Time-resolved triton burnup measurement using the scintillating fiber detector in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 034002.
- [4.3-10] N. Pu, et al., “Scintillating fiber detectors for time evolution measurement of the triton burnup on the Large Helical Device”, *Review of Scientific Instruments* 89 (2018) 101105.

- [4.3-11] K Ogawa et al., “Time dependent neutron emission rate analysis for neutral-beam-heated deuterium plasmas”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 60 (2018) 095010.
- [4.3-12] N. Pu et al., “Initial results of triton burnup study in the Large Helical Device” accepted for publication in *Plasma and Fusion Research*.
- [4.3-13] K Ogawa et al., “Study on First Orbit Losses of 1 MeV Triton using the Lorentz Orbit Code in the Large Helical Device”, accepted for publication in *Plasma Science and Technology*.
- [4.3-14] H. Matsuura et al., “Observation of a knock-on tail formed by energetic protons in the Large Helical Device deuterium plasma” submitted to *Physical Review Letters*
- [4.3-15] K. Ogawa et al., “Magnetic Configuration Effects on TAE-Induced Losses and a Comparison with the Orbit-Following Model in the Large Helical Device,” *Nucl.Fusion*, 52 (2012) 094013
- [4.3-16] K. Ogawa et al., “A Study on the TAE-Induced Fast-Ion Loss Process in LHD,” *Nucl. Fusion*, 53 (2013) 053012
- [4.3-17] M. Osakabe et al., “Experimental Observations of Enhanced Radial Transport of Energetic Particles with Alfvén Eigenmode on the LHD,” *Nucl. Fusion*, 46 (2006) s911
- [4.3-18] K. Toi et al., “MHD Modes Destabilized by Energetic Ions on LHD,” *Fusion Sci. Technol.*, 58 (2010) 186
- [4.3-19] K. Toi et al., “Energetic Ion Driven Alfvén Eigenmodes in Large Helical Device Plasmas with Three-Dimensional Magnetic Structure and Their Impact on Energetic Ion Transport,” *Plasma Phys. Control. Fusion*, 46 (2004) S1
- [4.3-20] X. D. Du, et. al., “Resistive Interchange Modes Destabilized by Helically Trapped Energetic Ions in a Helical Plasma”, *Phys. Rev. Lett.* 114 (2015) 155003
- [4.3-21] Ya. I. Kolesnichenko, et. al., “Alfvén eigenmodes and their destabilization by energetic circulating ions in Wendelstein-line stellarators” *Nucl. Fusion* 42 (2002) 949
- [4.3-22] K. Ogawa et al., “Observation of enhanced radial transport of energetic ion due to energetic particle mode destabilized by helically-trapped energetic ion in the Large Helical Device”, *Nuclear Fusion* 58 (2018) 044001.
- [4.3-23] K. Ogawa et al., “Neutron flux measurement using a fast-neutron scintillation detector with high temporal resolution on the Large Helical Device”, *Plasma and Fusion Research* 13 (2018) 3402068.
- [4.3-24] K. Ogawa et al., “Effect of the Helically-trapped Energetic-ion-driven Resistive Interchange Modes on Energetic Ion Confinement in the Large Helical Device”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 60 (2018) 044005.

#### 4.4 プラズマ壁相互作用 (PWI)

プラズマ壁相互作用 (PWI) に関する研究では、材料中に吸蔵された水素の挙動を調べることが重要である。軽水素は自然界に多く存在することから、プラズマとの相互作用による水素と背景水素の切り分けができなかった。一方、重水素実験では、自然界にほとんど存在しない重水素や DD 反応の結果発生するトリチウムを対象とした解析が可能なため、材料中の水素 (同位体) を直接観測できるようになり、プラズマ壁相互作用 (PWI) に関する研究の可能性が広がった。また、PWI 関連研究は大学との共同研究も盛んであり、多くの関連データが大学との共同研究によって得られている。

##### 4.4.1 重水素化ジボランを用いたボロニゼーションによる軽水素軽減効果

ボロニゼーションは酸素などの不純物軽減を主目的とした壁コンディショニング法の一つであり、LHD ではジボラン ( $B_2H_6$ ) ガスを用いたボロニゼーションを行ってきた。LHD 国際プログラム委員会からの提言もあり、ジボランに含まれる軽水素による重水素比の低下を防ぐために、重水素実験開始以降は重水素化ジボランガス ( $B_2D_6$ ) を使用したボロニゼーションを JT-60SA との共同研究として実施している。また、新たなボロン被覆の可能性として、プリンストン・プラズマ物理研究所 (PPPL) との共同研究により 2018 年からダストドロッパーを LHD へ取りつける計画が始まり、現在、設計活動を実施している。この方法を用いれば、実験中にボロニゼーションを行うことが可能となる。

##### 4.4.2 真空容器内のトリチウム分布計測

真空容器内におけるトリチウムの定量的な分布測定は、水素挙動の理解の観点に加えて、トリチウム計量管理の観点からも重要である。トリチウムの総分布を計測することを目的として、第一壁に設置した試料やダイバータ受熱板を対象として、イメージングプレート分析によるトリチウムの計測を、北海道大学、静岡大学、九州大学との共同研究として行った。イメージングプレート分析は計測対象上に被せた輝尽性蛍光フィルムにトリチウムからの  $\beta$  線のエネルギーを蓄積することによって、数  $\mu m$  程度の深さの材料表面近傍に捕捉されているトリチウムの 2 次元分布を計測するものである。

図 4.4.2-1 にトーラス内側赤道面の左右のダイバータ受熱板における IP 像を示す。IP 像の色はトリチウムの分布密度を示しており、青はバックグラウンド、緑は低密度、赤は高密度を示している。左側ダイバータの IP 像の左側に並べた正方形のアレイはトリチウム密度の基準となる標準試料であり、標準試料と色の比較によりトリチウムの表面密度を推定することが可能である。ダイバータ受熱板は 2 枚 1 組で構成され、主に下側がダイバータレッグのストライク点で、上側はバッフル板として働いているが、左右のダイバータ受熱板ともプラズマが当たらない上側部でトリチウム密度が高いことが明らかとなった。これまでの研究で、上部タイルにはストライク点からスパッタリングされた炭素による堆積層が形成していることがわかっており、堆積層にトリチウムが捕捉されていることが示唆される。一方で、高粒子束のダイバータプラズマに曝され、プラズマによる損耗が支配的な下部タイルの特にストライク点近傍ではトリチウムの蓄積が少ない。

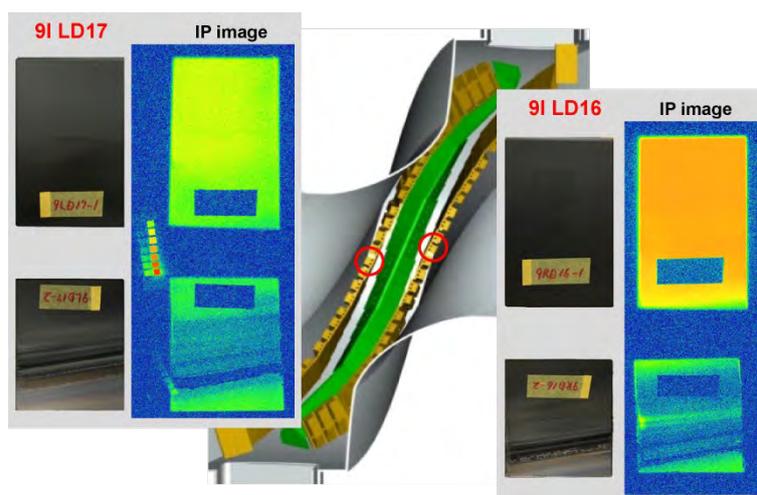


図 4.4.2-1 トーラス内側ダイバータ受熱板におけるイメージングプレート像

真空容器第一壁の特徴的な場所に設置した試料のイメージングプレート分析を行った結果を図 4.4.2-2 に示す。LHD ではプラズマと第一壁がトーラス内側で接近し、トーラス外側では離れているために、内側は損耗が支配的で、外側では堆積が支配的になる傾向があるが、堆積層形成が顕著なトーラス外側に設置した試料において、比較的多くトリチウムが検出された。

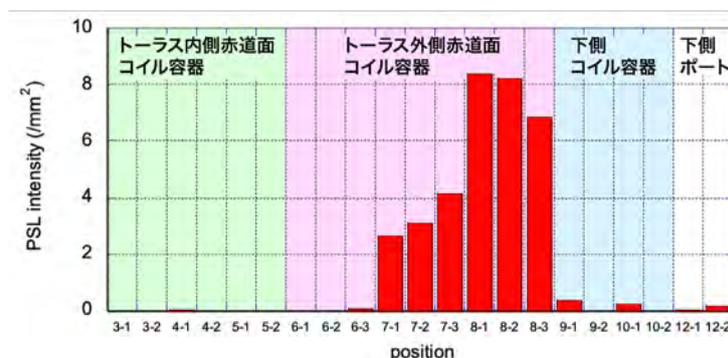


図 4.4.2-2 真空容器第一壁におけるイメージングプレート分析

イメージングプレート分析は材料表面におけるトリチウムの 2 次元分布を測定できる一方で、材料中に深く拡散したトリチウムを検出できないことから、昇温脱離分析 (TDS) 装置を用いたトリチウムの全量測定も行っている。この装置は静岡大学との共同研究で開発され、四重極質量分析に加えて比例計数管を用いて脱離ガスを測定することで、極少量のトリチウムも測定することが可能な装置である。図 4.4.2-3 に損耗が支配的な試料と堆積が支配的な試料からの昇温脱離スペクトルを示す。堆積が支配的な試料からのみ、1,000°C 付近でトリチウム放出のピークが検出されており、堆積層が水素同位体の保持に寄与していることが示される。

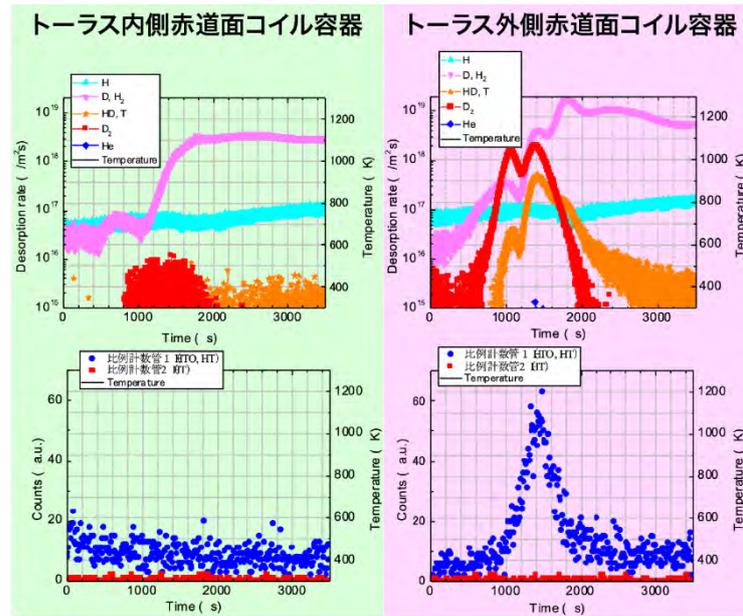


図 4.4.2-3 真空容器第一壁試料の昇温脱離スペクトル。上図は四重極質量分析による水素同位体の昇温脱離スペクトル。下図は比例計数管によるトリチウムの昇温脱離スペクトル。

イメージングプレート分析と昇温脱離分析によって、ダイバータ受熱板上のストライク点から離れた部分や、第一壁のプラズマから離れた部分など、堆積層が発達しやすい部分にトリチウムが高い密度で分布していることを明らかにした。

#### 4.4.3 環状プラズマにおけるタングステン Fuzz 構造の形成

タングステンに高粒子束のヘリウムプラズマを照射すると、Fuzz と呼ばれる綿毛状のタングステンナノ構造が形成されることが、直線プラズマ装置によるヘリウムプラズマ照射実験では広く知られているが、環状プラズマ閉じ込め装置では、これまで報告されていない。そこで、LHD の長時間放電を用いて、環状プラズマ閉じ込め装置では初めて、ヘリウム照射によるタングステン Fuzz 構造の形成を確認した。タングstenは融点が約 3,400°C と非常に高く、熱伝導率が 173W/m・K と高いので、将来の核融合炉におけるダイバータの有力な材料として期待されているが、Fuzz 構造が形成されると実質的な熱伝導率が劣化し、ダイバータ損耗の原因となり得るため、環状プラズマ装置におけるタングステン Fuzz 構造形成メカニズムを理解する必要がある。

試料駆動装置を用いてタングステン板をダイバータレッグ位置まで挿入し(図 4.4.3-1)、計 10,190 s の複数のロングパルス放電で照射した。ダイバータレッグ幅はおおよそ 2 cm で、プラズマの温度、密度は、それぞれ 100~200 eV、 $\sim 5 \times 10^{25}$  He/m<sup>3</sup> と推定され、IR カメラで測定した典型的な表面温度は 1,900~2,300 K であった。照射後のタングステン表面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、図 4.4.3-2 (a)に示すような初期フェーズの Fuzz ナノ構造が形成されていることを確認した。収束イオンビーム(FIB)によって試料断面を切り出し、断面

構造を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察したところ、図 4.4.3-2 (b)に示すようにヘリウムバブルによって、表面凹凸が成長し始めていることが示された。また、タンデム加速器を用いた反跳粒子検出法(ERD)で測定したヘリウム表面密度は  $8 \times 10^{21}$  He/m<sup>2</sup> であった。今後は、LHD の重水素定常放電を利用して、重水素/ヘリウム比を変化させ、この違いがタングステン Fuzz 形成に与える影響を調べる予定である。

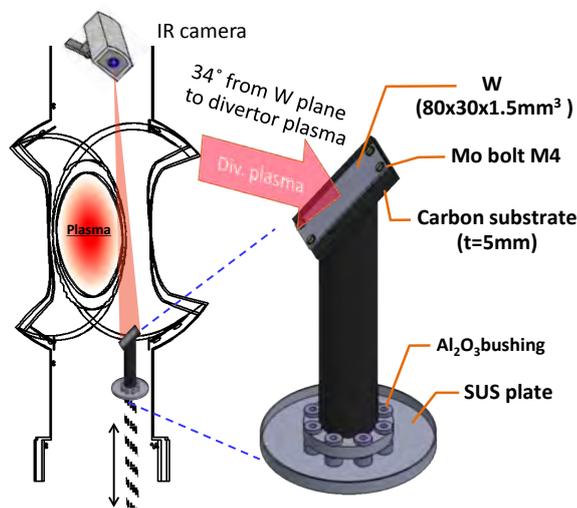


図 4.4.3-1 ダイバータプラズマ照射実験の概念図[4.4.2-1]

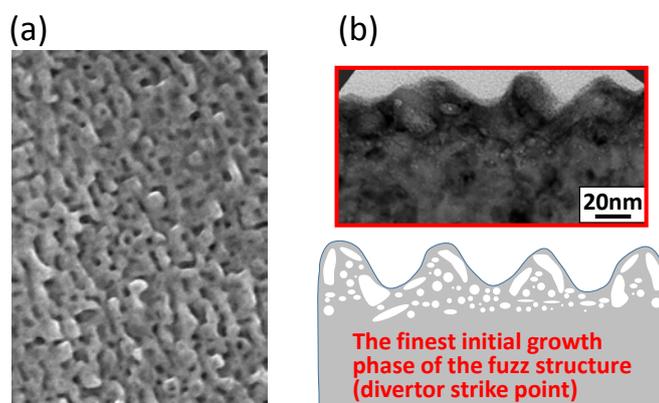


図 4.4.3-2 LHD でヘリウムプラズマを 10,190 秒間照射したタングステン試料の (a) 走査型電子顕微鏡像、及び (b) 断面の透過型電子顕微鏡像。

[4.4.3-1] M. Tokitani et al., Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 1358

#### 4.5 今後の展開

現在(2018 年度)、LHD では第 2 年次の重水素実験を実施している。地元との合意に基づいて設定された 9 年間という限られた重水素実験実施期間を有効に活用して、1 章にて示された重水素実験において重要な研究課題に取り組む。

重水素実験前半の 6 年間は、プラズマの高性能化を実現し、実現された高性能プラズマ

を活用して同位体効果研究を始めとするプラズマの閉じ込め特性、プラズマの不安定性や高エネルギー粒子の振る舞いなどに関する学術的な研究を重点的に推進し、将来のヘリカル型核融合炉の設計・製作に必要な物理データベースの構築を進める。また、高性能プラズマの実現に必要な NBI を始めとする加熱機器の高性能化や ECH の最適化などといった加熱手法の最適化に関する研究も並行して行う。重水素実験後半の3年間については、定常高性能プラズマの実現を目指すとともに、高熱負荷環境下でのダイバータ等のプラズマ対向材料研究や同材料中における水素同位体の振る舞いに関する研究を重点的に進め、将来の核融合炉における水素同位体収支に対する理解を加速し、核融合炉実現に必要な工学的なデータベースの蓄積を図る。各実験期間において、研究課題の重点化は行うが、それ以外の課題を完全に排除するものではない。例えば、後半3年間において研究を実施するのに必要な準備研究は前半の6年間に実施する。また、前半6年間ににおいて整備されたデータベースを高精度化するための研究などは後半3年間においても引き続き実施する。

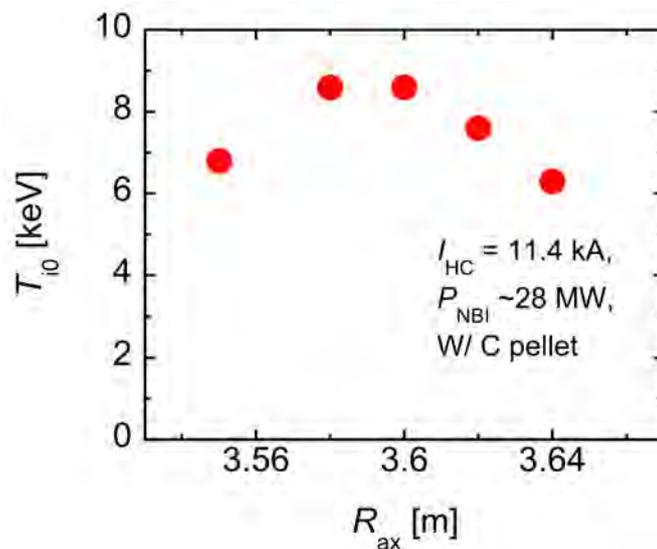


図 4.5-1 LHD 高イオン温度放電における中心イオン温度の磁気軸位置依存性

LHD の磁場配位は、磁気軸位置を外側にする事で深い磁気井戸が形成され、電磁流体的には安定になることが知られている。一方で、磁気軸位置を内側にする事で、ヘリカルリップル捕捉粒子の軌道が磁気面と一致し、良好な粒子閉じ込め特性が実現することが知られている。プラズマ閉じ込め全体の特性を考えた上で磁気軸位置をどのように配置するのが最適であるかということが、ヘリオトロン配位の最適化研究の上での重要な課題の一つとなっている。図 4.5-1 に LHD プラズマで達成されたイオン温度の磁気軸位置依存性を示す。図 4.5-1 に示されるようにイオン温度は磁気軸位置 3.6m 近傍で最大となっており、配位を最適化して高性能プラズマを実現する上では粒子の閉じ込め特性を重要視する必要性が示唆される。なお、村上らの成果[4.5-1]によれば、LHD においては磁気軸位置 3.53m で粒子閉じ込めが最適化されることが指摘されているが、図 4.5-1 では磁気軸位置 3.6m よりも内側の領域でイオン温度が劣化している。負イオン源 NBI は、LHD の円環プラズマに対して接するように配置されており、それらの接線半径は 3.75m(NBI#1,#2)及び 3.7m(NBI#3)に設

定されている。これらの接線半径よりも内側にプラズマの磁気軸位置を寄せた場合においては負イオン源 NBI の加熱効率が劣化するため、その影響が 3.6m よりも内側の磁気軸位置の領域で表れていると考えられる。図 4.3.1-3 に示されるように、加熱効率の磁気軸位置依存性に影響されないトリトン燃焼率は磁気軸位置 3.55m で実験観測が最大となっていることから、図 4.5-1 に見られる 3.6m よりも内側の磁気軸位置の領域でのイオン温度の劣化が負イオン源 NBI の接線半径と磁気軸位置から決まっていることが分かる。一方、図 4.5-2[4.5-2]に示されるように、実験で評価される LHD の高イオン温度プラズマの閉じ込め特性は、粒子軌道特性によって決定付けられる新古典理論で評価されたものよりも悪く、閉じ込めはいわゆる異常輸送によって決定されている。これらの事実は、本来粒子軌道とは関係の無い異常輸送が、粒子軌道によって決定される新古典輸送にリンクしていることを示唆する。

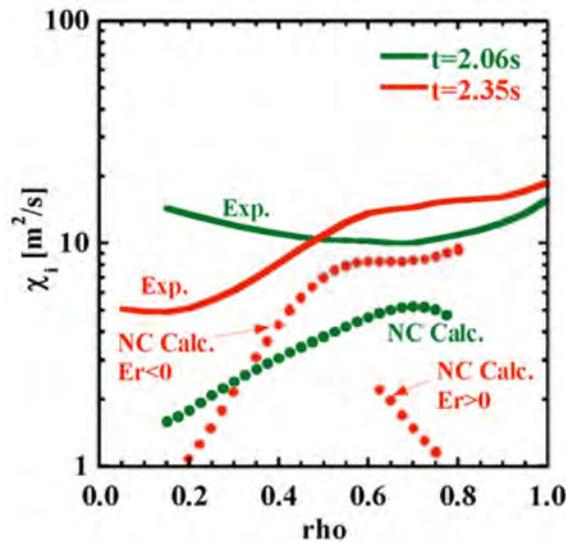


図 4.5-2 高イオン温度放電に対して評価された熱拡散係数(軽水素期)。実線:実験データより評価された拡散係数、点線:新古典理論より評価された拡散係数[4.5-2]

また、実験データから評価されるエネルギー閉じ込め時間( $\tau_E^{\text{exp}}$ )を ISS04 スケーリング則から得られる閉じ込め時間( $\tau_E^{\text{ISS04}}$ )で規格化することによって得られる閉じ込め改善度( $\tau_E^{\text{exp}} / \tau_E^{\text{ISS04}}$ )も、新古典理論における閉じ込めの指標である実効ヘリカルリップルに依存し、実効ヘリカルリップルが減少するにつれて、閉じ込め改善度が向上することが示唆されている[4.5-3]。今後の LHD の研究の方向性としては、このような異常輸送と新古典輸送の相関に焦点を当て、そのメカニズムの解明を目指すことが重要であると考えられる。特に、実験から評価される熱拡散係数を、異常輸送に影響を与えられられる乱流揺動の計測結果や新古典輸送から評価される熱拡散係数との相関について様々な磁場配位に対して調べていくことが重要である。さらに、乱流揺動についても、数値実験炉研究プロジェクトで開発が進められている GKV 等の乱流輸送コードによるシミュレーション予測と実験観測との比較を行い、将来の核融合炉設計に必要なシミュレーションコードの検証を進める。このような検証

は、プラズマ閉じ込めにおける同位体効果の解明も念頭に置いて実施する。

将来の核融合炉では、核融合反応の結果生成される高エネルギーのアルファ粒子によって、プラズマの燃焼維持がされるので、その運転制御に当たっては、高エネルギーアルファ粒子の分布をリアルタイムで評価する必要がある。現状の軌道追跡を含めた第一原理に基づくシミュレーションコードによる予測は膨大な計算資源を必要とするため、リアルタイム予測を行うことは、現状では非常に困難である。そこで、フォッカープランク(Fokker-Plank: FP)方程式と簡易な輸送モデルに基づくシミュレーション予測手法の確立が求められる。4.3.2節で述べたように、重水素実験においては中性子発生率が高エネルギー閉じ込めを表す良い指標となっており、図 4.3.1-1 に示されるような NBI を短パルス入射した放電に対して、フォッカープランク方程式 に基づくシミュレーション計算(FP 計算)で中性子発生率の時間変化を評価して、実験とFP 計算で得られた中性子発生率の減衰時間( $\tau_n^{\text{exp.}}$ ,  $\tau_n^{\text{cal.}}$ )を評価し、高エネルギー粒子の実効的な閉じ込め時間( $\tau_c^{\text{eff.}}$ )を評価している(図 4.5-3)。

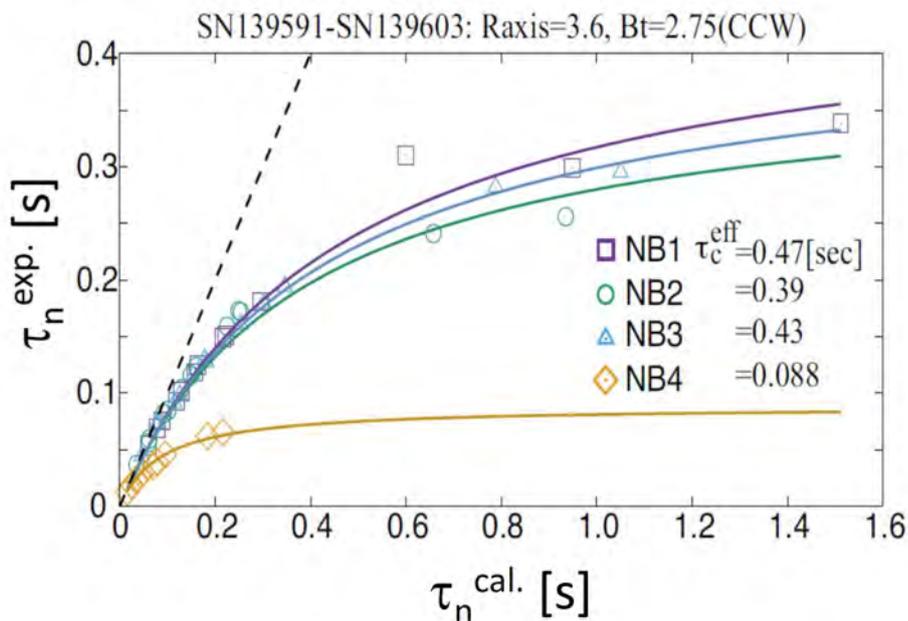


図 4.5-3 NBI 短パルス入射した放電に対する中性子発生率の減衰時間の実験値( $\tau_n^{\text{exp.}}$ )とFP 計算値( $\tau_n^{\text{cal.}}$ )の比較。印及び色の違いは短パルスした NBI の違いを示す。このデータ点に対して  $1/\tau_n^{\text{exp.}} = 1/\tau_n^{\text{cal.}} + 1/\tau_c^{\text{eff.}}$  を仮定して、最小二乗フィッティングに基づいて評価した  $\tau_c^{\text{eff.}}$  を図中に示す。実線は各データセットに対する最小二乗フィッティングの結果を表す。

このような閉じ込め時間の評価を異なる磁場配位や磁場強度に対して行い、最終的には VNC による中性子空間分布計測のデータも用いて高エネルギー粒子の拡散係数として、磁場強度や磁場のフーリエ成分に対するモデル化を進める。カリフォルニア大学アーバイン校のハイドブリンク教授らのグループによる最近のトカマク型装置における高エネルギー粒子閉じ込めに関する研究では、アルフベン固有モードなどの高エネルギー粒子励起不安定性による高エネルギー粒子閉じ込め輸送についても、シミュレーション計算から得られる不安定性の線形成長率及び固有関数、並びに実験観測から評価される高エネルギー粒子の拡

散係数を用いたモデルによって、高エネルギー粒子の空間分布評価が可能であることが示唆されている[4.5-4]。LHD においても、このようなモデルの構築を試み、高エネルギー粒子不安定性による高エネルギー粒子輸送について、トカマク型装置並びにヘリカル型装置に共通した理解を得ることを目指す。

定常放電とそれを利用した PWI 研究は重水素実験の大きな柱の一つである。軽水素実験期における LHD の大きな成果としては、定常放電中の壁排気の変化が挙げられる[4.5-5]。プラズマ実験中の粒子バランスは、ガスパフからの供給量及び真空排気ポンプによる排気量並びに真空容器壁による排気量によって決まる。真空容器壁による排気は真空容器壁材料による水素同位体やヘリウムなどの粒子吸蔵に起因するものなので、長時間のプラズマ実験を行う場合には、ある程度の時間を経たところで飽和することが予想される。このことから、定常放電の放電終盤においては、粒子排気は真空排気ポンプのみによるので、密度を一定に維持するのに必要な供給ガス量は減少することが予想される。

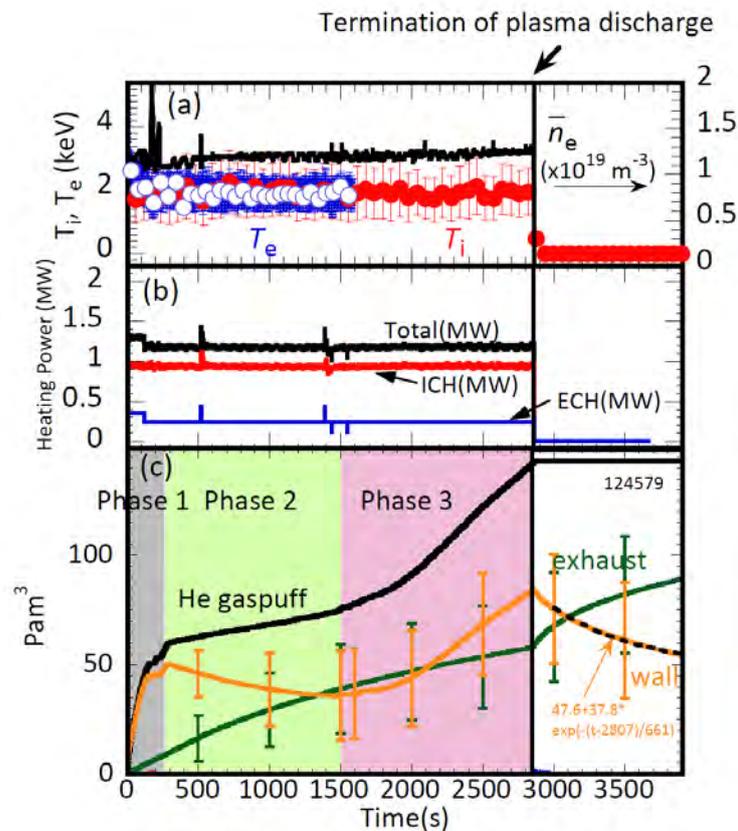


図 4.5-4 LHD 定常放電における(a)電子温度(○)、線平均電子密度(黒線)、イオン温度(●)の時間変化、(b)ECH(青線)及び ICRF(赤線)による加熱電力、並びに全加熱電力(黒線)、(c)ガスパフによる粒子供給量(黒線)、真空ポンプによる排気粒子量(緑線)、両者の差分より求めた真空容器壁による粒子排気量(黄線)

図 4.5-4 に、軽水素実験期間中に実施された LHD 定常放電におけるプラズマパラメータの変化と粒子バランスの変化を示す。実験は定常加熱源として優れた ICH を利用し、ヘリウムプラズマ中の軽水素マイノリティ加熱に基づく放電シナリオで実施された。図 4.5-4(c)に放

電中のガスパフによる粒子供給量及び真空ポンプ並びに真空容器壁によるガス排気量を示す。これらのグラフは積分値を示しているため、それらの傾きが各時刻におけるガス供給率及び排気率を示す。放電の初期においては、真空容器壁による真空排気が支配的であるが(Phase 1)、放電開始から 300 秒程度で、真空容器壁材料による粒子の吸蔵量が飽和し、それ以降は吸蔵した粒子の放出に転じている(Phase 2)。ところが、放電開始から 1,500 秒程度過ぎたところで、真空容器壁による排気が再開されている(Phase 3)。その後の解析の結果、この真空容器壁による排気の再開が、ダイバータ上に放電中に形成された炭素や鉄の混合再堆積層に起因していることが明らかとなった。このように、定常放電などのように長い時間スケールで発現する PWI 現象については、未解明な部分が残されている。軽水素実験期においては、ヘリウム放電を用いた ICH 加熱シナリオで定常放電を実施し、主にヘリウムを対象とした PWI 研究を行っていた。重水素実験では、ヘリウムを重水素に置き換えた ICH 加熱シナリオが成立するため、長時間スケールにおける水素同位体に関する PWI 研究を実施することが可能となる。また、 $\alpha$  灰としてのヘリウムと水素同位体が混在した状態での PWI 研究も可能である。このような、将来の核融合発電炉を実現する上で重要な PWI 研究は、定常運転性能に優れる LHD で実施することが理想的であり、重点課題として実施する。

さらに、LHD 重水素実験では、地元自治体と締結した協定書に基づきトリチウム除去装置が設置され、LHD の真空排気のみならず、NBI や計測機器などの周辺機器の真空排気、全てがトリチウム除去装置を通過するように真空排気システムが構成されているため、LHD プラズマで発生したトリチウム全量を、トリチウム除去装置によって把握することが可能である。また、プラズマ中で発生したトリチウムは中性子発生量から評価することが可能であるため、トリチウムをテスト粒子として利用することで、燃料ガス収支に関する研究を展開することが可能となっている。トリチウムの収支の把握は、地元自治体と締結した協定を遵守した安全管理を実施する上でも重要なため、トリチウムをテスト粒子として利用した水素同位体収支に関する研究は、真空容器内におけるトリチウムの分布評価を含めて、重点課題として実施する。

[4.5-1] S.Murakami et al., “Neoclassical Transport Optimization in LHD”, Fusion Sci. Technol. 46 (2004) 241

[4.5-2] K.Nagaoka et al., “Ion Heating Experiments and Improvement of Ion Heat Transport in LHD”, Fusion Sci. Technol. 46 (2004) 241

[4.5-3] H.Yamada et al., “Characterization of energy confinement in net-current free plasmas using the extended International Stellarator Database”, Nucl. Fusion, 45 (2005)

[4.5-4] W.W.Heidbrink et al., “The effect of the fast-ion profile on Alfvén eigenmode stability”, Nucl. Fusion 53 (2013) 093006

[4.5-5] G. Motojima et al., “Global Helium Particle Balance in LHD”, J. Nucl. Mater., 463, 1080 (2015)

## 5. 国際的な共同研究の取り組み状況

研究所は、これまでも国内の大学・研究機関との共同研究とともに、国際共同研究も推進してきた。本章では特に、核融合科学研究所が ITER を始めとする海外の研究機関において行っている共同研究について記載する。

### 5.1 計測器開発

#### (1) 中性子計測

LHD の重水素実験用に開発した中性子計測器に関する知見を活用し、ITER の中性子計測器の開発を量子科学技術研究開発機構 (QST) 那珂核融合研究所と共同で進めている。「ITER マイクロフィッションチェンバーのその場較正手法の確立」を平成27年度から平成29年度にかけて実施した。本共同研究は、核融合科学研究所側、那珂核融合研究所側の研究総括責任者を、それぞれ、磯部光孝教授、石川正男主幹研究員とし、両研究所から計5名の研究者が参加した。LHD の重水素実験開始に向けて平成28年11月に実施した中性子フラックスモニター (NFM) のその場較正実験に対して、両研究所が共同で検討、解析及び試験を実施した。LHD の NFM の較正係数を精度良く得るための研究を通じて、その知見を日本が調達する ITER 用中性子計測装置マイクロフィッションチェンバーに対して ITER で実施されるその場較正実験に活かす形の効率的な較正実験手法の確立を目指した。また、JT-60SA の NFM に対して実施するその場較正実験にも活かすことができる。LHD における NFM のその場較正実験には、ITER 機構から Vitaly Krasilnikov 博士も参加し、IO との緊密な連携の下で実施した[5-1,2]。

その他、「原型加速器の入射器重水素運転時における DD 中性子発生率評価」(平成27年度～平成28年度)[5-3]、及び「原型炉におけるプラズマ物理設計の研究」(平成26年度～平成28年度)についても実施している。

また、2018年から、ITER Scientist Fellowship (IFS)として、ITER の中性子計測に対する助言を行っている。2018年度は ITER 機構担当者と協力して中性子較正実験の全体計画の立案を行った。ITER では、遠隔保守装置の先端に中性子源(D-D 中性子発生管または D-T 中性子発生管は主案、252Cf 中性子源はオプション)を取り付けて中性子フラックスモニター等の中性子検出器の較正を行うが、真空容器内の数点に D-D 中性子発生管を移動させて行う部分較正、D-D 中性子発生管を真空容器内1周移動させる D-D 実験前のフル較正実験、D-T 中性子発生管を真空容器内1周移動させる D-T 実験前のフル較正実験の3段階で中性子較正実験を行うこととした。さらに、LHD 及び JT-60U の中性子較正実験の結果を分析し、部分較正実験と MCNP によるシミュレーションを組み合わせることにより、フル較正実験の結果を精度良く推定できることを示した。

LHD は、負イオン源を用いた NBI を主力加熱装置として運用している唯一の円環磁場閉じ込め装置である特徴を活かして、軽水素実験期から、世界の磁場閉じ込め円環プラズマにおける高エネルギー粒子物理研究を牽引してきた。重水素実験を開始することで、中性子計測により高エネルギー粒子の巨視的な閉じ込めが議論できるようになったため、ますます注目を浴びている。例えば、3.3.1.1 節で紹介されたシンチレーティングファイバー検出器

は、W7-X(独国・マックスプランクプラズマ物理研究所、コシンスキー氏)及び KSTAR(韓国・ソウル国立大、ジョ氏)での導入が決まり、その準備研究として、LHD における共同研究が開始された。また、中性子計測と高速荷電交換分光計測を組み合わせて、3次元磁場円環閉じ込め装置における高エネルギー粒子の振る舞いを調べることを目的とし、米国・カリフォルニア大アーバイン校のハイドブリンク教授が2018年度に核融合科学研究所の客員教授として招聘され、共同研究が開始された。さらに、3次元磁場円環閉じ込め装置における高エネルギー粒子の閉じ込めを評価する解析コード(ASCOT)の検証を、LHD 重水素実験に中性子計測を用いて行うための共同研究が、独国・マックスプランクプラズマ物理研究所、シンパ博士により提案され、進められている。



図 5.1-1 中性子計測を軸とした高エネルギー粒子閉じ込め物理に関する国際共同研究の実施風景。左より、ジョ氏(韓国・ソウル国立大)、コシンスキー氏(独国・マックスプランクプラズマ物理研究所)、西谷教授(核融合科学研究所)、ハイドブリンク教授(米国・カリフォルニア大アーバイン校)、小川博士(核融合科学研究所)

## (2)ITER 用イオンサイクロトロン放射計測

イオンサイクロトロン放射(Ion Cyclotron Emission: ICE)は高エネルギー粒子の振る舞いを反映するため、以前から高エネルギー粒子の計測方法として期待がされてきた。非接触かつ受動的計測であるため、ITER で計測器として有用である一方、これまで具体的な狙いの検討や設計が行われていなかった。LHD では韓国の浦項工科大学、英国のウォーリック大学との共同研究で、ICE を中心とするプラズマから放出される高周波の計測を2012年から行っている。本共同研究グループは、実験とともに理論・シミュレーションからのアプローチも行っている。そのため、ITER 側からの要請により、2018年からITER Scientist FellowとしてLHD のICE計測の情報提供を行っている。

### (3) ディスパーション干渉計

核融合科学研究所では、干渉計でありながら機械振動の影響を受けにくいディスパーション干渉計をLHDにて実用レベルまで改良し、その有用性をITPAなどを通じて広めてきた。ディスパーション干渉計は、その革新的なアイデア自体は1990年代頃からあった。しかし、計測精度が上がらない等の問題があり、利用が進んでいなかった。核融合科学研究所では、ディスパーション干渉計の精度向上のため新しい変調信号処理を開発し、LHDで高精度計測を実証した。LHDでの開発成果は2009年からITPAで報告を続け、ディスパーション干渉計の有用性が徐々に認められ始め、ITER計画でも採用される運びとなった。

当初のITER計画では、線平均電子密度計測には2波長ヘテロダイン干渉計が1台のみ(Toroidal Interferometer Polarimeter: TIP)であった。そのため、TIPでトラブル発生した際は、線平均電子密度情報が無くなり、ITER実験を遂行できない可能性があった。また、ファーストプラズマ実験期にはTIPがまだ設置されないため、着火のECHアシスト時の安全性の観点から、ファーストプラズマ実験期からの電子密度計測の必要性が指摘されていた。これを受けて、2015年に”Engineering support to ITER Diagnostics Interferometer”という3年間の外部契約をITER機構と核融合科学研究所で締結し、秋山がexternal contractorとしてITER用ディスパーション干渉計システムの設計を開始した。設計に対する要請条件は、主たる密度計測器であるTIPのバックアップとともに、ファーストプラズマ実験期からの電子密度計測である。設計活動が後発であるために設置場所の制約を受けたが、ディスパーション干渉計は除振が不要でシステムが簡素になることから、制約の範囲内で設計が可能であった。また、LHDで高精度計測と高信頼性が実証されており、低密度が予想されるファーストプラズマ実験期でも、その要請を十分満たすことができる。本システムはDensity Interferometer Polarimeter (DIP)と呼ばれ、LHDでのディスパーション干渉計とそこでの経験をベースにして設計を進めている。2017年1月には概念設計レビューを実施し、現在の予備設計レビューに向けた検討を行っている。2018年からはITER Scientist Fellowとして、LHDでの干渉計運用の経験を基に、ITERの電子密度計測全般に対する技術助言も行っている。

ITER用のディスパーション干渉計開発とともに、JT-60SA用ディスパーション干渉計の設計活動も行っている。JT-60SAでは、主たる線平均電子密度計測器として2波長干渉偏光計が計画されており、現在、設計や試験が進められている。線平均電子密度はプラズマ実験を遂行する上で必須なパラメータであり、複数の計測で冗長性を確保する必要がある。

2015年に日本原子力研究開発機構の受託研究「JT-60SAにおけるディスパーション干渉計の設計検討及び計測性能評価」を締結し、JT-60SAでのバックアップ用電子密度計測器としてのディスパーション干渉計システムの設計を行っている。本システムは、LHDに設置したディスパーション干渉計、及びFFHRに向けたディスパーション干渉計のベンチテストの成果をベースにしている。本設計及び試験活動は、受託研究を終了した2016年からは、トカマク炉心プラズマ共同研究「JT-60SAにおける先進的電子密度計測に関する開発研究」として引き続き継続している。2016年から2018年までの共同研究は、共同研究終了時に「平成29年度JT-60共同研究優秀賞」を受賞した。

## 5.2 加熱機器開発

### (1)ICRF 発振器の開発

ITER では、ICRF 加熱システムの高周波発振器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(65MHz)での発振試験データを必要としていた。一方、LHD においては、定常加熱実験の実績及び成果を通して、ICRF 加熱システムの高い性能が国際的に評価され、また、4CM2500KG を用いた大電力定常発振試験を行えるのは、LHD の ICRF 加熱システムにおいて他にないという状況であった。そこで、2009～2010 年に向け、ITER 委託共同研究に基づき、4CM2500KG を用いた高周波発振器の発振試験を行った。その結果、発振周波数 65MHz において、1.4MW / 3 秒、1.3MW / 10 秒、1MW / 100 秒の発振を達成し、試験結果を ITER へ報告した。

### (2)NBI の開発

核融合科学研究所の NBI グループは、ITER 用 NBI の主要拠点である、イタリアの consorzio RFX グループとドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所(IPP)、ITER の NNBI グループ、そして JT-60SA を建造中の量子科学技術研究開発機構(QST)と、以下の共同研究等の連携を行っている。

Conorzio RFX グループとは 2008 年から共同研究を継続しており、負イオン源内プラズマ計測とビーム計測に関する共同研究を継続して行っている。本年度、RFX グループは、最大 100 keV まで負イオンビームを加速可能な SPIDER と呼ばれる試験施設を建造終了した。SPIDER には ITER 用 NBI で用いる予定の RF 放電型負イオン源が設置されているが、現状でもビーム加速には至っていない。本グループは NBI 用負イオン源開発と実用化の経験が無かった。特に、ITER 用 NBI では 1 MeV/28 A/m<sup>2</sup> の大電力水素負イオンビームを加速する必要があるが、RFX 側には NBI テストスタンドが、一方、核融合科学研究所の NBI グループは、LHD 用負イオン源開発の豊富な実績と経験、そして NBI 用の幅広い設備を持っている。このため、共同研究の初期の段階では、日伊の 2 回の JSPF 二国間協定事業によって、核融合科学研究所ではビーム実験を行い、RFX ではビーム軌道計算によるベンチマークを行い、その結果を核融合科学研究所での実験にフィードバックを行って来た[5-4,5,6]。その際に、日本からは木崎助教が RFX グループへ訪問し、RFX グループからは、consorzio RFX の V. Antoni 博士、G. Serianni 博士、P. Agostinetti 博士、M. Brombin 博士、E. Sartori 博士らが来所した。ビーム軌道計算による共同研究が一段落付き、RFX 側からの提案による実験研究を行うことになった。毎年平均7名程度の研究者が核融合科学研究所に来所して、近年 consorzio RFX グループの研究のボトルネックである負イオンビーム加速の共同実験研究を核融合科学研究所の NBI テストスタンドで進めてきた。今年度は、日伊双方の日程調整が不可能なため、共同研究は行わないが、来年度 6 月に負イオン源内の負イオンのエネルギー分布関数とビーム発散角との相関に関する共同研究を予定している。また、2017 年 11 月 12 日から同年 12 月 12 日まで、イタリアのパドバ大学の教員で consorzio RFX の研究員である E. Sartori 博士を招待研究者として核融合科学研究所に招聘した。その際

に、ビームがビームライン内の残留ガスと衝突することで生成するビームプラズマの密度、電子温度、プラズマ電位について、抑止電界エネルギー分析器を用いた計測研究を行った。同研究は 2018 年の国際負イオン会議(NIBS 2018)で同博士が発表し、論文化されている[5-7]。また、G. Serianni 博士によって、日伊の共同研究は核融合技術に関するシンポジウム(SOFT2018)でも発表された[5-8]。

ドイツ IPP の NNBI グループとは、2006 年から共同研究を開始し、①核融合科学研究所が用いているフィラメント・アーク放電方式と、IPP が用いている RF 放電方式で生成されたイオン源内プラズマの特性の相違、②負イオン生成を増大させるために導入するセシウムのイオン源内でのリサイクリング、③負イオン生成と負イオンビーム形成に関する水素同位体効果に関する共同研究を行ってきている [5-9,10,11,12,13]。IPP グループからは 2006 年から、同グループのリーダーである U. Fantz 教授を始め毎年 1 名の研究者が核融合科学研究所の NBI テストスタンドに訪れており、日本側から IPP の NNBI グループへ池田助教、永岡准教授が共同研究のために訪問した。特に本年度は、核融合科学研究所から負イオン密度計測用の Nd:YAG と He-Ne レーザーを持ち込み、中野助教が IPP の A. Mimo 博士とともに、キャビティリングダウン(CRD)計測装置を IPP の大型負イオン源 ELISE へ設置、調整した。また、同 CRD 装置を用いた共同研究を 2019 年 1 月に予定しており、水素同位体効果による負イオン生成の相違と、正イオンと電子密度との関連を調査する予定である。IPP の U. Fantz 教授、同志社の和田 元 教授、QST の柏木恵美子グループリーダーとは、ITER の次のステップである、商用実証炉 DEMO 用 NBI のデザインワークを将来の共同研究の課題としており、2018 年 6 月 7 日と 8 日に、同志社大学で”Workshop on NNBI systems for ITER and beyond”を開催した。

QST-NBI グループとの共同研究は 2011 年から 2017 年まで行った。次世代の核融合炉を目指すプラズマ閉じ込め装置では、長時間の NBI 入射が必要となってくる。その際、負イオン電流を増加させるために、イオン源内部に添加するセシウムの分布と蒸気圧に関するデータベースは皆無であり、今後の重要な課題となっている。当該研究課題では、負イオン源内のセシウムリサイクリングを最適化し、大電力負イオンビームを長期間・長時間加速する際の負イオン電流の維持を対象としている[5-14]。一昨年度より、QST から山口大学に移籍した吉田雅史助教と QST、核融合科学研究所間の共同研究として、素過程に基づくセシウムリサイクリングの研究を進めている。また、核融合科学研究所の津守教授は、QST、大学研究機関と核融合関連研究所で構成される「プラズマ実験・システム開発専門部会」の委員であり、JT-60SA の共同研究を含む研究計画、NBI 開発についての部会に参加している。

### 5.3 低温機器開発

#### (1) ITER 冷却システムの冷却プロセス研究

核融合科学研究所において LHD 液化冷凍機用に開発した低温プロセス実時間シミュレータ(C-PREST)を使用して、ITER 機構との契約に基づき、ITER 冷却システムの冷却プロセスに関する業務外部委託事業を実施している[5-15,16,17]。

「ITER クライオプラントのプロセス研究」は、2010 年 11 月～2014 年 3 月に行われた。研究

は2つの Phase に分かれている。Phase I では、ITER クライオプラントの実時間動的シミュレーション実施のため、必要な要素(バルブ、長尺配管、コールドサーキュレータ、補助コールドボックス、熱交換器など)のモデルを作成し、CEA グルノーブルで行われた ITER のコイル冷却系を模擬した HELIOS テストループの試験データを基に、それら要素の検証を行った。Phase II では、Phase I において開発した長尺配管要素などを使用して、TF コイル用構造物冷却シミュレーションモデルを作成した。CEA テストループの実験結果や他のシミュレータの結果との比較を行いながら、その精度を向上させた。その後、15&17MA プラズマ実験時の変動熱負荷に対する実規模 TF コイル用構造物の冷却シミュレーションを行い、その負荷変動を平滑化する方法の検討を行った。

「トカマククライオシステムの動的シミュレーション」は、2013 年 9 月～2020 年 9 月の期間で実施中である。冷凍機を除く ITER クライオプラント全体の冷却プロセス動的シミュレーションを次の9つのサブタスクに分けて実施している。他グループの成果との比較を行いながら、液化冷凍機や超伝導コイルなどから形成される ITER クライオプラント全体の冷却プロセス動的シミュレーションが可能なシミュレータを完成させた。現在は subtask 7 まで完了している。Subtask 1 では、TF 構造物のモデリングと 15MA 電流駆動条件下の冷却プロセス解析、Subtask 2 では、CS モデルコイルのモデリングとその検証、Subtask 3 では、補助コールドボックスを含む TF コイルのモデリングと冷却プロセス解析、Subtask 4 では、補助コールドボックスを含む CS コイルのモデリングと冷却プロセス解析、Subtask 5 では、補助コールドボックスを含むポロイダルコイル/磁場補正コイルのモデリングと冷却プロセス解析、Subtask 6 では、マグネットシステム統合シミュレーション、Subtask 7 では、Ecosim Pro と Visual Modelar のインターフェイス開発を行った。今後、Subtask 8 では、超伝導コイルシステムと液化冷凍システムの投稿シミュレーション、Subtask 9 では、改訂された中性子束を基に超伝導マグネットへの熱負荷を更新した 15MA 運転のシミュレーションを行う予定である。

## (2) ITER 及び ITER/BA 国内装置のための研究

日本原子力研究開発機構(JAEA)(現在の量子科学技術研究開発機構(QST))との JT-60SA の超伝導マグネットに関する共同研究として、2007 年からプラズマ平衡磁場(EF)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体の特性評価を開始した[5-18,19]。9T 用超伝導スプリットコイルを装備した大型超伝導導体試験装置に温度可変の流動冷却機能を追加することにより、まず、EF コイル用プロトタイプ型 CIC 導体の臨界電流値( $I_c$ )、電流分流開始温度( $T_{cs}$ )の評価試験、及び安定性試験を実施し、本導体の性能を評価した。続いて、2009 年から 2011 年にかけて EF コイル用実機導体と中心ソレノイド(CS)コイル用実機導体の  $T_{cs}$  測定と安定性試験を実施した。また、2008 年から 2014 年にかけて、中型超伝導導体試験装置を使用し、外部磁場環境下における EF コイル用と CS コイル用ジョイントサンプルの接続抵抗測定を行い、導体接続部の接続抵抗に関する基礎データを収集するとともに、ナノオームの低抵抗接続を開発することができた。さらに、直径 2 m のコイル試験が可能な強制冷却試験装置を用いて、2012 年に CS モデルコイル(1パンケーキ)の冷却と接続部抵抗測定を行い、翌年に定格電流までの通電試験を実施して、冷却特性と接続抵抗について基礎

データを得た。その後、4モジュールで構成される CS コイル実機の1モジュール(図 5.3-1)の冷却と励磁を 2016 年に実施し、健全性を確認した。

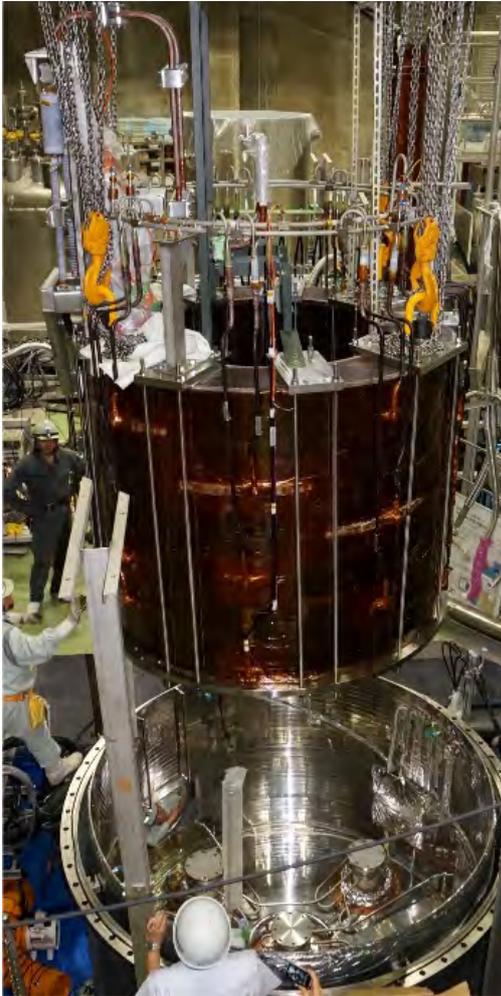


図 5.3-1 冷却装置に組み込み中の JT-60SA CS コイル

また、大電流導体の接続抵抗の高精度測定法を確立することを目的として、大型導体試験装置を用いて ITER のトロイダル磁場(TF)コイルの導体接続サンプルの接続抵抗を測定する試験を、量子科学技術研究開発機構及び民間との共同研究として 2013 年から実施している。核融合科学研究所の導体試験マグネット設備を用いてこの試験を行うための設計検討を 2012 年に行い、2013 年 7 月に最初の接続サンプルの試験を実施した。75 kA 直流電源を用いて定格 68 kA までの通電を行い、接続抵抗が要求値(2 T 以上の外部磁場で 68 kA 通電時の接続抵抗が 3 ナノオーム以下、かつ、温度依存性が小さいこと)を満足することを確認した。品質管理として各 TF コイル製作前に接続部サンプルを製作して接続抵抗を調べることが要求されており、2013 年から 2018 年の間に 8 本の接続サンプルの試験を実施し、全て要求性能を満足することを確認した。

#### 5.4 その他の ITER/BA 活動に対する貢献・国際共同研究の取り組み

ITER/BA 国内装置である JT60-SA 研究に対しても継続的な貢献を行っている。田中(謙)が輸送研究、鈴木(康)・森崎が周辺プラズマ物理研究、増崎がプラズマ壁相互作用、横山が運転シナリオの策定に参加し、Research Plan を QST の担当者と共同で執筆した。また、毎年 QST 那珂核融合研究所で行われる日欧の Research Coordination Meeting に出席し、JT-60SA の実験計画について議論している。設計への直接的な貢献として、田中(謙)は EUROfusion と共同で乱流計測の設計活動を、鈴木(康)は共鳴磁場コイル印加時の磁場構造に関する数値計算を、増崎は資料駆動装置の設計活動を行っている。また、同位体効果に関する環状プラズマにおける統一的な理解を得るために、同位体効果に関する共同研究を JET と開始する準備を進めている。

- [5-1] T. Nishitani, K. Ogawa, M. Isobe, H. Kawase, N. Pu, Yuri Kashchuk, V.A. Krasilnikov, Jungmin Jo, Munseong Cheon, T. Tanaka, S. Yoshihashi, Siyuan Li, M. Osakabe, and the LHD Experiment Group “Calibration experiment and the neutronics analyses on the LHD neutron flux monitors for the deuterium plasma experiment”, *Fusion Engineering and Design* 136 (2018) 210-214.
- [5-2] T. Nishitani, K. Ogawa, M. Isobe, N. Pu, K. Shinohara, M. Ishikawa, V.A. Krasilnikov, and M. Osakabe, “Possibility study of the partial neutron calibration for neutron flux monitors in torus devices”, accepted for publication in *Fusion Engineering and Design*.
- [5-3] 小川国大、西谷健夫、磯部光孝、近藤恵太郎、落合謙太郎、春日井敦、権セロム、太田雅之、「IFMIF/EVEDA 原型加速器入射器における重水素一重水素反応中性子測定」第 11 回核融合エネルギー連合講演会 —核融合発電に向けて加速する研究開発— 2016 年 7 月 14 日~15 日 九州大学伊都キャンパス 15P124
- [5-4] P. Agostinetti, V. Antoni, M. Cavenago, G. Chitarin, H. Nakano, N. Pilan, G. Serianni, P. Veltri, Y. Takeiri and K. Tsumori, “Modeling activities on the negative-ion-based Neutral Beam Injectors of the Large Helical Device”, *AIP Conference Proceedings* 1390, (2011) pp.526-535.
- [5-5] V. Antoni, P. Agostinetti, M. Brombin, V. Cervaro, R. Delogu, M. De Muri, D. Fasolo, L. Franchin, R. Ghiraldelli, K. Ikeda, M. Kasaki, F. Molon, A. Muraro, H. Nakano, R. Pasqualotto, G. Serianni, Y. Takeiri, M. Tollin, K. Tsumori and P. Veltri, “Design, installation, commissioning and operation of a beamlet monitor in the negative ion beam test stand at NIFS”, *AIP conference proceedings* 1655 (2015) 060005.
- [5-6] K. Tsumori, K. Ikeda, H. Nakano, M. Kasaki, S. Geng, M. Wada, K. Sasaki, S. Nishiyama, M. Goto, G. Serianni, P. Agostinetti, E. Sartori, M. Brombin, P. Veltri, C. Wimmer, K. Nagaoka, M. Osakabe, Y. Takeiri, and O. Kaneko, “Negative Ion Production and Beam Extraction Processes in a Large Ion Source (invited)”, *Review of Scientific Instruments* 87 (2016) 02B936.

- [5–7] E. Sartori, H. Nakano, P. Veltri, M. Kasaki, A. Pimazzoni, M. Brombin, V. Antoni, V. Cervaro, K. Ikeda, K. Tsumori and G. Serianni, “First measurements of beam plasma in NIFS test stand”. AIP Conference Proceedings 2011 (2018) 080003. <https://doi.org/10.1063/1.5053358>.
- [5–8] G. Serianni, V. Toigo, M. Bigi, M. Boldrin, G. Chitarin, S. Dal Bello, L. Grando, A. Luchetta, D. Marcuzzi, R. Pasqualotto, N. Pomaro, P. Zaccaria, L. Zanotto, P. Agostinetti, M. Agostini, V. Antoni, D. Aprile, M. Barbisan, M. Battistella, M. Brombin, R. Cavazzana, M. Dalla Palma, A. De Lorenzi, R. Delogu, M. De Muri, M. Fadone, F. Fellin, A. Ferro, E. Gaio, G. Gambetta, F. Gasparini, F. Gnesotto, P. Jain, A. Maistrello, G. Manduchi, G. Marchiori, N. Marconato, T. Patton, M. Pavei, S. Peruzzo, N. Pilan, A. Pimazzoni, R. Piovan, C. Poggi, M. Recchia, A. Rizzolo, G. Rostagni, E. Sartori, M. Siragusa, P. Sonato, E. Spada, S. Spagnolo, M. Spolaore, C. Taliercio, P. Tinti, M. Ugoletti, M. Valente, A. Zamengo, B. Zaniol, M. Zaupa, C. Baltador, M. Cavenago, D. Boilson, C. Rotti, P. Veltri, T. Bonicelli, A. Chakraborty, H. Patel, N.P.Singh, U. Fantz, B. Heinemann, W. Kraus, M. Kashiwagi, K. Tsumori, “SPIDER in the roadmap of the ITER Neutral Beams”, in 30th Symposium on Fusion Technology, 16–21 September, 2018, Giardini Naxos, Sicily, Italy (to be published to Fusion Eng. Des.).
- [5–9] Y. Takeiri, O. Kaneko, K. Tsumori, U. Fantz, K. Ikeda, K. Nagaoka, M. Osakabe, Y. Oka, E. Asano, T. Kondo, M. Sato, M. Shibuya and S. Komada, “High-Power Negative Ion Sources for Neutral Beam Injectors in Large Helical Device”, AIP Conference Proceedings 925 (2007) pp.211–218.
- [5–10] K. Ikeda, K. Nagaoka, Y. Takeiri, U. Fantz, O. Kaneko, M. Osakabe, Y. Oka and K. Tsumori, “Optical measurement of Cs distribution in the large negative ion source”, Review of Scientific Instruments 79 (2008) 02A518.
- [5–11] K. Ikeda, H. Nakano, K. Tsumori, U. Fantz, O. Kaneko, M. Kasaki, K. Nagaoka, M. Osakabe and Y. Takeiri, “Comparison of Optical Emission Spectroscopy and Cavity Ring-Down Spectroscopy in Large-Scaled Negative-Ion Source”, AIP conference proceedings 1390 (2011) pp.367–373.
- [5–12] Haruhisa Nakano, Katsuyoshi Tsumori, Kenichi Nagaoka, Masayuki Shibuya, Ursel Fantz, Masashi Kasaki, Katsunori Ikeda, Masaki Osakabe, Osamu Kaneko, Eiji Asano, Tomoki Kondo, Mamoru Sato, Seiji Komada, Haruo Sekiguchi and Yasuhiko Takeiri, “Cavity Ring-Down System for Density Measurement of Negative Hydrogen Ion on Negative Ion Source”, AIP conference proceedings 1390 (2011) pp.359–366.
- [5–13] K. Tsumori, K. Ikeda, H. Nakano, M. Kasaki, S. Geng, M. Wada, K. Sasaki, S. Nishiyama, M. Goto, G. Serianni, P. Agostinetti, E. Sartori, M. Brombin, P. Veltri, C. Wimmer, K. Nagaoka, M. Osakabe, Y. Takeiri, and O. Kaneko, “Negative Ion Production and Beam Extraction Processes in a Large Ion Source (invited)”, the 16th

- International Conference on Ion Sources, TueM06, held at New York, USA, on 23rd - 28th September 2015, Review of Scientific Instruments 87 (2016) 02B936
- [5-14] M. Yoshida, M. Hanada, A. Kojima, M. Kashiwagi, N. Umeda, J. Hiratsuka, M. Ichikawa, K. Watanabe, L. R. Grisham, K. Tsumori and M. Kasaki, “Time evolution of negative ion profile in a large cesiated negative ion source applicable to fusion reactors”, Review of Scientific Instruments 87 (2016) 02B144.
- [5-15] 前川 龍司, 鷹見 重之, 大場 恒揮, 岩本晃史, Hyun-sik Chang, Adrien Forgeas, Luigi Serio, 「She 強制冷却ループのダイナミックシミュレーション —熱負荷変動の抑制—」, 低温工学 Vol.49, No6 (2014), pp311-318.
- [5-16] R. Maekawa, S. Takami, A. Iwamoto, H. S. Chang, A. Forgeas, M. Chalifour, L. Serio, “Process analyses of ITER toroidal field structure cooling scheme”, Cryogenics 63 (2014), pp.220-230.
- [5-17] R. Maekawa, S. Takami, A. Iwamoto, H-S, Chang, A. Forgeas, M. Chalifour, “Process control strategy for ITER central solenoid operation”, Cryogenics, 80 (2016), pp.284-293.
- [5-18] T. Obana et al., Cryogenics, Vol. 73 (Jan. 2016) pp. 25-41.
- [5-19] H. Kajitani et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25 (June 2015) Art. ID. 6965582.

## 6. 人材育成、社会の理解へ向けた取り組み

### 6.1 大学院教育

核融合科学研究所では、高度な研究者の育成を目的として、総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻における教育、連携大学院として、名古屋大学大学院工学研究科及び理学研究科、九州大学大学院総合理工学府、東京大学大学院新領域創成科学研究科等の学生教育を行っている。また、特別共同利用研究員として、全国の国公立大学の大学院生(修士課程又は博士課程)を半年あるいは1年単位で受け入れている。教育体制については、総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻(以下、総研大)については、同専攻の担当教員で構成される専攻委員会他各種専門委員会において、審議・運営している。また、総研大を含め、連携大学院、特別共同利用研究員等の本研究所における大学院教育については、本研究所の大学院教育協力委員会において議論・運営を行っている。以下にその詳細について示す。

総研大では、研究者育成を目的として5年一貫制博士課程、3年次編入博士課程の大学院生を指導している。入学者実績としては、平成26年度6名、同27年度3名、同28年度8名、同29年度3名、同30年度3名である。教育システムとしては、授業、研究指導に加えて、理工学研究者としての幅広い素養を養うために総研大共通履修科目として平成28年度より理工学基礎演習(真空技術、大電力技術、計測技術、放射線技術、低温技術、材料加工技術、データ画像処理、数値プログラミング、物理数学)を開講した。また、毎年10以上の大学院特別講座を開講し、揺動解析入門など、1~4名の少人数教育により大学院生が研究を遂行するために有用な知識を教授している。総研大社会連携事業として、プロジェクトマネジメント概論(物理科学研究科、高エネルギー加速器科学研究科と共同企画)を平成28年度から開催し、総研大生を含め毎年度30名程度が参加しているほか、計測と制御に関する講義(高エネルギー加速器科学研究科と合同開催)を合宿形式で行い、社会人を含め20名が参加している。

優秀な学生を確保するための活動としては、総研大専攻委員会の下に専攻広報委員会を設置し、ホームページ運営、高等専門学校等への出張講義、シンポジウム等での広報活動を精力的に行っている。加えて、大学生・高専生を対象とした総研大夏の体験入学(本研究所にて一週間合宿形式)を開催し、日本全国から毎年40名程度の学生を受け入れており、平成30年度で15年目の開催となる。東南アジアの優秀な学生の確保を目的としたアジア冬の学校(平成16年度から本研究所で開催、平成28年度からタイで開催)を開催している。特に、冬の学校はチェンマイ大学、タイ原子力研究所との協定の下、「プラズマ・核融合に関するアセアン冬の学校」との合同開催となっている。

専攻の運営については、上記の専攻広報委員会に加えて、入学者選抜の基本方針及び入学者選抜の実施に関し専攻長が必要と認めた事項の審議、遂行を目的とした入学者選抜委員会、学生の活動支援、生活相談、経済的支援、メンタルヘルス及びその他学生の生活指導に関する事項の審議、遂行を行う学生支援委員会を設置し、総研大生の確保や入学後の研究・生活補助など、幅広いサポートを行っている。

連携大学院については、名古屋大学大学院工学研究科から16名、理学研究科から7名、九州大学大学院総合理工学府から3名、東京大学大学院新領域創成科学研究科から2名(全て平成30年度)を受け入れ、これらの大学院生は本研究所において研究活動を行っている。

特別共同利用研究員の受け入れ実績としては、平成30年度は17名(名古屋大学10名、大阪大学2名、明治大学、東北大学、福井大学、名古屋工業大学、長岡技術科学大学各1名)である。また、平成29年度から、海外の大学院生を本研究所にて半年以上教育する場合は、特別共同利用研究員として受け入れることとしており、平成30年12月時点で4名を受け入れている。海外からの短期インターンシップ研修生(半年以内の滞在)は近年増加傾向にあり、平成28年度2名、同29年度4名、同30年度5名である。

全ての大学院生共通の教育プログラムとして、学生が相互の研究内容を知るとともに、専門の異なる人にも分かるような発表の訓練を行うことを目的とした「大学院コロキウム」を平成30年度より開始した。大学院生が年に1回の発表を行うよう、週替わりで大学院生と若手教員各1名が発表を行っている。また、各発表に対して、本研究所の主幹及び研究部長による審査を行い、半年毎に優秀発表賞の選出を行うこととした。

## 6.2 社会の理解

### 6.2.1 広報活動

核融合科学研究所では、2004年の大学共同利用機関法人「自然科学研究機構」の一研究所への再編に伴い、広報活動の充実を目的に「広報室」を設置した。また、大学共同利用機関法人評価委員会から「社会的説明責任の観点から(中略)社会や国民に分かりやすい説明、広報活動等に積極的に取り組むことが必要である。」との実績評価を受け、これを一貫した活動目的として、更なる広報体制の強化を図ってきた。2009年には、広報を担う中核的組織として「広報部」を設置した。さらに、2013年には、「研究力強化戦略室」を設置し、自然科学研究機構との連携を強めた戦略的な広報活動が行われることとなった。広報部は「広報委員会」に再編され、研究力強化戦略室の広報力強化タスクグループと連携を取りながら広報活動を行う事業実施主体となった。また、2016年には、重水素実験開始に向けて、今まで以上に岐阜県・三市(土岐市、多治見市、瑞浪市)や地元住民との円滑な情報共有、情報交換や交流が重要となってきたため、研究教育職員、技術職員、事務職員がより一層協力し、一体的に対応する組織として対外協力部を新設した。

対外協力部には、対外協力室、地域連携室、広報室、Web室、理科工作室、教育連携室の6室が置かれた。(ア)対外協力室においては、県・三市等との折衝及び連絡調整等を行うとともに、各室の業務を管理・調整し、(イ)地域連携室においては、本研究所の実験計画等に係る地元説明等を行う。(ウ)広報室には、(1)見学担当グループ、(2)展示物企画等担当グループ、(3)ニュース担当グループ、(4)パンフレット担当グループ、(5)科学クラブ担当グループの5グループを置いた。見学担当グループは、施設見学の対応等を行う。展示物企画等担当グループは、展示物の企画、管理及び整備を行うとともに、所内外で行われる展示等の企画及び運営を行う。ニュース担当グループは、NIFSニュースの編集等を行う。パンフレット担当グループは、研究所パンフレット等の編集を行う。科学クラブ担当グループは、NIFS少年少女科学クラブ会員の活動支援等を行う。また必要に応じて、広報室にビデオ編集担当グループを組織する。(エ)Web室においては、本研究所のホームページの企画、管理及び運営等を行う。(オ)理科工作室においては、キッズ・エネルギーコーナーの管理及び地域へのアウトリーチ活動を行う。(カ)教育連携室においては、高等学校(以下、高校)等での出前授業、スーパー・サイエンス・ハイスクール(SSH)等の事業への協力を行う。

対外協力部のメンバー(併任・兼務、専任を含む)は、延べ119名である。そのうち、研究

教育職員が 79 名、技術部職員が 13 名、事務職員が 17 名、その他の職員が 10 名となっている。研究教育職員については、全研究教育職員の約半数が広報活動に携わっていることになる。広報活動は、施設見学、社会への情報発信、理科教育への貢献、地域とのコミュニケーション、広報誌等の発行、海外への情報発信、自然科学研究機構の広報に大きく分類される。

### (1) 施設見学の受け入れ

核融合科学研究所では、火曜日から金曜日、10:00 からと 13:30 からとの 1 日 2 回、施設見学を実施している。標準コースでは、紹介ビデオを見た後、制御室、LHD の模型、現役を引退したヘリオトロン装置の変遷、プラズマ真空容器の実物大模型を見学する。所要時間は約 60 分である。さらに、オプションコースとして、真空実験、超伝導列車実演といった科学実験の演示や、バーチャルリアリティ装置を使って LHD 内部に入る仮想現実体験を追加することができる(各 20 分)。これらのオプションは年齢を問わず評判が良く、見学件数の約半分がオプション付きとなっている。見学の案内は、特に希望が無い限り専門スタッフが行っている。専門スタッフの分かりやすい説明は、見学者に本研究所に対して好印象を与えることに大きく貢献している。現状では、見学件数の 8 割を専門スタッフが担当している。

図 6.2.1-1 にこれまでの施設見学者の人数と件数の推移を示す。2006 年から一般の見学者が徐々に増え、見学者数では 2009 年(5,729 名)に、件数では 2011 年(439 件)にピークを記録している。また、2016 年から再び件数が増加傾向にある。月別では、8 月と 11 月にピークがあり、その時期は 1 日に複数の見学が重なることも珍しくない。見学者を所属で分類して、見学件数の推移を見たものが図 6.2.1-2 である。一般の見学者が他に比べて多いことが分かる。一般の見学者は少人数もしくは個人であるため、全体の見学者人数が件数に単純比例して増加する訳ではないが、社会的説明責任という観点から、この活動が大きな成果を上げているのは事実である。また、2016 年からは大学・研究機関からの見学件数が増加している。

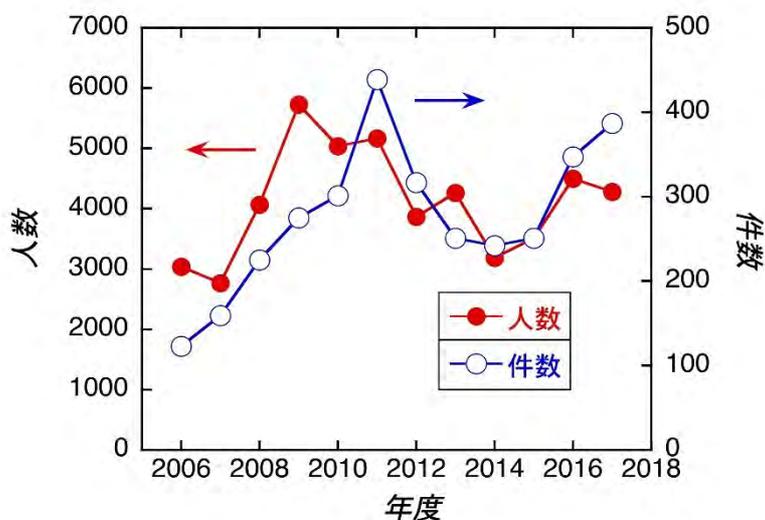


図 6.2.1-1 施設見学者数と件数の推移

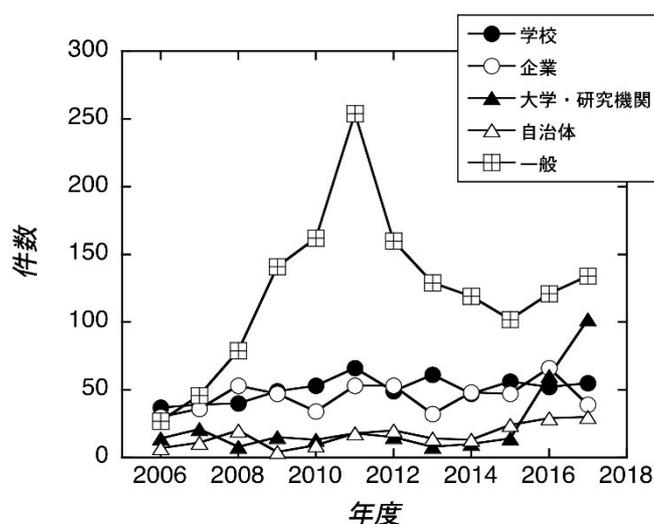


図 6.2.1-2 見学件数の分類別推移

## (2) 社会への情報発信

核融合科学研究所では、毎年秋にオープンキャンパス(一般公開)を実施している。1998年に第1回を開催して以来、2018年で21回を数える。2018年は、家族連れを中心に1,500名の来場者があった。LHD、制御室、スーパーコンピュータなどの研究施設の一般公開に加え、科学工作、科学実験などの体験型イベント、職員によるエネルギーや核融合に関する講演会も開催している。

核融合科学研究所で行うオープンキャンパスの来場者のほとんどが東海地方に限られる。そこで、核融合研究の知名度を高めるために、関東地方でもオープンキャンパスに準じたイベントを開催することとし、東京お台場の日本科学未来館で科学イベント「Fusion フェスタ in Tokyo」を毎年開催している。こちらは2010年に第1回を開催してから2018年で9回を数える。オープンキャンパスで人気のある科学工作・実験コーナーを選抜して、実施している。また、講演会では、核融合に関する講演と最新科学に関する特別講演を企画している。来場者は年々増え、2018年5月3日のイベント開催では、2,650名の来場者があった。

毎夏には同じ自然科学研究機構の仲間である国立天文台の野辺山宇宙電波観測所の特別公開に出向いて、構内の自然科学研究機構展示室内にブース出展している。多くの来場者の方々に各種パンフレットを配布するとともに、核融合科学研究所の研究内容の説明と研究所紹介ビデオ等を上映している。

さらにアウトリーチ活動の一環として、インターネットを活用している。つまり、Web サイト、SNS サイト(Twitter 及び Facebook)、メールマガジン、メールニュースという4つの方法で広報を行っている。研究所ホームページの「核融合へのとびら」では、核融合研究について分かりやすく解説している。また、隔月で掲載している「プラズマくんだより」は、一般の人にも読んでもらえるよう平易な文章で書かれており、広報誌として地域への配布も行っている。

一方、研究成果については、プレスリリースに加え、記者に対する説明会を開催している。さらに、3週間に1回程度の頻度でA4、1枚程度の研究活動状況レポートを掲載している。

また、そのテキストをメールマガジンとして発行している。2018年10月時点で、314号の研究活動状況レポート(メールマガジン)を発行した。現在のメールマガジンの登録者は約400名である。イベントの案内はメールニュースと呼ばれる短いテキストを配信している。メールニュースの登録者は約1,000名である。

ホームページには、LHD 実験情報、重水素実験について、安全情報公開という3つのサイトがあり、実験予定、週間レポート、重水素実験に係る情報、環境監視情報を公開・更新している。正確な情報公開が、市民の安心に繋がると考えている。

2016年6月からは、SNSを開始し、イベント情報、研究活動状況レポート、広報誌の発行状況などを配信している。2018年10月時点で、239の書き込みを行い、Twitterで680、Facebookで372のフォロワーを得ている。

### (3) 理科教育への貢献

理科教育への貢献に関する主な活動内容は(1)スーパー・サイエンス・ハイスクール(SSH)の連携研究教育機関としての活動、(2)講義と見学による高校の研修、(3)高校に出かけて教育活動を行う「ふるさと訪問授業と出前講義」、(4)高校の理科教育担当の先生との科学コミュニケーション、(5)高等専門学校・大学のインターンシップ授業の受け入れ、(6)地域の高校生や中学生の職場体験、(7)地域の幼児・児童を対象とした実験・工作教室であり、幅広い教育連携活動を行っている。

SSHは、文部科学省が2002年から行っている事業であり、核融合科学研究所も2003年から受け入れを開始した。2012年からはSSH指定校以外の高校の研修受け入れを開始し、活動を徐々に拡大し、2013年度は37校、1,357名を受け入れた(図6.2.1-3)。以降、高校数は縮小したが、2017年度には25校、842名を受け入れた。

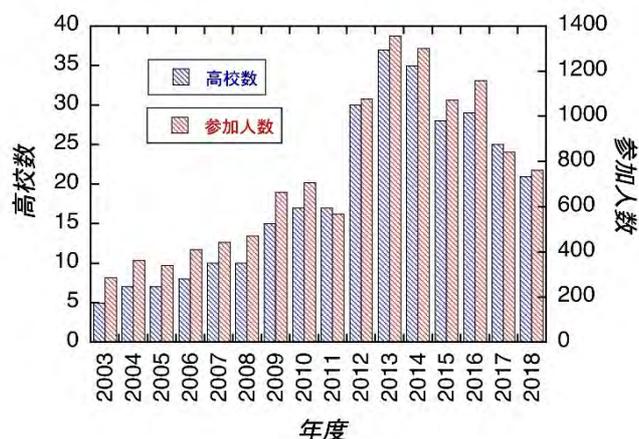


図 6.2.1-3 研修受け入れ高校数と参加人数の推移

### (4) 地域とのコミュニケーション

核融合研究の進展状況と核融合科学研究所の重水素実験を含めた研究計画について、地元市民の理解を得るため、2006年から毎年6月～8月にかけて、所在地である土岐市と隣接する多治見市、瑞浪市において公民館などを会場とした市民説明会を開催している(図6.2.1-4)。13年目となる2018年度は23会場で開催し、合計235名の参加者があり、こ

れまでの延べ参加者数は5,365名となっている(表6.2.1-1)。説明会における質問と回答は文章にまとめ、ホームページに公開している。市民説明会の回を重ねるごとに、核融合研究の必要性と重水素実験計画の安全性について多くの市民の理解が得られ、この積み重ねの結果が、2013年3月28日の岐阜県・三市との協定書等の締結及び2017年3月7日の重水素実験の開始につながったと考えている。

また、2006年からは国際土岐コンファレンス期間中の土岐市での市民学術講演会に加え、毎年、多治見市において、市民学術講演会を開催している。生物、地質、天文など幅広い分野における最新の研究成果を、その分野における著名な講師を呼び、分かりやすく解説してもらっている。多治見市の講演会においては、併せて核融合研究に関する講演を行っている。市民学術講演会は、市民に最先端科学に触れてもらう機会を提供している。



図 6.2.1-4 市民説明会の様子(下石公民館)

表 6.2.1-1 市民説明会の参加者数

年度	土岐市		多治見市		瑞浪市		合計	
	会場数	参加者数	会場数	参加者数	会場数	参加者数	会場数	参加者数
2006	9	126	14	129	1	37	24	292
2007	9	329	14	89	1	36	24	454
2008	9	288	20	125	1	25	30	438
2009	9	306	15	150	1	17	25	473
2010	9	296	14	157	1	19	24	472
2011	8	504	14	232	1	34	23	770
2012	8	338	14	163	1	44	23	545
2013	8	236	14	152	1	49	23	437
2014	8	120	14	147	1	42	23	309
2015	8	168	14	132	1	33	23	333
2016	8	150	14	126	1	28	23	304
2017	7	127	15	148	1	28	23	303
2018	7	112	15	105	1	18	23	235
合計	107	3,100	191	1,855	13	410	311	5,365

(5) 広報誌等の発行

研究所のパンフレット「NIFS」は、毎年最新の情報に更新して発行している。発行部数は、和文版が 6,000 部、英文版が 1,000 部である。図 6.2.1-5 に表紙と目次ページを示す。また、広報誌「NIFS ニュース」を年 6 回発行している。内容は、特集、研究最前線、会議報告、トピックス等から構成されている。現在の発行部数は 2,400 部である。また、ホームページにも公開している。図 6.2.1-6 に 2018 年 8/9 月号の表紙を示す。

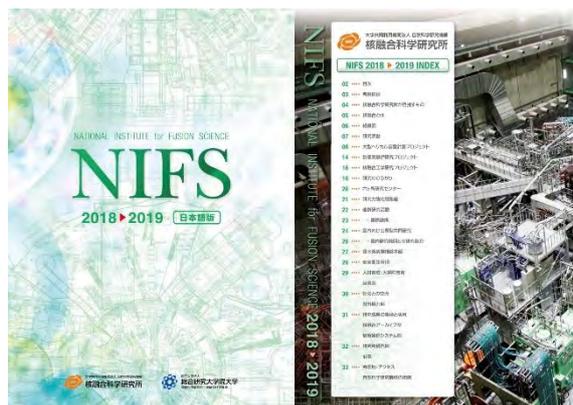


図 6.2.1-5 パンフレット「NIFS」の表紙と目次ページ

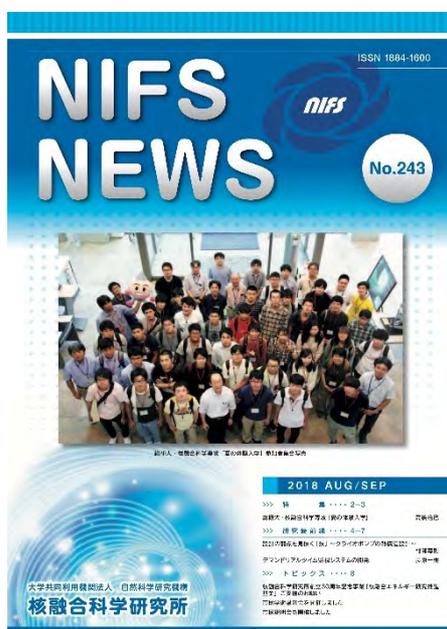


図 6.2.1-6 NIFS ニュースの表紙

#### (6) 海外への情報発信

特筆すべき研究成果が得られた際は、プレスリリースとして記者発表しているが、ホームページには和文、英文の両方で発表している。また、前述の定期的な研究活動状況レポートも英文化して公開している。さらに、国際的なプレスリリース配信プラットフォームである EurekaAlert! を介して、海外のメディアにも情報を配信している。EurekaAlert! は、科学雑誌サイエンスを発行している AAAS (アメリカ科学振興協会) が提供しているサービスであり、多くのメディア、読者がここから情報を得ている。2014 年 7 月からこれまでに 21 件のプレスリリースを EurekaAlert! から配信している。

#### (7) 自然科学研究機構の広報

自然科学研究機構では、毎年 2 回、東京又は名古屋で、自然科学研究機構シンポジウムを開催している。2006 年 3 月の第 1 回から数えて、2018 年 3 月には第 25 回のシンポジウムが開催された。このうち 3 回は、核融合科学研究所が企画及び運営を担当した。第 3 回 (2007 年 3 月) は、東京国際フォーラムにおいて「宇宙の核融合・地上の核融合」をテーマに、第 13 回 (2012 年 9 月) は、吹上ホール (名古屋市) において「日本のエネルギーは大丈夫か? ~ $E=mc^2$  は人類を滅ぼすのか、救うのか・・・」をテーマに、第 25 回 (2018 年 3 月) は、名古屋大学坂田・平田ホール (名古屋市) において「プラズマが拓く無限の可能性 ~エネルギー、医療、産業、そして宇宙~」をテーマに、それぞれシンポジウムを開催した。

### 6.2.2 自治体との連携

核融合科学研究所は、研究の安全性を確保することを最優先として、地元の理解を得つつ、研究を進めており、次のような地元自治体との連携活動を行っている。

#### (1) 事前説明等

核融合科学研究所は、平成 25 年 3 月 28 日の協定締結前から、地元三市に対して、毎年の LHD プラズマ実験のスケジュール、整備計画や研究計画等に大きな変更があった場合の事前説明、安全対策及び実験目標等の事前説明、並びに前年度の研究成果に係る報告等を行っている。岐阜県には、これまで随時事前説明及び研究成果等の報告を行ってきたが、協定締結後は、前述の地元三市への事前説明等と同様な形で説明を行っている。これらは、協定書第 5 条で規定する「研究所は、研究施設の整備計画、研究計画及び研究内容並びにそれらの変更があった場合について、事前に岐阜県及び三市へ説明を行うとともに、研究成果等について定期的に行うものとする。」に対応する。また、核融合科学研究所が重水素実験を実施するにあたって、研究所周辺における環境を保全し、住民の安全を確保するために、岐阜県及び地元三市が共同設置した核融合科学研究所安全監視委員会において、「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>」に基づき、LHD 重水素実験の実施状況、安全性、周辺環境に与える影響がないこと等の説明を委員会開催毎に行っている (図 6.2.2-1)。



図6.2.2-1 岐阜県及び地元三市が共同設置した核融合科学研究所安全監視委員会の様子。  
写真中央奥は、委員会に陪席者として出席する核融合科学研究所職員。

また、外部有識者で組織する核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会には、岐阜県及び地元三市がオブザーバーとして参加しており、さらに岐阜県及び地元三市と衛生電話の整備に代表される緊急時の連絡方法を整備するとともに、防災訓練を実施する際には、地元自治体との情報伝達訓練を実施している。加えて、岐阜県及び地元三市からの各種問い合わせ等に対する窓口を一元化するため、対外協力部に「対外協力室」を設けるとともに、対外協力部に「地域連携室」を設置して、市民からの質問や意見等を一元的に受け付ける他、地域の夏祭り等のイベントへの参加、地元住民の見学等の対応を行っている。

## (2) 土岐市プラズマ研究委員会との共同研究

核融合科学研究所は、これまで約30年にわたって土岐市教育委員会が組織する土岐市プラズマ研究委員会との共同研究に参加し、地域の環境放射線測定と放射線やプラズマの勉強会に積極的に取り組んでいる。

土岐市プラズマ研究委員会は、LHD が立地する土岐市及びその周辺の環境放射線の地域的分布・時間的な変動の特質を明らかにすることを目的として、核融合科学研究所の前身である旧名古屋大学プラズマ研究所の土岐市への移転計画が契機となり、昭和54年に土岐市を中心とする東濃地域の小・中学校、及び高等学校の理科教員が中心となって参加する形で発足した。平成3年度からは核融合科学研究所との共同研究として活動を継続しており、核融合科学研究所と地元との共同研究という点に大きな意義と特色を有している。主な活動内容は、土岐市プラズマ研究委員会発足時から継続して実施している東濃地区の環境放射線測定、エネルギーや環境に関連した勉強会や講演会の開催、夏季特別研修の実施等である。中でも、東濃地区の環境放射線測定については、土岐市を中心に測定点を定め、電子式積算線量計を設置し、環境放射線の3ヶ月積算線量を継続的に測定している。測定データについては、3ヶ月毎(6、9、11、3月)に開催される委員会で報告され、地域による放射線量の違い、季節変動等について分析・評価を行っている。図 6.2.2-2 に、土岐市プラズマ研究委員会において各モニタリングポストから集められた電子式積算線量計のデータ収録を行っている様子を示す。

これらの活動については、年度毎に共同研究報告書として纏められ、研究所ホームページに公開している。



図 6.2.2-2 土岐市プラズマ研究委員会において各モニタリングポストから集められた電子式積算線量計のデータ収録を行っている様子

# 参考資料

- 1 平成30年度外部評価「大型ヘリカル装置計画プロジェクト」の評価結果一覧
- 2 平成30年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会及び専門部会構成名簿
- 3 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則
- 4 平成30年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会日程



# 平成30年度 外部評価「大型ヘリカル装置計画プロジェクト」の評価結果

## I. 評価の観点

- (1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。(第三期中期計画より)
- (2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされるとともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。(第三期中期計画より)
- (3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られているか。(第三期中期計画より)
- (4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。(第三期中期計画より)
- (5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められているか。
- (6) LHDプロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか。
- (7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置研究における国内外のCOEとしての役割を果たしているか。
- (8) ITER計画・BA活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄与しているか。(第三期中期計画より)
- (9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。
- (10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか。

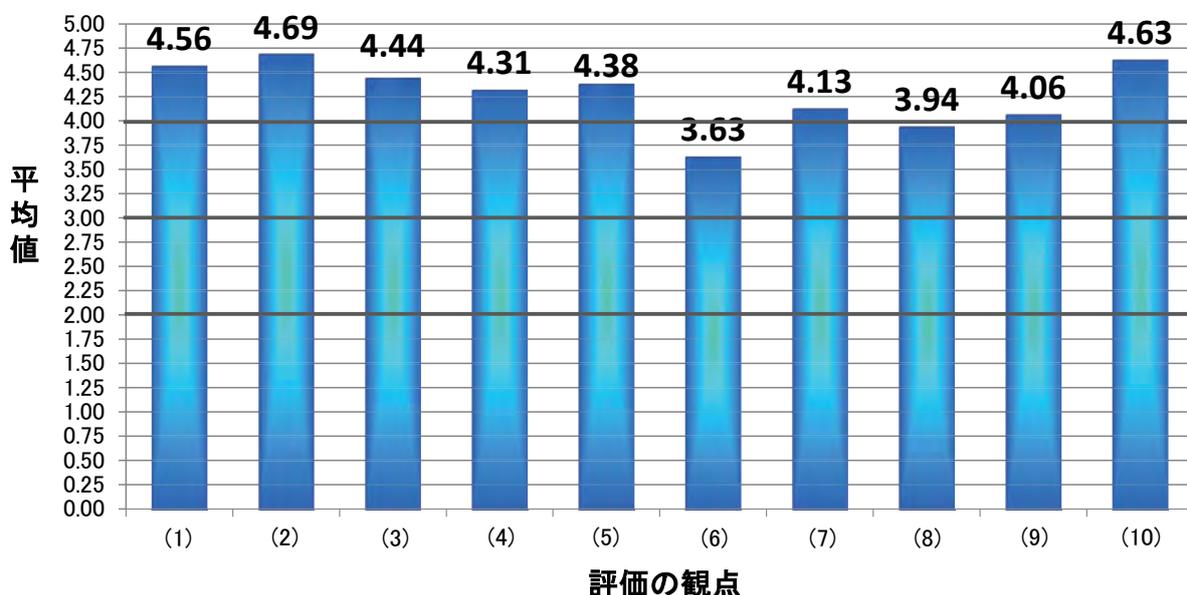
## II. 評価結果

(単位:人)

評価項目 評価結果	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<b>5</b> (極めて高く評価する)	10	12	9	5	9	1	3	4	4	10
<b>4</b> (高く評価する)	5	3	5	11	4	8	12	7	9	6
<b>3</b> (評価する)	1	1	2	0	3	7	1	5	3	0
<b>2</b> (妥当(適切)である)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>1</b> (妥当(適切)でない)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>平均点</b>	<b>4.56</b>	<b>4.69</b>	<b>4.44</b>	<b>4.31</b>	<b>4.38</b>	<b>3.63</b>	<b>4.13</b>	<b>3.94</b>	<b>4.06</b>	<b>4.63</b>

※ 上記は、委員(13名)及び専門部会委員(3名)の評価結果を合わせたものです。

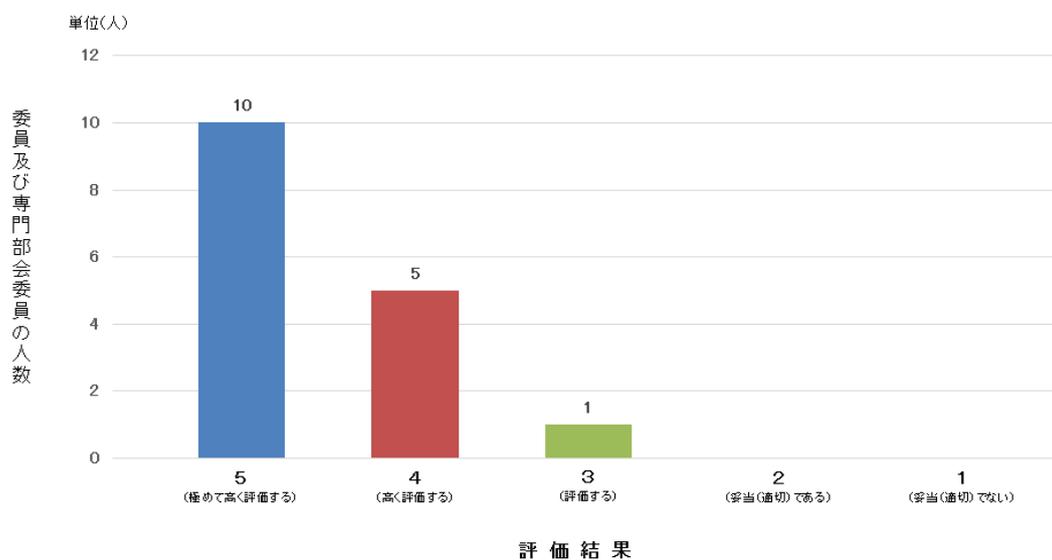
### (参考)評価項目別の平均点



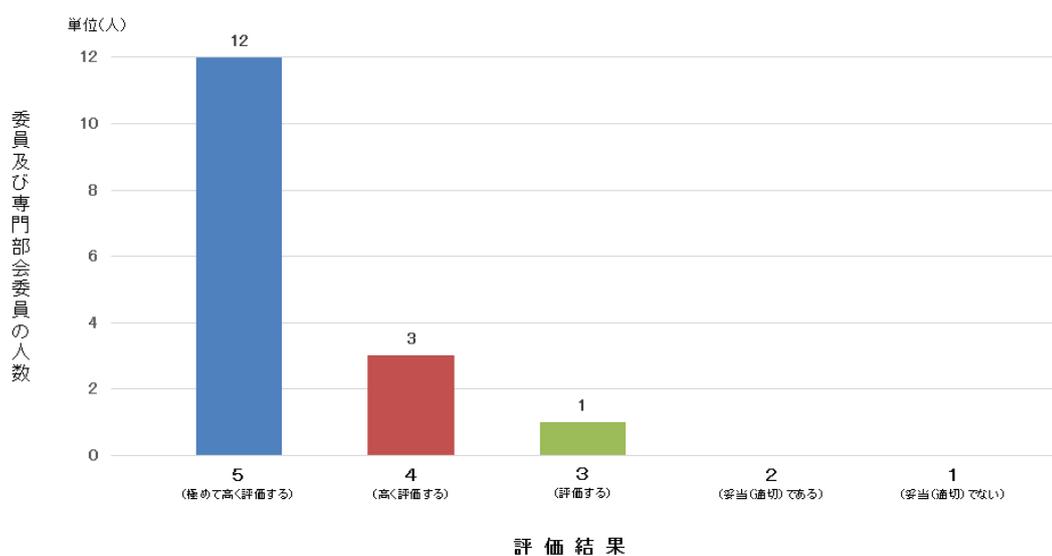


## 評価項目別の人数分布

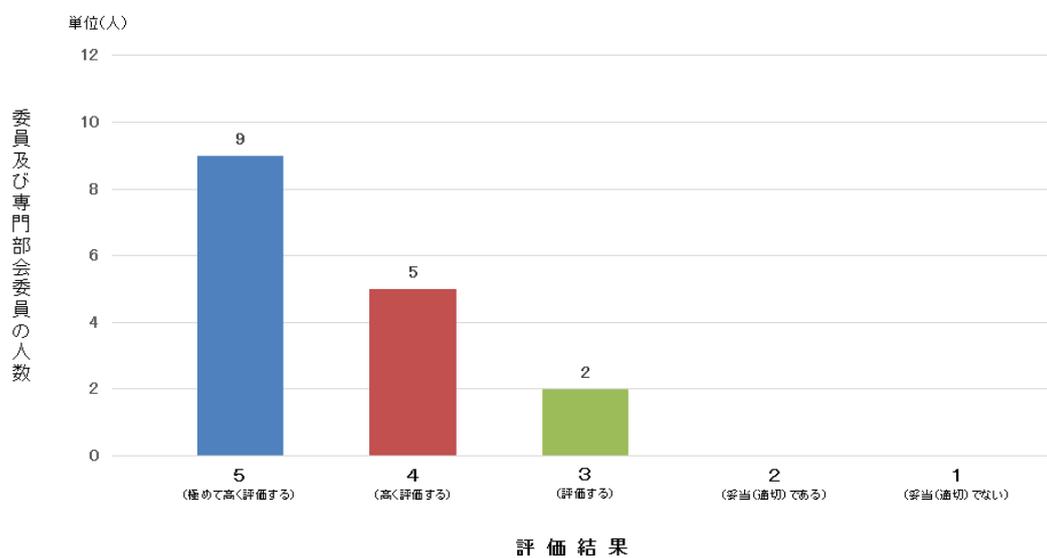
(1) 国内外の研究者を取りまとめて重水素実験を実施する体制が構築されているか。



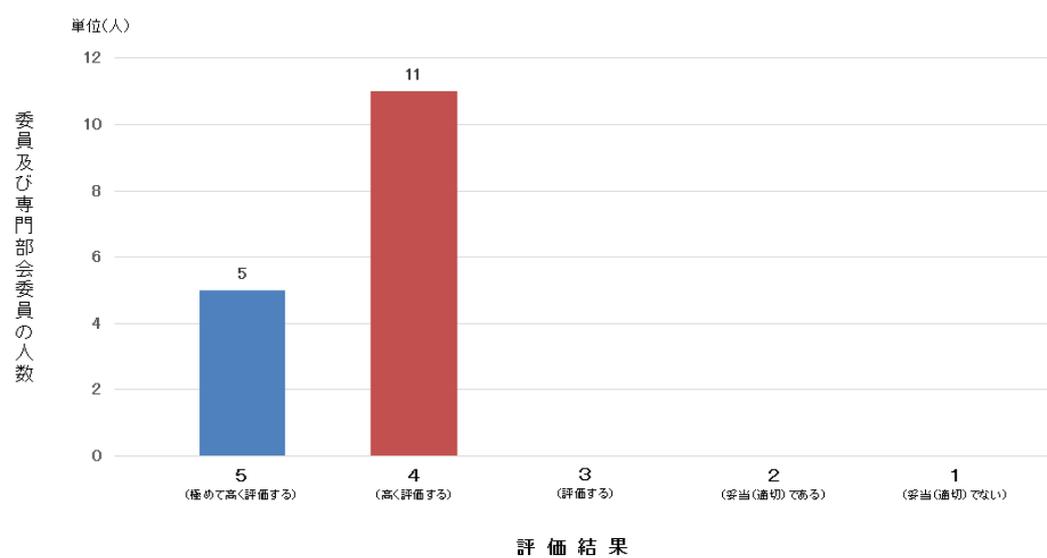
(2) 重水素実験の開始にあたり、安全管理機器・設備等の整備や対応策が適切になされ  
るとともに、安全管理体制が計画通り確立されているか。



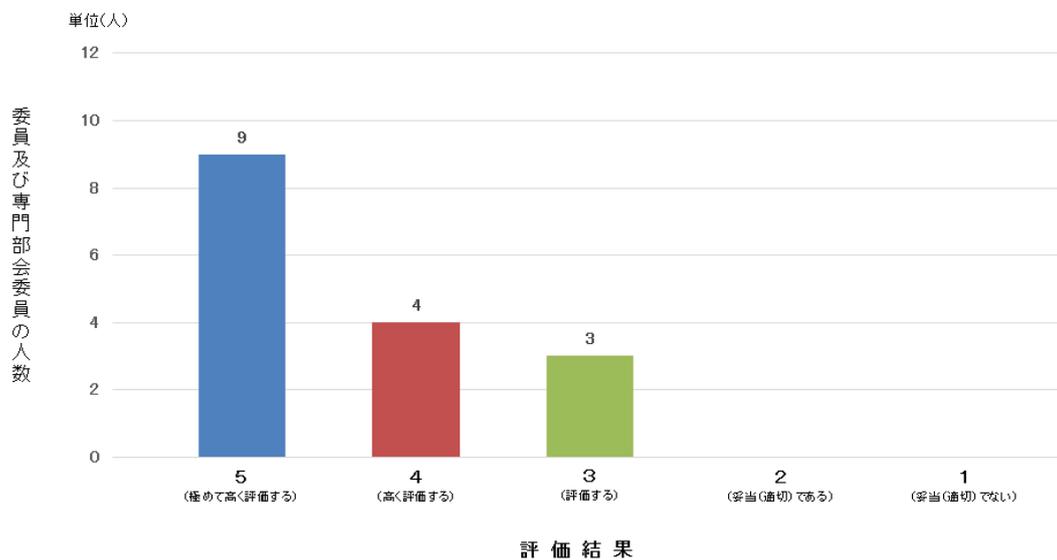
(3) 重水素実験でプラズマの高性能化が図られ、学術的価値の高い成果が得られているか。



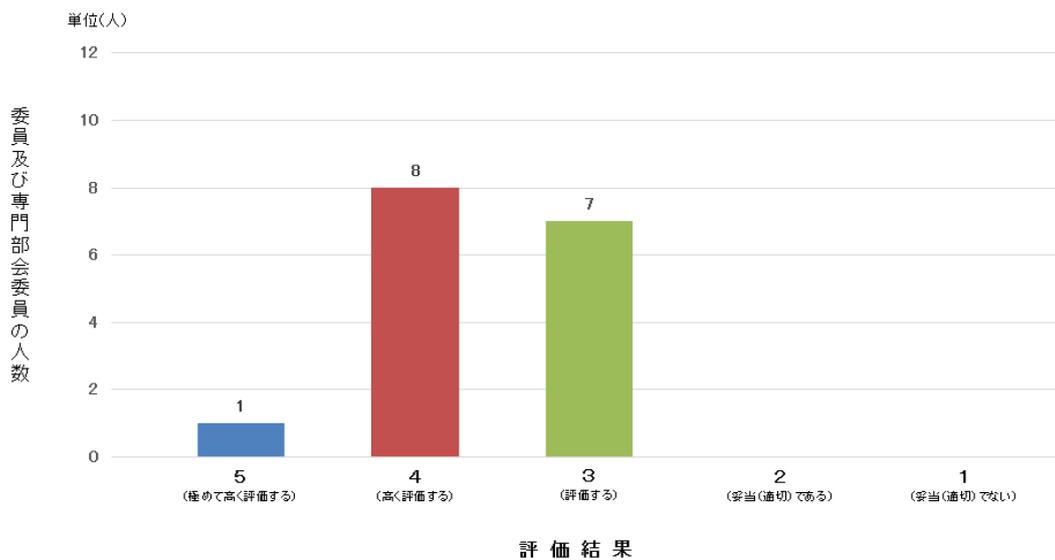
(4) 環状プラズマの総合的な理解に向けた学術研究の展開の見通しが得られているか。



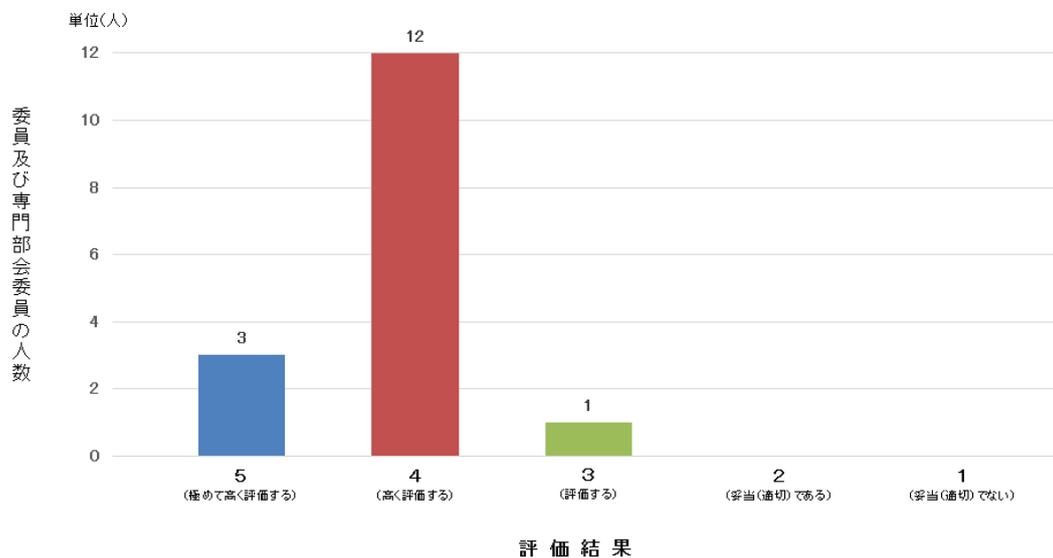
(5) 重水素実験の研究計画に従って、装置本体、加熱、計測、周辺機器など必要な機器の整備等が進められているか。



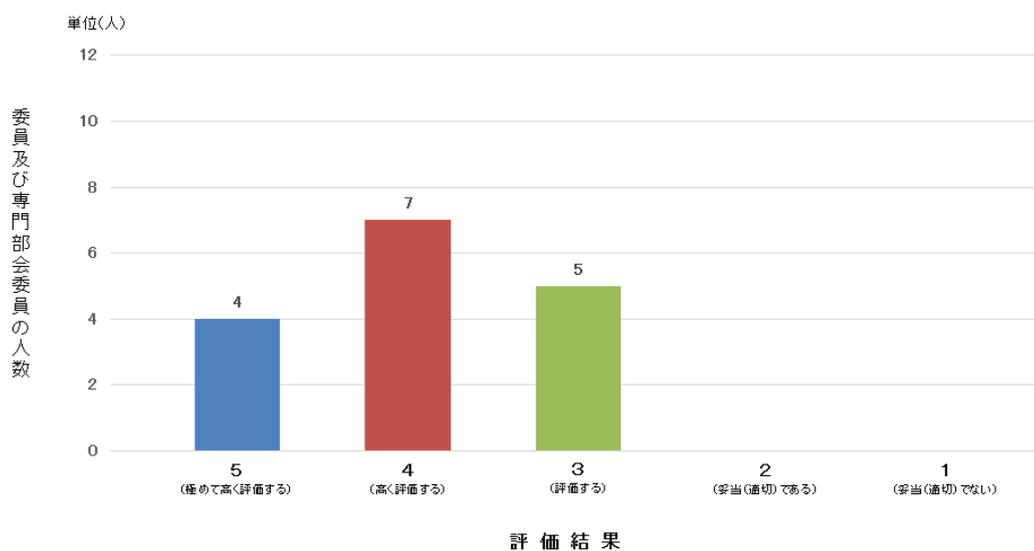
(6) LHDプロジェクトの成果を踏まえて、核融合炉実現に向けた今後の研究展開を検討しているか。



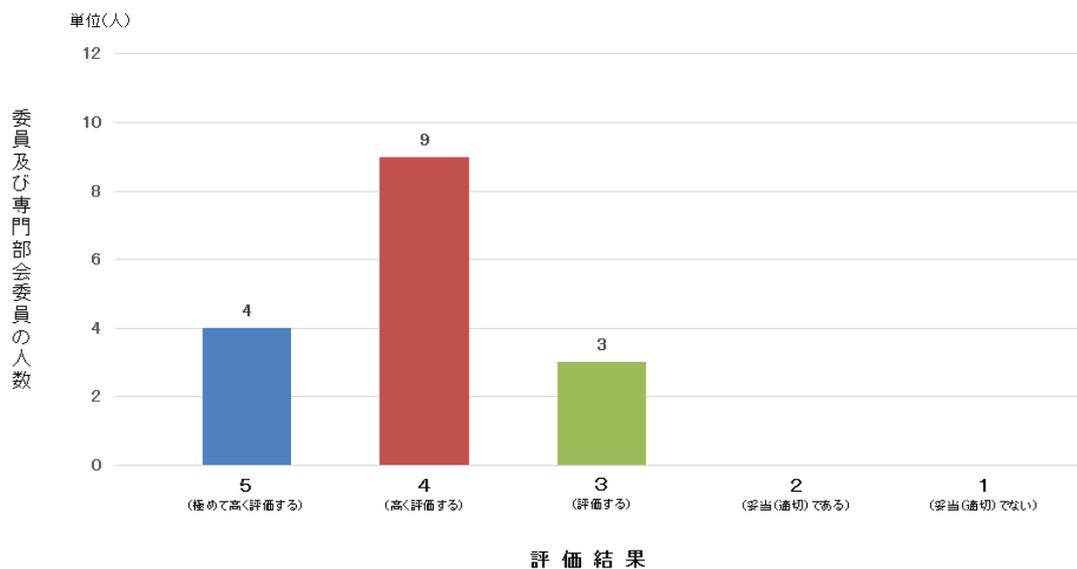
(7) 国内外の大学や研究機関との研究ネットワークが構築・活用され、ヘリカル型装置研究における国内外のCOEとしての役割を果たしているか。



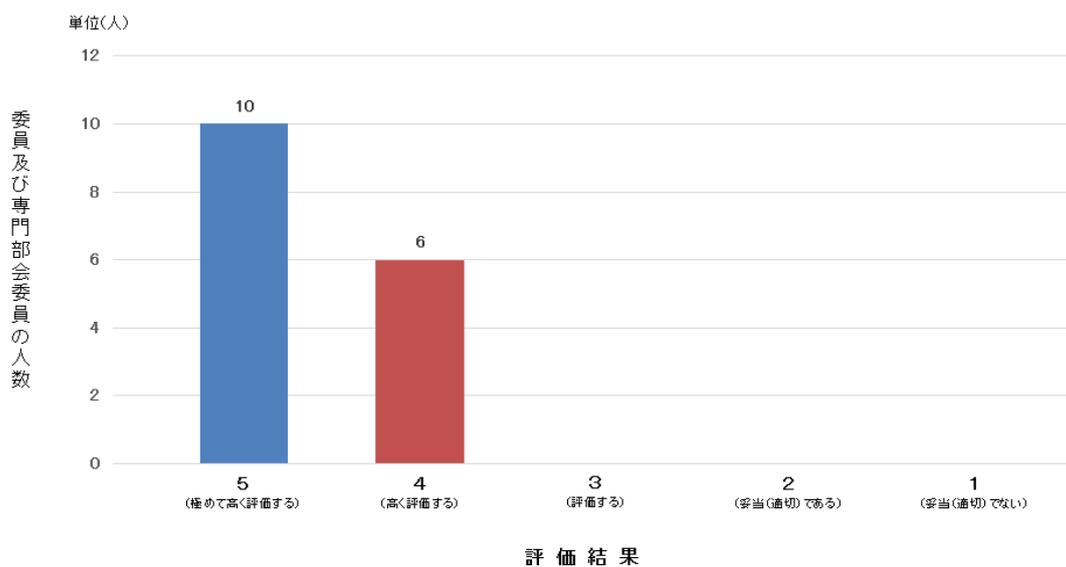
(8) ITER計画・BA活動との連携、貢献が行われているか。また、原型炉研究開発に寄与しているか。



(9) 国内外の核融合研究を牽引し、国際的にも活躍する人材の育成に貢献しているか。



(10) 自治体との連携を図るとともに、重水素実験に対する地域住民の理解を深め、広く社会の理解を得る取組みを行っているか。





平成30年度核融合科学研究所運営会議外部評価委員会及び  
大型ヘリカル装置計画プロジェクト専門部会構成名簿

1. 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会 構成名簿

[外部評価委員会 国内委員]

	安藤 晃	東北大学大学院工学研究科教授
	牛草 健吉	量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー研究開発部門長
□	大野 哲靖	名古屋大学大学院工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター長
◎	小川 雄一	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	兒玉 了祐	大阪大学レーザー科学研究所長
□	長崎 百伸	京都大学エネルギー理工学研究所教授
	中嶋 洋輔	筑波大学プラズマ研究センター長
○	花田 和明	九州大学応用力学研究所長
	渡邊 智彦	名古屋大学大学院理学研究科教授
	和田 元	同志社大学理工学部教授

[外部評価委員会 外国人委員]

	François Waelbroeck	Professor, The Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin, USA
	Jiangang Li	Professor, Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Republic of China
	Thomas Klinger	Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany

◎委員長、○副委員長、□専門部会幹事

※ 外部評価委員会委員の任期は、平成31年3月31日までとする。

2. 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会大型ヘリカル装置計画プロジェクト専門部会 構成名簿

[外部評価委員会 国内委員]

- |   |       |                                |
|---|-------|--------------------------------|
|   | 安藤 晃  | 東北大学大学院工学研究科教授                 |
|   | 牛草 健吉 | 量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー研究開発部門長    |
| □ | 大野 哲靖 | 名古屋大学大学院工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター長 |
| ◎ | 小川 雄一 | 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授            |
|   | 兒玉 了祐 | 大阪大学レーザー科学研究所長                 |
| □ | 長崎 百伸 | 京都大学エネルギー理工学研究所教授              |
|   | 中嶋 洋輔 | 筑波大学プラズマ研究センター長                |
| ○ | 花田 和明 | 九州大学応用力学研究所長                   |
|   | 渡邊 智彦 | 名古屋大学大学院理学研究科教授                |
|   | 和田 元  | 同志社大学理工学部教授                    |

[外部評価委員会 外国人委員]

- |  |                     |   |
|--|---------------------|---|
|  | François Waelbroeck | Professor, The Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin, USA   |
|  | Jiangang Li         | Professor, Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, Republic of China |
|  | Thomas Klinger      | Directorate, Max-Planck-Institute for Plasma Physics, Germany                         |

[外部評価委員会 専門部会委員 (国内) ]

- |  |        |                           |
|--|--------|---------------------------|
|  | 瓜谷 章   | 名古屋大学大学院工学研究科教授           |
|  | 波多野 雄治 | 富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター教授 |

[外部評価委員会 専門部会委員 (外国人) ]

- |  |            |  |
|--|------------|--|
|  | Hyeon Park | Professor, Physics Department, School of Natural Science<br>Director of Fusion Plasma Stability & Confinement Research Center<br>Ulsan National Institute of Science and Technology, Korea |
|--|------------|--|

◎委員長、○副委員長、□専門部会幹事

※ 外部評価委員会委員及び専門部会委員の任期は、ともに平成31年3月31日までとする。

## 核融合科学研究所運営会議外部評価委員会規則

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30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30年9月18日(火) 15時35分～16時35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 小川委員長、安藤、牛草、大野、  
兒玉、長崎、中嶋、花田、渡邊、  
和田の各委員  
瓜谷専門委員



### ○ 第2回委員会及び第2回専門部会

日 時 平成30年12月1日(土) 13時00分～16時15分  
場 所 名古屋ダイヤビルディング 2号館 223会議室  
出席者 小川委員長、安藤、牛草、大野、  
兒玉、長崎、中嶋、花田、渡邊、  
和田、Waelbroeck の各委員  
瓜谷、波多野、Park の各専門委員

※Li、Klinger 各委員については  
12/13(木)に別途、テレビ会議を実施



### ○ 第3回委員会及び第3回専門部会

日 時 平成31年1月25日(金) 13時40分～15時30分  
場 所 核融合科学研究所 シミュレーション科学研究棟1階 会議室  
出席者 小川委員長、牛草、大野、長崎、  
花田、渡邊、和田の各委員  
波多野専門委員





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/>