

LHD重水素実験計画とその推進体制 Plan for LHD Deuterium Experiment

森崎友宏、LHD実験グループ
Tomohiro Morisaki

核融合科学研究所
National Institute for Fusion Science

1. はじめに

核融合科学研究所は、大型ヘリカル装置（LHD）を用いた重水素実験の準備が整い、平成29年3月より実験を開始する。

周知のように多くの中・大型トカマク装置では、既に重水素を用いた実験は行われており、軽水素からの閉じ込め改善 [1]、L-H遷移に要するパワーの閾値の低下 [2] 等、閉じ込めの「同位体効果」が確認されている。しかし、そのメカニズムに関しては、物理的な理解は未だ得られていないのが現状である。一方、ヘリカル系においてもこれまで重水素を用いた実験は行われているが、トカマクで見られるほどの顕著な同位体効果は観測されていない[3]。しかし、当然のことながらこれらの実験結果だけから「ヘリカル系に同位体効果は無い」との結論には至らない。ヘリカル系におけるこれまでの重水素実験は、小・中型の装置で行われている。これらの実験とLHDにおける実験で大きく異なる点は、充実した加熱パワーに支えられた、もともと（軽水素で比較した場合）のプラズマ性能の違いに加えて、明瞭なダイバータ放電が可能である点である。ダイバータは、不純物の挙動や燃料粒子のリサイクリング過程に大きな影響を与える。壁材の違いによる閉じ込めの違いも指摘されており [4]、金属壁であるCHSと、壁表面が炭素膜で覆われているLHDでは、閉じ込めが改善される可能性も期待できる。

これまで18年間実験を行ってきたLHDは、多くの高性能計測器が開発されてきた。主要なプラズマパラメータの高速分布計測や、広範囲にわたる相関計測、中性子を含む高エネルギー粒子計測が可能である。更に、高度な解析手法の開発も鋭意行われている。これらを駆使した実験結果の精密な解析から、同位体効果の解明に向けた物理研究の進展も期待される。

2. LHDにおける重水素実験の目的

ここでLHDにおける重水素実験の目的を今一度整理しておく。以下に示す3項目を以前より掲げている。

1. 閉じ込め改善

重水素放電により、トカマク装置で見られるような閉じ込め改善によるプラズマの高性能化を実現し、核融合条件に近い領域でプラズマ研究を遂行し、新たな研究領域の開拓や実験の多様性を図る。

2. 同位体効果に関する理解の深化

重水素放電により、閉じ込めに対するイオンの質量依存性（同位体効果）を調べ、将来の重水素・三重水素プラズマの挙動を十分な確度で予測可能なモデルを構築する。

3. 高エネルギー粒子挙動の解明

ヘリカル系における高エネルギー粒子の閉じ込め特性を明らかにし、燃焼プラズマへの展望を示す。

以上掲げた3項目の柱に加え、LHDの重要課題の1つである定常プラズマ維持研究、また、以下に示す燃焼炉実現に向けた工学課題等も挙げられる。

- ・水素同位体プラズマと壁との相互作用
- ・トリチウムの安全管理
- ・中性子工学

3. 重水素実験以降可能になること

LHDでは、重水素実験に向けて加熱機器、計測器、トリチウム処理を中心とした安全管理機器の整備を行ってきた。これによりLHDは、プラズマ実験プラットフォームとしてのポテンシャルが大幅に向上しており、物理研究の幅が広がった。

プラズマ加熱に関しては、5基ある中性粒子入射加熱装置（NBI）のうち、垂直入射の正イオン源ベースの2基が重水素イオンに最適化された。これにより、1基当たりのパワーは1.5倍になった。一方、接線入射の負イオン源ベースの3基は軽水素に

最適化されたままであるため、重水素ビームにおけるパワーは寧ろ低下する。従って、接線水素ビーム入射、垂直重水素ビーム入射の場合、プラズマへの加熱入力最大の 34MW となり、従来の水素放電時の 28MW から約 20%増加する。電子サイクロトロン加熱では、筑波大学との共同研究で開発された 1 MW 級のジャイロトロン 5 本中 4 本が、加熱効率の高い水平ポートからの入射に変更されており、光線追跡コードによるアンテナの精密制御を行って入射方向の最適化を進め、現状で 5.4MW の入射が可能である。さらに第 20 サイクル実験以降には、更に 1 基の 1 MW 級ジャイロトロンを導入予定である。従って重水素実験以降、LHD の加熱電力は 6 – 7 MW 程度増加することになり、運転範囲はより高温・低衝突領域に広がることになる。

計測に関しては、重水素実験に向けて、核反応生成物である中性子、ガンマ線および高エネルギー粒子用の計測器を中心に整備が進んでいる。中性子の総発生量評価のためには、フィッションチャンバー、ガスカウンタ、放射化箔の設置が完了した。中性子計測では、その生成位置を特定することにより高エネルギー粒子の閉じ込めに関する情報を得ることができる。そこで LHD では、径方向分布計測を行うために、コリメータとシンチレーション検出器で構成される 11 チャンネル鉛直中性子カメラを使用する。高エネルギー粒子計測には、他に飛行時間分析器、シンチレーションファイバー等も設置される予定である。以上に加えて、FIDA (Fast-ion D-alpha) をはじめとする既存の計測器も、機器の改造・改良をおよび遮蔽対策を行って重水素実験に備える。同位体効果をはじめとする物理研究で必要となる、水素/重水素比の計測を行うための、バルク荷電交換分光、ペニング分光、各種中性粒子分析器等も順次実験に供することが可能となる。また、高エネルギー粒子由来の揺動や長距離相関の計測が可能な揺動計測機器も使用可能である。さらに、プラズマ・壁相互作用における同位体効果の研究に不可欠な計測器、分析装置、試料加工室を管理区域内に設置しており、試料を複雑な持ち出し手続き無しに同じ建屋内で分析することが可能である。

4. 共同研究実施体制

LHD プロジェクトでは全ての研究課題を、共同研究として実施している。研究課題の採択等は、運営会議の下に置かれた「共同研究委員会」で決定される。装置の運転・維持、マシントイムの策定等、実際の実験実施に関しては、所外の実験テーマリーダーを含む「LHD 実験会議」が主体となって運営に当たる。

重水素実験を開始するにあたり特筆すべき点は、実験会議に付属する形で「LHD 国際プログラム委員会 (IPC)」を設置した点である。IPC は、アジア、ヨーロッパ、アメリカの主要な実験施設における責

任者、重水素実験で重要となる研究分野の専門家 1 1 名 (以上海外委員) および、IPC と LHD 実験会議の橋渡しとしての役割を担う LHD 実験会議メンバー 1 0 名 (国内委員) で構成される。海外の IPC メンバーには、重水素実験全般に対して様々な角度からコメントしていただくとともに、それぞれの国・地域の研究者に対して、LHD 実験への参加を広くプロモートする、LHD 国際共同研究のハブとしての役割を担っていただくこと期待している。1 0 月に京都で行われた IAEA-FEC において第 1 回 IPC を開催し、各委員から、実験提案の方法等に関して多くの意見をいただいた。

5. 今後の予定

LHD の重水素実験は、今後 9 年間 (9 実験サイクル) 行う予定である。最優先課題は、第 2 章で述べたように重水素放電による LHD プラズマの高性能化である。現在までに得られているイオン温度の最高値は 8.1 keV であるが、重水素放電によって LHD の最終目標である 10 keV を、可能な限り早期に達成することを目指す。

プラズマ高性能化には、更なる加熱装置の最適化研究も必要である。特に負イオン接線 NBI の最適化を進めていく。イオンサイクロトロン加熱装置 (ICH) は、現在一時的に撤去しているが、新しいアンテナの開発を進め、実験後半での再取り付けを計画している。ICH は、LHD の最重要課題の一つである「定常研究」を遂行する上でも中核となる機器であるため、加熱性能、耐久性能の高いアンテナの開発を行う必要がある。

定常運転に関して、LHD ではこれまでに加熱入力 1.2MW で、2 keV、 $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを 48 分間維持することに成功しており、プラズマへの入射エネルギー 3.36GJ は他の追従を許していない。しかし、今後世界の定常プラズマ維持研究を牽引していくためには、定常プラズマの性能向上が必須である。そのためには前述の ICH が必須であるとともに、ダイバータ板をはじめとするプラズマ対向壁の高性能化研究にも早急に着手しなければならない。

6. まとめ

平成 1 0 年 3 月の実験開始から 1 9 年が経過し、LHD はいよいよ重水素実験という新しい段階に移行する。ヘリカル装置における本格的な重水素実験では、ヘリカルプラズマの可能性を確かめるとともに、トーラスプラズマに共通する物理の解明と工学課題を解決することが LHD に課された使命である。

参考文献

- [1] U. Stroth, PPCF 40 (1998) 9
- [2] Ryter et al., PPCF 58 (2016) 14007
- [3] K. Tanaka, et al., PPCF 58 (2016) 055011
- [4] K. Itoh, et al., PPCF 37 (1995) 491