

『ヘリカルプラズマ研究の将来構想と展望』趣旨説明  
Future plans and prospects in helical plasma research

坂本隆一

Ryuichi Sakamoto

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

## 1 はじめに

LHD 計画は核融合研究コミュニティ共有の計画として、文科省の大規模学術フロンティア促進事業によって、2012 年から 10 年間のプロジェクトとして長期的に支援されている。LHD は 2017 年から重水素実験を開始し、当初目標の達成に向けた研究が進められている。一方で、現行の大規模学術フロンティア促進事業の時限を迎える 2022 年以降の LHD を用いた後継計画や、LHD 計画後の次期計画で取り組む研究課題について議論を始める時期に来ている。後継計画や次期計画も現行の LHD 計画同様に大規模学術フロンティア促進事業による支援を得るためには、その前段階として、まずは日本学術会議において科学的観点から 3 年毎に策定されるマスタープラン、次に文部科学省科学技術・学術審議会において戦略性・緊急性等を加味して策定されるロードマップに選定される必要があり、その申請が来年となっている。大学共同利用機関である核融合科学研究所の主計画は、核融合の研究者コミュニティでの議論を経て立案、申請されるものであり、既に 2 回の核融合ネットワーク会合と、コミュニティの代表者による 3 回の委員会を開催し、核融合研究コミュニティでの議論が進められている。

## 2 LHD 後継計画

LHD 計画は 2017 年より重水素実験を開始し、前半 6 サイクルのプラズマ高性能化実験と後半 3 サイクルの総合性能実験、合わせて 9 サイクルの重水素実験にて研究課題に取り組む計画である一方で、前半 6 サイクル終了時に現行の大規模学術フロンティア促進事業の時限を迎えることから、後半 3 サイクルの総合性能実験は LHD 後継計画として、新規のプロジェクトとして立ち上げ、学術会議のマスタープラン 2020 に申請する必要がある。

LHD 計画では、トロイダルプラズマの制御の観点、さらに将来の核融合炉技術開発の一環として、以下の研究課題を掲げて研究を展開してきた。

1. 高い核融合三重積のプラズマを発生し、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的知見を得る。
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。
6. 蓄積エネルギー 2 GJ 以上の大型超伝導コイルの開発と製造を行う。
7. 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・第一壁材料の開発を行う。

これまでの20年間に渡るLHD研究で、主に高加熱パワーの短パルス放電を用いた研究により、炉心プラズマに関する当初目標を達成しつつあり、2022年までの重水素実験期間にてこれらの目標を達成できることを見込んでいる。一方で、上記課題の3や7にあるダイバータ機能を有効に使用した定常放電とその実現に不可欠なプラズマ・壁相互作用の克服に関しては、既に48分の長パルス放電に代表される成果があるものの、ハードウェアの制限等もあり、未だ十分な知見は得られていない。これらの定常放電実験には、真空容器内の除熱強化などのハードウェアの大きな改造が必須であること、また、当初より後半3サイクルの総合性能実験期間に予定していることから、2023年以降のプロジェクト（LHD後継計画）として新規に立ち上げることを提案する。

LHD後継計画では、全金属のプラズマ対向機器を採用し、閉ダイバータによる粒子・熱制御によって、1MW以上で1時間以上の定常プラズマを、核融合炉と条件の近い高リサイクリング条件で実現し、既存の装置では到達できない実規模のPWI研究を行うとともに、プラズマ物理、炉工学、材料工学等に関する学術研究の成果をJT-60SAやITERに還元し、核融合炉を実現する上でトラス装置に共通な課題の解決に貢献する。LHD後継計画は、3サイクルの重水素実験期間を含む計6年間の研究計画とし、最初の3年間で装置改造と水素プラズマを用いたコミッションングを行い、後半3年間で重水素を用いた定常放電実験を行うことにより、LHD計画当初からの研究課題を完遂する。

### 3 次期計画

次期計画を検討する上では、1)学術研究の大型プロジェクトとして認められる学術研究計画の推進、2)大学共同利用機関としての共同研究や学生教育への貢献、3)LHDの成果と未解決問題の整理と反映、4)国内外の研究の進展やなどの取り巻く状況、5)国内のプラズマ・核融合研究における核融合科学研究所の役割、などについて留意した。その検討の結果、核融合炉の実現を加速するために重要な物理的な課題及び工学的な課題である、次の二つの課題を同時にかつ相補的に検討することを、核融合科学研究所から提案する次期計画の基本方針とした。

#### 1. 高温超伝導コイルによるヘリオトロン型装置の製作と定常プラズマを用いた理工学試験

高電流密度(80 A/mm<sup>2</sup>)の高温超伝導コイルを採用し、LHDよりも小さなサイズ(大半径3.3 m)で、より高い磁場(磁場強度4 T)のヘリオトロン型装置を建設し、将来の核融合炉建設時のコイルに関する工学的課題を抽出・解決する。また、プラズマ対向機器として、全金属の高温第一壁とダイバータを採用し、放電時間が丸1日に及ぶ定常高性能プラズマを用いて、熱と粒子の挙動を長時間に渡って詳細に解明することを目指す。これにより、トカマク型を含む核融合炉の定常運転設計に貢献する。

#### 2. 自己点火炉心プラズマを目指した最適化ヘリカル装置による研究

LHD実験において優れた総合性能を示す内寄せ配位をベースに、乱流輸送、高エネルギー粒子軌道、MHD不安定性、周辺磁場構造などの複数の物理過程を同時に最適化する理論スキームを構築し、それに基づいて設計された装置を用いた実験研究によって、輸送改善とMHD安定性などが両立した先進的な最適化配位を実証する。この研究によって、ヘリカルプラズマのさらなる高性能化を引き出し、核融合炉の工学的制約を大幅に緩和させて、その実現性を向上させるとともに、自己点火定常核融合炉の設計を可能とする。

いずれの計画ともLHD研究の成果に立脚し、核融合原型炉の先にある自己点火定常核融合炉の実現に学術研究の側面から資することを念頭に置いて研究計画策定を進めているが、本計画の推進で得られる学術的知見は、JT-60SA、ITER、原型炉研究開発に対しても直接的、間接的に寄与する。さらに、核融合分野のみならず、他の学術分野や産業応用分野への波及効果も期待できる計画となっている。今後、計画の技術的実現可能性やコストの評価等も行い、研究計画の具体化を進め、2023年のマスタープランへの申請を予定している。

後半の2件の講演では、高温超伝導研究および磁場閉じ込めプラズマ研究の最新の動向の紹介を交えながら、学術的な観点から次期計画提案に対する期待や要望を議論する。さらに、総合討論では複数の研究拠点からの代表者らを交えたパネルディスカッションによって、研究計画の将来展望を議論する。