

## 第 2 章 大型ヘリカル装置の目的と現在までの成果

### 2.1 目的

#### 2.1.1 はじめに

核融合エネルギーの実現のために、世界的に活発な研究活動が展開されており、例えば、トカマク方式を用いた核燃焼実験が国際協力 (ITER) によって実現されようとする段階に至っている。一方、実用炉を見通した場合には、なお克服すべき課題があり、相当の研究開発の努力が必要である。

わが国の大学においては、将来の核融合炉の実現に向けて、基本的に重要な諸問題を解決していくための基礎基盤研究を重ねて来ている。1980年代後半までの中型実験装置を用いた実験研究および理論研究を基にした議論から、大学における核融合研究は、高温プラズマの生成・保持の一層の定常化、高ベータ化を重点目標として、推進していくことが必要であると判断された。これらの目標を達成するには、どのような実験研究計画が適切であるかについて、全国の核融合研究者及び、関連する分野の研究者の意見が集約され、この大型ヘリカル装置計画が策定された。

ヘリカル型装置は、外部コイルのみによって無電流状態でのプラズマを閉じ込めることができるという、本質的な定常性を備えているため、定常核融合炉方式として優れた特長を有している。わが国にはヘリオトロン方式という日本独自の創案(1961年)のヘリカル方式について、長い研究の歴史がある。1980年代には京都大学においてヘリオトロン E を用いて、1000万度を越える無電流高温プラズマ保持を実証するなど、この分野においては世界的に先導性、主導性を発揮できる立場にある。このような背景を受け、1億度級プラズマを大型のヘリカル方式装置において実現し、新しい領域の無電流プラズマについての物理法則を明らかにするための先駆的研究を行い、ヘリカル型核融合炉心プラズマへの見通しを確固たるものとし、工学的特性の理解を深めるのみならず、ヘリカル方式と相補的關係にあるトカマク方式を含めた環状系プラズマの総合理解に寄与するものと強く期待されるところである。

大型ヘリカル装置(以下「LHD」という)計画は、昭和61年の学術審議会答申に基づき設計部会による概念設計、組織検討部会による推進母体となる新研究所の検討を経て、平成元年、核融合科学研究所が創設され、LHD の建設が開始された。

LHD 計画は、わが国独自の開発の歴史を持つヘリオトロン磁場を用いて世界最大の超伝導ヘリカル装置を建設し、定常運転核融合プラズマの閉じ込め方式の研究を行い、ヘリカル方式の炉心プラズマのための重要な物理的、工学的研究課題を解明することを目的としている。

大学共同利用機関法人である核融合科学研究所において推進されている大型ヘリカル装置計画は、平成10年の実験開始以来、これまで全国の大学等の研究者の積極的な参加を得て研究活動が進められ、世界に例のない高性能定常プラズマを実現し、多くの先駆的な物理・工学分野における成果を収めてきた。その間、大型装置ゆえのほぼ予想されたスケールメリットに加えて、既存の物理モデルを越える実験的な新しい発見がいくつもなされている。これらの発見はすぐさま、実験計画に反映され、プラズマの高性能化につながってお

り、装置の整備・増強と相乗的に実験計画の進展を加速している。

現在まで得られた理解によれば、まだ LHD の性能上限には更なる改善の可能性があり、今後も炉心プラズマに外挿できるパラメータ下における環状プラズマの総合的理解、ITER への寄与、新しい閉じ込め配位研究のための装置との連携などを目標に強力に学術研究を進める必要があると言える。

本章では、LHD を中心とした大型ヘリカル研究部が全国の大学等の研究者と共同で進めてきたこれまでの成果を所期の目的に照らして述べる。LHD が持つ物理(ヘリオトロン磁場配位)と装置工学(大型超伝導コイル)の両面の特長が、高温プラズマの定常保持に大きな伸長をもたらしていることが、実験開始以来、10 年間の実験によって実証された。定常性に優れた能力は同時に、短い間隔で多数回の安定したプラズマ実験を可能としており、平成19年度までに 8 万回を超えるプラズマ放電を実施し、新たな発想による試みを含めた物理実験に多くの研究機会を作り出している。

## 2.1.2 大型ヘリカル装置計画における重点研究課題と目標

LHD の設計時に課された研究課題の骨子は実験開始後 10 年を経て、研究の進展がはかられた今も、成果の評価を行うに当たって基本とすべきものである。

ヘリカル型方式は閉じ込め磁場を外部コイルで形成するもので、他に比べ定常運転に優れた方式と言われている。そこで、LHD 実験によって、以下のような重点研究課題を研究、開発することで核融合プラズマの閉じ込めが可能であることを実証しようとするものである。

- (1) 高温・高密度・長時間プラズマを発生し、炉心プラズマに外挿し得る輸送の研究を広範に行う。
- (2) 炉心プラズマに必要な平均ベータ値 5 % 以上の高ベータプラズマを実現し、関連する物理を調べる。
- (3) ダイバータを設置して、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る。
- (4) 高エネルギー粒子のヘリカル磁場中での振舞いを研究し、炉心プラズマでの 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。

さらに、これらの研究課題を実施するために最終的な目標とされるプラズマ諸量は下記の通りである。

### (1) 高温・高密度・高閉じ込めモード

平均プラズマ温度	3,000-4,000 万度
平均プラズマ密度	$10^{20}/\text{m}^3$
エネルギー閉じ込め時間	0.1-0.3 秒

### (2) 高イオン温度モード

中心イオン温度	1億度
平均プラズマ密度	$2 \times 10^{19}/\text{m}^3$

### (3) 高ベータモード

平均プラズマベータ値 5%以上

プラズマ中心における磁場強度 1-2T

但し、これらの目標設定は装置規模として大半径 4-5m、磁場強度 4T、加熱吸収パワー 15-20MW の初期装置仕様条件に基づいたものであることに注意しておかなければならない。実際の装置仕様は次節に記述があるとおり、初期仕様よりも縮小された。しかしながら、目的・目標は変更していない。

### 2.1.3 現状と今後の計画についての概要

LHD は8年間の建設計画を予定通りに遂行し、平成9年度に完成した。

LHD の現在の装置緒元を以下に記す。

プラズマ大半径	3.9 m	ヘリカルコイル中心において
プラズマ小半径	0.6 m	
磁場強度	2.85T	磁気軸位置 3.6m において
加熱パワー		
中性粒子入射加熱	20 MW	
イオンサイクロトロン共鳴加熱	2.7MW	
電子サイクロトロン共鳴加熱	2.1MW	

これまで得られたプラズマ諸量および初期目標との対比は以下のようになる。

#### (1) 高温・高密度・高閉じ込めモード

中心プラズマ温度 1,000 万度 (0.85keV)

平均プラズマ密度  $3 \times 10^{20} / \text{m}^3$

エネルギー閉じ込め時間 0.11 秒

最終目標値の下限に近づいている。閉じ込めが良い状態を高温化することが課題である。また、この値は LHD で新たに発見された内部拡散障壁の形成による中心密度が  $5 \times 10^{20} / \text{m}^3$  に達する超高密度コアプラズマによるものであることに注目すべきである。

#### (2) 高イオン温度モード

中心イオン温度 1億5千万度 (13.5keV)

平均プラズマ密度  $3 \times 10^{18} / \text{m}^3$

温度は目標を越えたが、その時の密度が目標の数分の1に留まっている。また、多価イオンであるアルゴンプラズマにおいて達成されている。水素での高温化が課題であるが、水素プラズマにおいて低エネルギーNBI 加熱によるイオン温度の上昇が確認されており、現在、以下の値が達成されている。

中心イオン温度 7,900 万度 (6.8keV)

平均プラズマ密度  $2.0 \times 10^{19} / \text{m}^3$

#### (3) 高ベータモード

平均プラズマベータ値 5.0 % 磁場強度 0.425T

ベータ値は目標に達したが、磁場強度が低い条件となっているため、より高い磁場での高ベータ化が課題である。

この他にも、取り上げるべき諸量として、以下があげられる。

#### (4)長時間プラズマ保持

680kW の加熱入力により中心温度 2300 万度 (2keV)、平均密度  $8 \times 10^{18}/\text{m}^3$  のプラズマを 31 分 45 秒間、490kW の加熱入力により中心温度 1200 万度 (1keV)、平均密度  $4 \times 10^{18}/\text{m}^3$  のプラズマを 54 分 28 秒間、保持することに成功した。

#### (5)高電子温度モード

中心電子温度 1億2千万度

平均プラズマ密度  $5 \times 10^{18}/\text{m}^3$

当初の実験計画では第Ⅰ期と第Ⅱ期に分け、第Ⅱ期において大規模な装置の増強・改造を行うこととしていた。大きな増強・改造項目として

- (1) 超流動ヘリウムを用いた冷却により超伝導コイルを 1.8K まで冷却し、安定性を増大させ、運転磁場強度を 4T まで高める。
- (2) 閉ダイバータ構造と能動的排気によって高効率の熱粒子制御を行い、定常プラズマの性能を伸長させる。
- (3) プラズマ燃料に重水素を使用し、イオンがより大きな質量を持つことによる同位体効果によって閉じ込めを改善させ、より高性能なプラズマを実現する。

が、挙げられていた。

このうち(1)については、超伝導設備および LHD の本体の大規模な改造・増強を必要とするため、LHD 実機に応用することは断念した。しかし、過冷却サブクールシステムの導入により冷却温度を現状の 4.4K から 3.5K へ下げ、磁気軸位置 3.6m において磁場強度 3T の達成を目的とする改造が平成18年度に実施されている。(2)についても、プラズマ真空容器の大幅な改造を必要とするため、ローカル・アイランド・ダイバータ(Local Island Divertor: LID) という局所的に高効率排気を行うシステムを導入し、今後の閉ダイバータ構造への研究の連続性を担保している。この LID によって前述の内部拡散障壁モードが発見され、高密度プラズマの新しい領域を拓いた。(3)については、本計画書の述べるところである。

## 2.2 これまでの成果

### 2.2.1 パラメータの進展

実験は、平成10年度の初年度のみ2回の冷却運転、その後は年1回の一定のスケジュールに沿っている。プラズマ実験は9月下旬から10月上旬に開始し、翌年2月中旬まで4ヶ月あまりの間、平日の火曜から金曜まで行っている。超伝導コイルの特長を活かし、閉じ込め磁場が定常的に存在することから、標準運転として3分に1回のプラズマ放電を実施し、1日に160 - 170回程程度のプラズマ実験の機会を提供している。

図2.2-1に第1サイクルからの加熱性能とプラズマ蓄積エネルギーおよびベータ値の進展を、図2.2-2にプラズマ温度と放電保持時間、入力エネルギーの進展を示す。順調に推移してきているが、これには加熱機器の増強とそれに見合った排気や燃料供給および除熱機