

第 3 章 大型ヘリカル装置の重水素実験計画

3.1 目的と意義

前章で述べたように、大型ヘリカル装置(LHD)はその定常無電流という特長を持つ磁場閉じ込め装置として、世界に先駆けた高性能プラズマ実験を遂行している。現在までに達成されたプラズマパラメータは、大型トカマク装置と比較・対照できるレベルであり、さらに数倍向上させることにより、図3.3-1に示すように、LHDの目標領域に達することができる。これにより核燃焼プラズマ領域におけるLHD型プラズマの閉じ込め、安定性などを予測することが可能となる。さらに、ITERにおける核燃焼実験の結果を取り入れることにより、ヘリカル型核融合実証炉の設計を進めることができる。また、学術的にも、核融合実証炉に向けた革新的概念を実証し、データベースの蓄積を図っていく上で、LHDの目標プラズマ領域の達成は重要である。

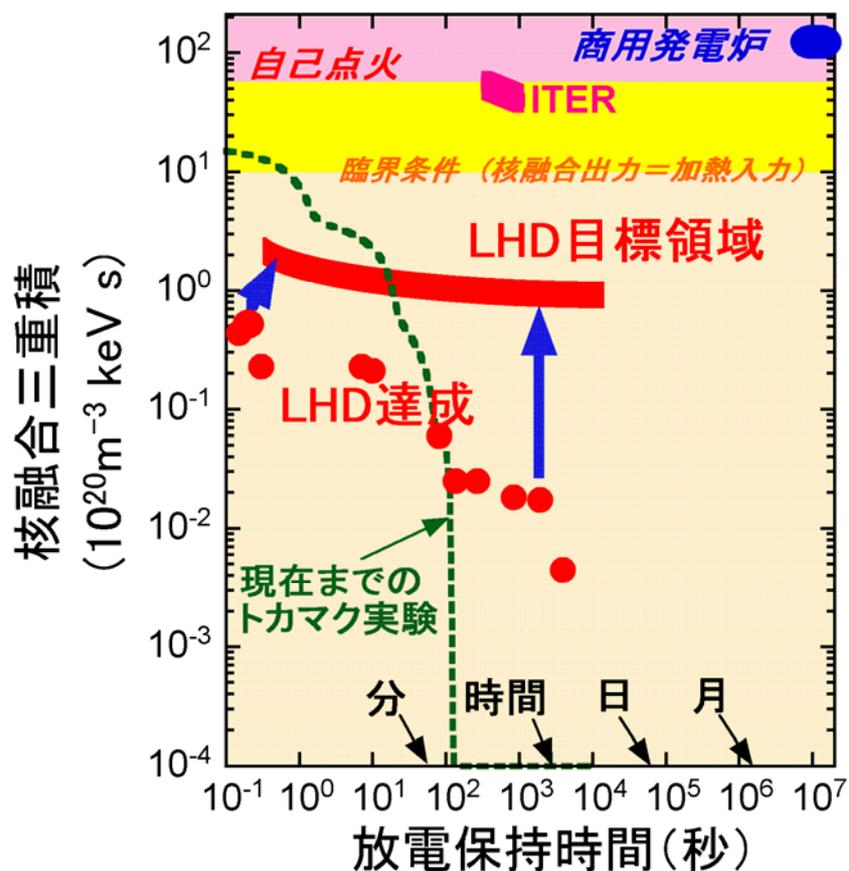


図 3.1-1 LHD で達成された核融合三重積と放電維持時間。ITER と LHD の目標領域を合わせて示す。

重水素実験の最も重要な点は、以下のとおりである。

ITERに代表されるトカマク装置は、早くから研究が進められ、プラズマパラメータは、現在のところLHDを上回っている。しかし、原理的にパルス装置であり、将来の核融合商用炉

に要求される1年を超えるような長時間運転の可能性については、種々のアイデアは出されているものの、まだ実験的に実証されてはいない。実際、ITERやサテライト・トカマク装置の主要目的の一つは、長時間運転の見通しを実験的に見極めることにある。しかし、この見極めの結果が出るのは早くても10年から20年後であり、結果が出た後に、他の方式を模索するようなことになった場合、核融合研究は大きく遅滞し、それは、取りも直さず、核融合研究の目的である人類の福祉の将来に憂慮すべき事態を意味している。

LHDは原理的に長時間運転が可能であり、既に1時間を超える放電に成功し、長時間運転を実証している。したがって長時間運転という点では、核融合商用炉としての条件に、より近づいていると言えよう。現在のLHDの問題は、水素を使った実験で、核融合反応に必要なイオン温度にまだ到達していないことである。しかしこれまでの研究の結果、核融合反応に必要なイオン温度を将来達成できる見通しが立っており、重水素実験と加熱装置の増強を合わせたシナリオによってこれを実証・確認することができる。このシナリオによって、LHDのプラズマパラメータの最終目標値を達成できれば、ヘリカル型実証炉の設計が可能となり、核融合商用炉の実現に大きく近づくことになる。さらに、ローカルアイランドダイバータを用いた実験で、超高密度プラズマを実現することができたことから、従来とは異なる、超高密度で比較的温度の低いプラズマを用いて核融合炉を実現させる方法も考えられるなど、ヘリカル方式はより魅力的な炉概念へと大きく躍進する可能性を有している。

このように、LHDにおける重水素実験と加熱装置の増強計画は、核融合炉の実現と将来の明るい将来の社会実現へ非常に重要なものとなっている。

LHDではこれまで水素を用いたプラズマ実験を行ない、加熱電力の増強と高温プラズマに対する学術的理解の進展により、プラズマパラメータを着実に向上してきた。一方、世界の大型トカマク装置では、重水素プラズマの場合、水素プラズマに比べて閉じ込め性能が向上することが示されており、重水素プラズマを用いた実験を基本として研究が進められている。日本原子力研究開発機構のJT-60Uトカマク装置では、平成3年より重水素実験を開始したが、図3.1-2に示す通り、プラズマ性能が重水素化により大きく向上した。LHDにおいても、重水素実験を行うことにより、トカマク装置と同様に閉じ込め性能が向上して、目標とするプラズマパラメータを達成できることが期待される。また、トカマクにおける閉じ込めスケールリングでは、閉じ込めに対する質量効果が確かめられており、ヘリカル型装置に対してもこの質量効果などの同位体による差異の存在を検証することは、学術的にも極めて重要である。

このように、LHDにおいて重水素実験と加熱装置の増強を行うことの意義は、

- (1) プラズマパラメータの向上が期待され、LHDのプラズマパラメータの最終目標値の達成が可能となる。これにより、複雑な磁場配位を持つヘリカル型装置における高温プラズマの理解をさらに深めることができ、ヘリカル型プラズマ物理の体系化、及びヘリカル型実証炉における核燃焼プラズマの性質を学術的に見通すことなどが可能となる、
- (2) これにより、ヘリカル型実証炉の設計が可能となる、
- (3) ヘリカル型装置における質量比などの同位体効果を明らかにすることなどを通じて、高

温プラズマに関するトカマク型装置との相補的理解を深め、環状プラズマに共通する物理を学術的に明らかにすることが可能となる、とまとめることができる。

JT-60トカマク装置(日本原子力研究所)の結果

	水素	重水素	
	～平成元年	平成3年	平成4年
イオン温度 (1000万度)	11	20	38
エネルギー閉じ込め 時間 (秒)	0.22	0.28	0.45
核融合三重積 (10^{19} keV・秒・個/m ³)	9.9	20	44

日本原子力学会誌 第35巻6号28ページ(1993年)より

図 3.1-2 JT 60装置における重水素実験によるプラズマの性能向上を示す。

LHDにおける重水素実験の目的は、上述したように、重水素同士の核融合反応そのものを研究対象とすることではなく、ヘリカル型装置における学理の体系化、核融合反応の実現に必要とされる高温プラズマの物理の体系化、環状プラズマの総合的理解、およ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、蓄積などを行うことを目的としている。

重水素実験では、重水素イオンのラーマー半径が軽水素イオンに比べ $\sqrt{2}$ 倍大きいことが輸送機構に大きく影響し、また、その質量の違いは、原子過程、化学的性質にも影響を及ぼす。その結果、閉じ込め性能、MHD安定性などのプラズマ物理に新たな課題を提供する。また、ICRF加熱では、重水素と軽水素の組み合わせにより、マイノリティ加熱と呼ばれる新たなプラズマ加熱を行うことが可能となり、特にヘリカル系における高エネルギー粒子の研究を促進することができる。

以上のことから、LHDにおける重水素実験の具体的な目的は、以下のようにまとめることができる。

- (1)ヘリカル系における同位体効果を明らかにし、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ベータ値の増加を図り、高温領域におけるMHD安定性の研究を行う。
- (3)ICRF加熱実験においてマイノリティ加熱を行い、高イオン温度を実現するための研究を行う。

- (4)ヘリカルプラズマの物理を学術的、体系的に理解し、核融合炉の設計・製作に必要な条件を確立する。
- (5)他の方式(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。
- (6)以上の事柄を重水素実験により明らかにし、目標プラズマパラメータを達成することにより、将来のヘリカル型核融合実証炉の設計を可能とする高温プラズマの学術的な理解を進めると共にデータベースの蓄積を図る。

以下では、こうした重水素実験の目的を達成するために必要な物理検討、実験シナリオ、実験スケジュールなどの検討を行う。また、重水素実験に際して発生する中性子・トリチウム量の評価を行うと共に、重水素実験を実施するために必要な、機器の改造、加熱装置の増強等の機器整備計画案も示す。

3.2 物理検討

多くの磁場閉じ込めプラズマ実験において、重水素を用いることにより閉じ込めの改善が見られている。はじめに、これらについて分析する。

3.2.1 トカマク実験における閉じ込め改善について

3.2.1.1 概観

トカマク実験において、水素プラズマから重水素プラズマへ転換した際のエネルギー閉じ込め時間の改善度 $\tau_E(D)/\tau_E(H)$ を表 3.2-1 に整理する。LOC は線形オーミック閉じ込め (Linear Ohmic Confinement)、SOC は飽和オーミック閉じ込め (Saturated Ohmic Confinement))を表す。

表 3.2-1 諸トカマク装置の重水素化によるエネルギー閉じ込め時間の改善。

	LOC	SOC	L mode	H mode
Alcator C	-	1.5	-	-
ASDEX	1.3	1.5	1.3	2
ASDEX-UG	-	-	1.5	1.5
DIII-D	-	1.4	1 1.4	2
FTU	1.1	1.4	-	-
ISX-B	1.4	1.4	-	-
JET	-	1.4	1.2	1.2
JFT-2M	1.1	1.4	1.4	1.4
JT-60U	1.2	-	1.4 1.6	-
TEXTOR	1.4	1.4	-	-
TFTR	-	-	1.15	1