

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

構の改良とさまざまな実験成果をプラズマ運転制御の改善に活かすことが出来た結果である。パラメータの伸びは研究の進展を表すとともに、実験対象の広がりを意味しており、学術研究の範囲および機会が拡大されてきたことを示唆している。現在の LHD とその付帯装置の性能を表 2.2-1 にまとめる。また、平成19年度の第11サイクルプラズマ実験までに得られたプラズマパラメータを所期の目標を合わせて表 2.2-2 に比較する。

LHD で得られたプラズマ性能を、中心密度、中心温度、エネルギー閉じ込め時間の積で表される核融合三重積と放電保持時間に注目して、核融合炉条件や既存のトカマク実験と比較したものが図 2.2-3 である。核融合三重積は臨界条件の約20分の1となっているが、6分を越えて高温プラズマを保持することはLHD でしかできておらず、固有の実験領域となっている。

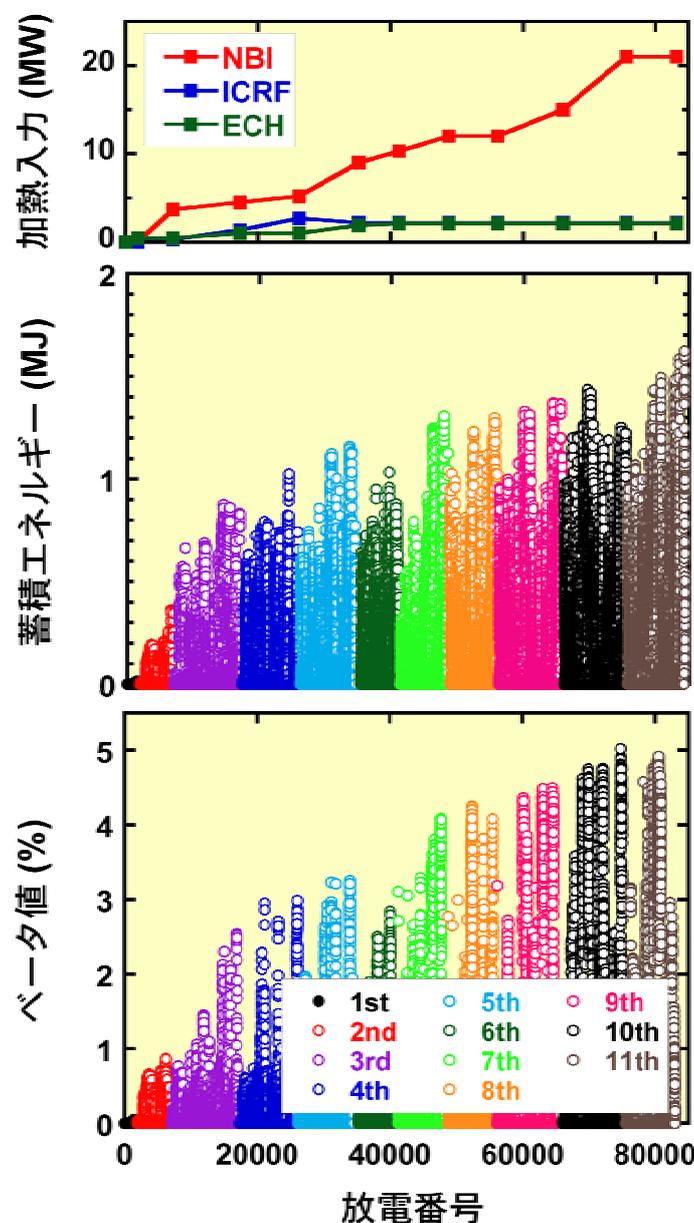


図 2.2-1 加熱性能とプラズマ蓄積エネルギーおよびベータ値の推移。

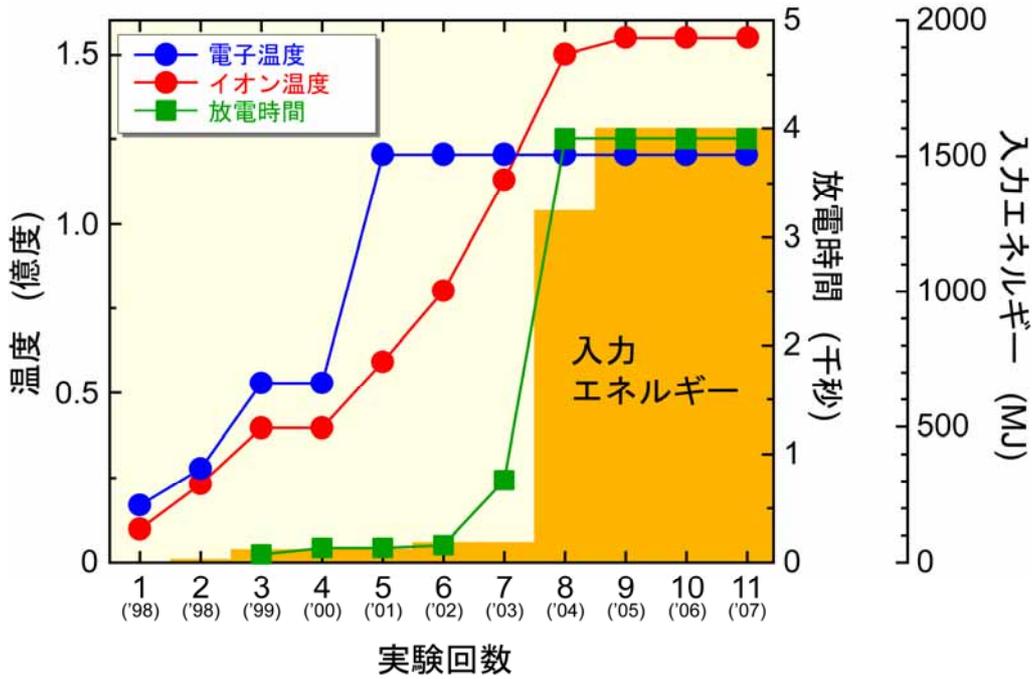


図 2.2-2 プラズマ温度、放電保持時間、加熱入力エネルギーの推移。

今後のヘリカル型核融合炉を見通し、信頼性の高い設計を行うためには、図 2.2-3 に赤線で示した目標領域への到達が必要である。このためには、既存の設備では不足であり、加熱パワーの増強、閉ダイバータ構造の設置、重水素を燃料とした実験が LHD 実験の発展の鍵となる。

表 2.2-1 装置パラメータ。

装置		達成装置緒元	所期目標
超伝導コイル		2.85T ( $R_{ax}=3.6$ m時)	3.0T ( $R_{ax}=3.75$ m時) 4.0T (超流動He冷却)
加熱装置	中性粒子入射加熱(NBI)	接線入射3機 パワー 14MW エネルギー 180keV 垂直入射1機 パワー 6MW エネルギー 40keV	パワー 15MW (吸収)
	イオンサイクロトロン周波数帯高周波加熱(ICRF)	6系統 パワー 2.7 MW 周波数 25-100MHz	パワー 3MW
	電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)	7系統 パワー 2.1 MW 周波数 82.7, 84, 168GHz	パワー 10MW

排気装置	主排気装置	排気速度 約30万リットル/s	3000リットル/s
	ローカルアイランドダイバータ(LID)	排気速度 約30万リットル/s	閉ヘリカルダイバータ化
燃料供給装置	ガスパフ装置	最大流量 400 Pam <sup>3</sup> /s 注入口 5ヶ所	
	ペレット入射装置	2.5mmφ 10Hz 定常 3mmφ 10発/プラズマ放電	

表 2.2-2 プラズマパラメータ。

	第11サイクルまで (平成19年度)		所期目標
核融合三重積 (keV10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> s) (中心イオン温度 (keV)) (中心イオン密度 (10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> )) (エネルギー閉じ込め時間(s))	4.4 (0.85) (46.0) (0.11)		5-10 (5) (10) (0.1-0.2)
中心電子温度(keV) (線平均密度(10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> ))	10 (0.5)		10 (2)
中心イオン温度 (keV) (線平均密度(10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> ))	13.5 (0.3) (Arガス)	6.8 (2.0) (H2ガス)	10 (2)
値 (%) (磁場 (T))	5.0 (0.425)		5 (1-2)
放電保持時間 (s) (加熱パワー(kW))	3900 ⇔ 1時間5分 (110) 1905 ⇔ 31分45秒 (680) 3268 ⇔ 54分28秒 (490)		3600 (3000)

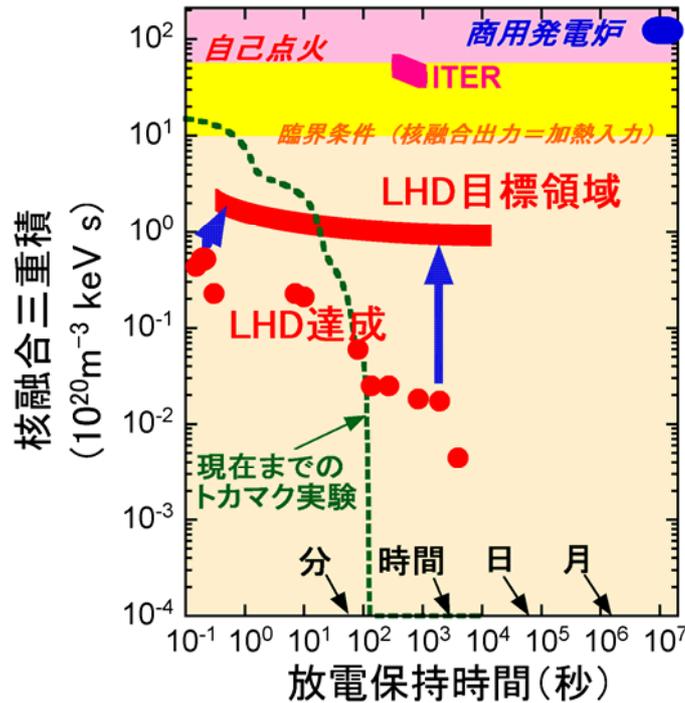


図 2.2-3 核融合三重積と放電時間平面上で表したプラズマ性能。緑の点線は大型トカマク等、LHD 以外の実験で達成された範囲を示す。

以下に重要課題についての成果を述べる。

### 2.2.2 エネルギー閉じ込め時間と熱輸送

ヘリカル系無電流プラズマの巨視的な閉じ込め、すなわちエネルギー閉じ込めについては、LHD 以前に中型装置実験からのデータベースに基づき、国際ステラレータスケールング 95 則 (International Stellarator Scaling 95, ISS95 と略す)

$$\tau_E^{ISS95} = 0.079 a^{2.21} R^{0.65} P^{-0.59} \bar{n}_e^{0.51} B^{0.83} t_{2/3}^{0.4}$$

が国際共同研究によって、提唱されていた。ここで  $\tau_E^{ISS95}$  はスケールング則から予想されるエネルギー閉じ込め時間(秒)、 $a$ 、 $R$ 、 $P$ 、 $\bar{n}_e$ 、 $B$ 、 $t_{2/3}$  はそれぞれ、小半径(m)、大半径(m)、吸収加熱パワー (MW)、線平均密度 ( $10^{19}m^{-3}$ )、磁場 (T)、規格化小半径が 2/3 の場所で評価した回転変換である。このスケールング則は閉じ込め物理の重要な要素となると考えられる無次元量、規格化ジャイロ半径  $\rho^*$ 、衝突頻度  $\nu^*$ 、ベータ値  $\beta$  で書き換えることができ、ボーム閉じ込め時間を  $\tau_B$  とすると  $\tau_B \rho_*^{-0.71} \beta^{-0.16} \nu_*^{-0.04}$  となる。規格化ジャイロ半径への依存性が -1 乗に近く、微視的乱流が支配するジャイロボーム型の輸送であると性格づけすることができる。この依存性はトカマクとも、H-mode スケールング則 (IPB98(y,2)) に見られる共通性がある。