

## 目 次

|                           | 頁   |
|---------------------------|-----|
| 第1章 序                     | 1   |
| 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                    | 3   |
| 2.2 これまでの成果               |     |
| 2.2.1 パラメータの進展            | 6   |
| 2.2.2 エネルギー閉じ込め時間と熱輸送     | 10  |
| 2.2.3 高密度および閉じ込め改善        | 18  |
| 2.2.4 高ベータ領域の拡大および MHD 特性 | 26  |
| 2.2.5 定常実験                | 34  |
| 2.2.6 高イオン温度              | 39  |
| 2.2.7 高電子温度               | 41  |
| 2.2.8 電場による閉じ込め改善         | 42  |
| 2.2.9 粒子および不純物輸送          | 44  |
| 2.2.10 高エネルギー粒子の閉じ込め      | 46  |
| 2.2.11 装置工学               | 48  |
| 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                 | 61  |
| 3.2 物理検討                  | 64  |
| 3.3 実験シナリオ                | 77  |
| 3.4 実験スケジュール案             | 84  |
| 3.5 中性子・トリチウム発生量評価        | 87  |
| 3.6 機器整備計画                |     |
| 3.6.1 大型ヘリカル装置本体の整備       | 90  |
| 3.6.2 ダイバータの高性能化          | 92  |
| 3.6.3 中性粒子入射加熱装置整備        | 96  |
| 3.6.4 高周波加熱装置整備           | 100 |
| 3.6.5 計測機器整備              | 105 |
| 3.6.6 放射線計測               | 140 |
| 3.6.7 建屋整備                | 151 |
| 第4章 まとめ                   | 165 |
| 付録資料1 設備増強全体図             |     |
| 付録資料2 設備増強年次計画            |     |

## 第 1 章 序

大型ヘリカル装置(LHD)を用いた核融合エネルギーの実現を目指す高温プラズマの実験研究は、大学共同利用研究機関である核融合科学研究所の主計画として進められてきた。我が国独自のヘリオトロン磁場を用い、世界最大の超伝導実験装置を建設し、ヘリカル方式による炉心プラズマのための物理工学的研究をおこなうことを目的としている。その研究計画は昭和 62 年の基本構想「グリーンブック」から始まり、装置計画「ブルーブック」、基本設計「オレンジブック」、「NIFS Technical Report I & II」にまとめられている。そこには重点研究課題として、1) 高 $n$  T プラズマによる輸送の研究、2) 高 プラズマの物理研究、3) ダイバータを用いた定常プラズマの研究、4) 高エネルギー粒子の閉じ込め研究、5) トカマクとの相補的研究 等をおこない、環状磁場閉じ込めプラズマの総合的理解に寄与すること等が挙げられている。

平成 9 年度から始まった LHD のプラズマ実験は、次章に述べるように順調に進展し、重点研究課題について多くの発展と新しい知見が得られるなど、核融合炉を目指したプラズマの閉じ込め研究として多くの注目すべき成果が得られている。研究の進展による磁場配位最適化の結果、LHDにおいて生成保持されるプラズマの特性は当初の予想に沿ったもの、もしくはそれ以上の性能があることが明らかになり、プラズマパラメータも既に所期の目標値の下限に到達している。

現在までの LHD 実験により、ヘリカル系が本来持つ定常運転が容易であるという核融合炉への優位性の実証に加えて、高ベータ化と良好なプラズマ閉じ込め性能の両立が可能となり、将来の定常核融合炉実現への具体的道筋を描く段階になってきた。ドイツにおいて LHD と同程度の規模を持つ W7-X 装置の運転も近い将来始まる予定であり、ヘリカル系閉じ込め装置の研究が新たな段階へ入ろうとしている。

このような時期にあって、核融合科学研究所では LHD において、現在の水素プラズマによる実験から、重水素プラズマによる実験に進むことを計画している。重水素を用いることにより、より高性能なプラズマによる炉心プラズマへの外挿性の精度を高めた実験が可能になる。重水素の同位体効果による閉じ込め改善、閉ダイバータによる排気効率の向上、加熱装置の増強と改良による加熱パワーの増加等がプラズマの高性能化に寄与すると期待されている。

これらの高性能プラズマ実験実施のため、LHD 本体装置を始め、ダイバータ、加熱装置(NBI,ECH,ICRF)、計測装置、安全管理設備等の改造・増強の検討が進められた。この報告書では大型ヘリカル装置の重水素実験について、その目的と物理検討、実験の概要と必要な機器の整備計画について述べている。

LHD における重水素実験はヘリカル系のみならず核融合研究の将来に極めて重要な位置を占めている。最近フランスのサイトでの建設計画がスタートした ITER 装置では核燃焼プラズマによる実験がおこなわれるが、我々は次の段階である発電実証炉の設計に合わせ、ヘリカル系による経済的な核融合実証炉の設計をおこなうための基盤データを得ることを目指している。

核融合科学研究所では、本重水素実験計画、安全管理計画の立案などのため、重水素実験準備室を立ち上げ、所長、大型ヘリカル研究部をはじめ、安全衛生委員会、安全衛生推進部、安全センターなどの全所的、全面的な協力のもと、検討を重ねてきた。本書はこれらの検討結果を実験計画案としてまとめたものである。

## 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る、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ことが必要であると言える。

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 万回を越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

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。

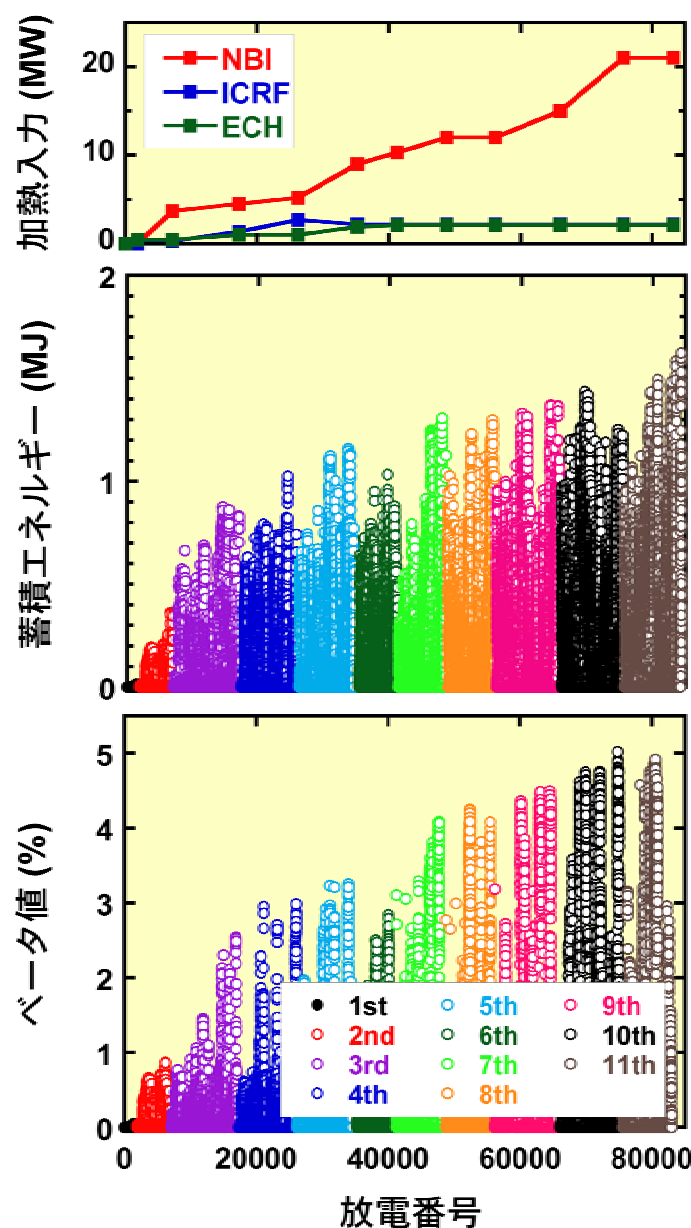


図 2.2-1 加熱性能とプラズマ蓄積エネルギーおよびベータ値の推移。

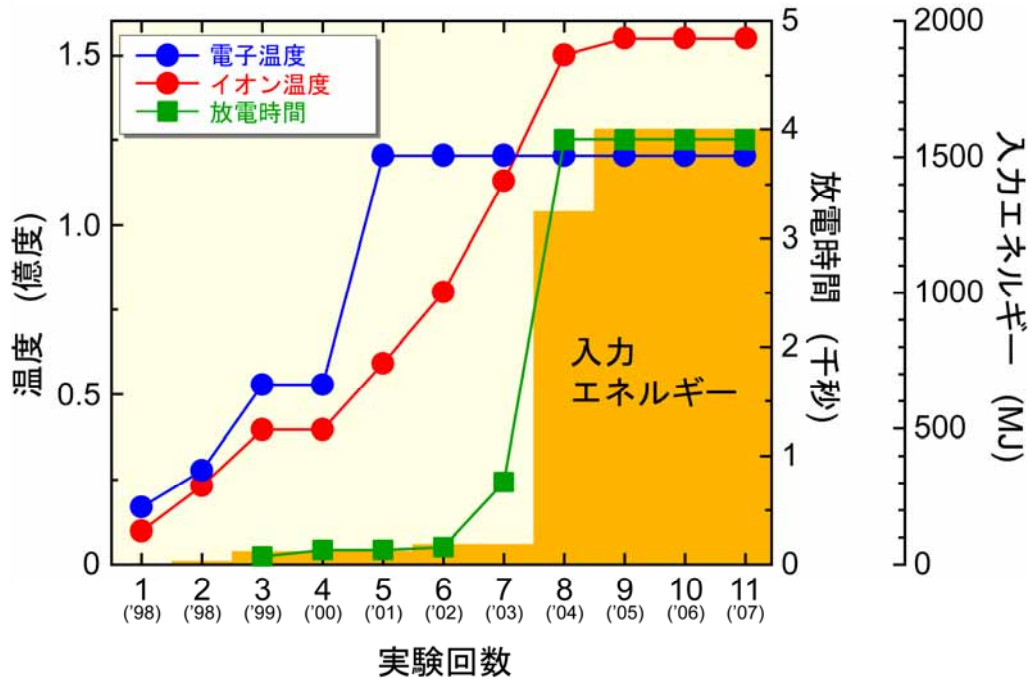


図 2.2-2 プラズマ温度、放電保持時間、加熱入力エネルギーの推移。

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<br>( $R_{ax}=3.75$ m時)<br>4.0T<br>(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<br>エネルギー 180keV<br>垂直入射1機 パワー 6MW<br>エネルギー 40keV | パワー 15MW<br>(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<br>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<br>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<br>注入口 5ヶ所 |             |
|        | ペレット入射装置            | 2.5mmφ 10Hz 定常<br>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<br>(平成19年度)   |                        | 所期目標                             |
|--|---|------------------------|----------------------------------|
| 核融合三重積 (keV10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> s)<br>(中心イオン温度 (keV))<br>(中心イオン密度 (10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> ))<br>(エネルギー閉じ込め時間(s)) | 4.4<br>(0.85)<br>(46.0)<br>(0.11)   |                        | 5-10<br>(5)<br>(10)<br>(0.1-0.2) |
| 中心電子温度(keV)<br>(線平均密度(10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> ))  | 10<br>(0.5)   |                        | 10<br>(2)                        |
| 中心イオン温度 (keV)<br>(線平均密度(10 <sup>19</sup> m <sup>-3</sup> ))  | 13.5<br>(0.3)<br>(Arガス)   | 6.8<br>(2.0)<br>(H2ガス) | 10<br>(2)                        |
| 値 (%)<br>(磁場 (T))  | 5.0<br>(0.425)  |                        | 5<br>(1-2)                       |
| 放電保持時間 (s)<br>(加熱パワー(kW))  | 3900 ⇔ 1時間5分<br>(110)<br>1905 ⇔ 31分45秒<br>(680)<br>3268 ⇔ 54分28秒<br>(490) |                        | 3600<br>(3000)                   |

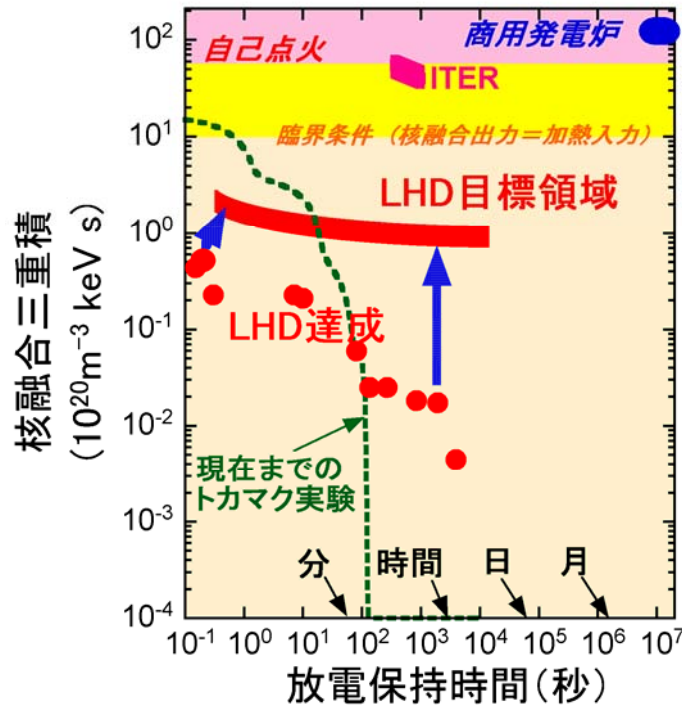


図 2.2-3 核融合三重積と放電時間平面上で表したプラズマ性能。緑の点線は大型トカマク等、LHD 以外の実験で達成された範囲を示す。

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。

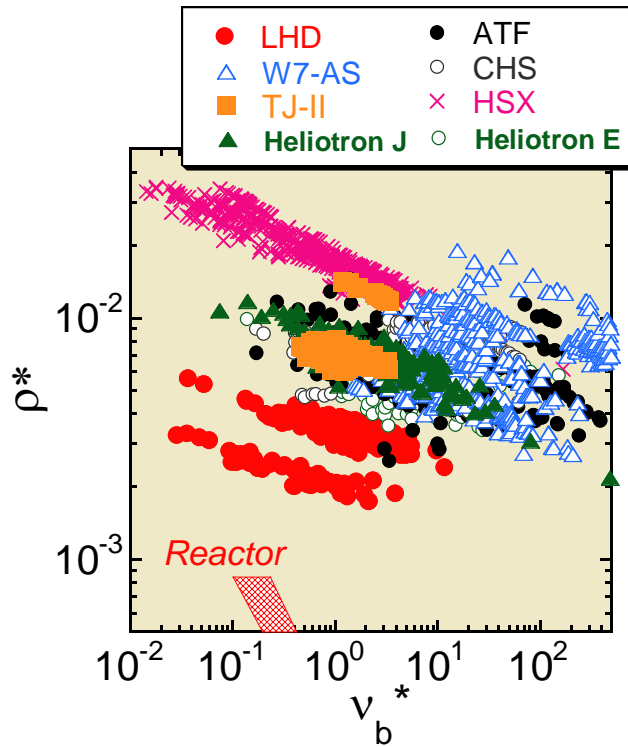


図 2.2-4 規格化ジャイロ半径 $\rho^*$ と衝突頻度 $\nu_b^*$ で示したヘリカル系実験のデータ範囲。

LHDはそれまでの中型装置から核融合炉条件に向かって、無次元物理量として、数倍の進展を示した。規格化ジャイロ半径とバナナ軌道のバウンス周波数で規格化した衝突頻度で表した図を図 2.2-4 に示す。LHD のデータを含めたデータベースから得られる知見については後述するとして、LHD 実験で得られたエネルギー閉じ込め時間と熱輸送についてまず述べる。

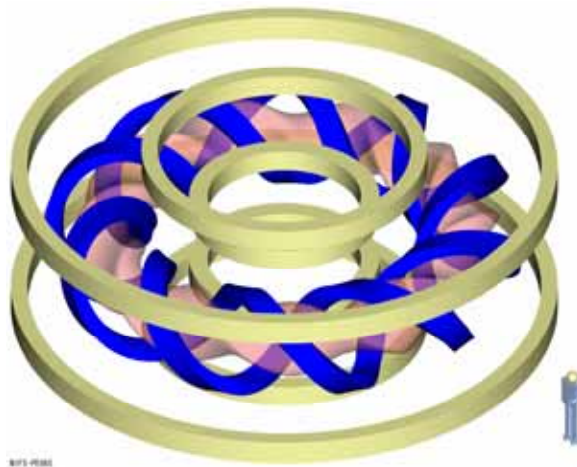


図 2.2-5 LHD の超伝導コイル。



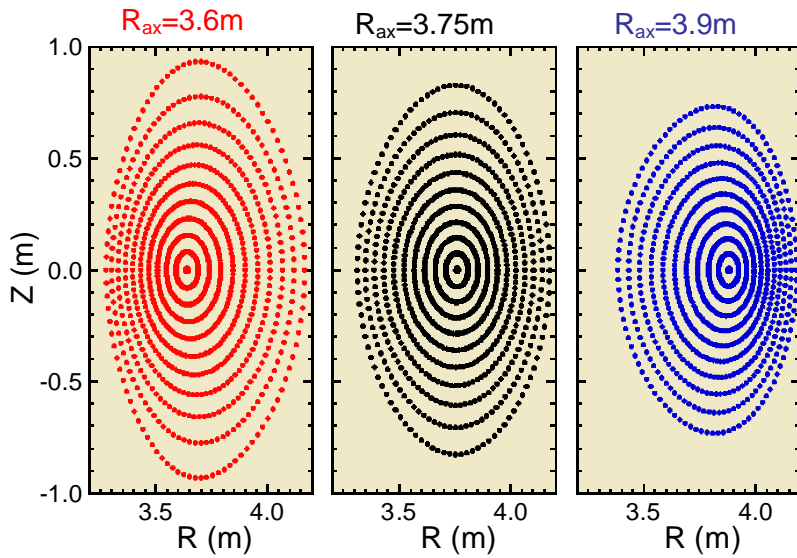


図 2.2-6 LHD の磁気面構造例。内側と外側にヘリカルコイルがくる、いわゆる縦長断面位置での磁気面。

LHD は図 2.2-5 に示すように1対のヘリカルコイルに加えて上下3対のポロイダルコイルを有している。これによって、垂直磁場、四重極磁場、漏れ磁場の3つを制御することができ、磁気面の水平方向位置(磁気軸の位置と言い換えることもできる)と磁気面の楕円度など、磁場の幾何学構造を多様に变化させることができる(図 2.2-6 参照)。

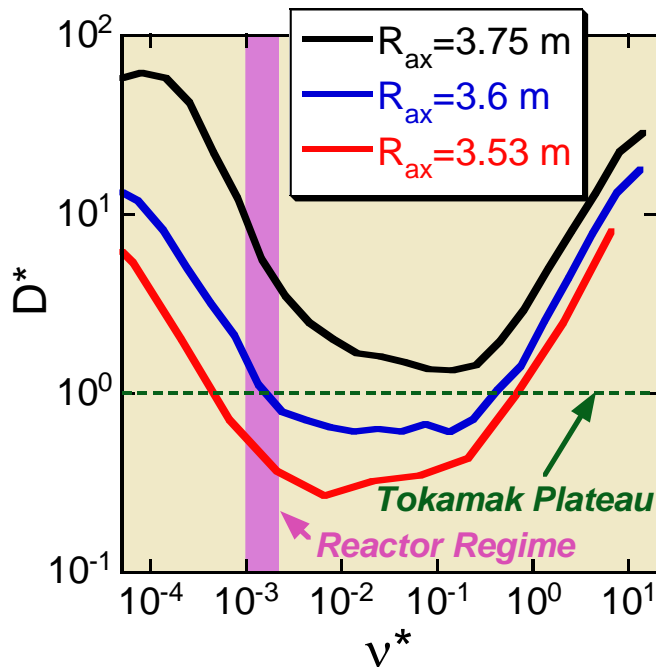


図 2.2-7 LHD における新古典拡散による熱輸送係数の衝突頻度依存性の評価

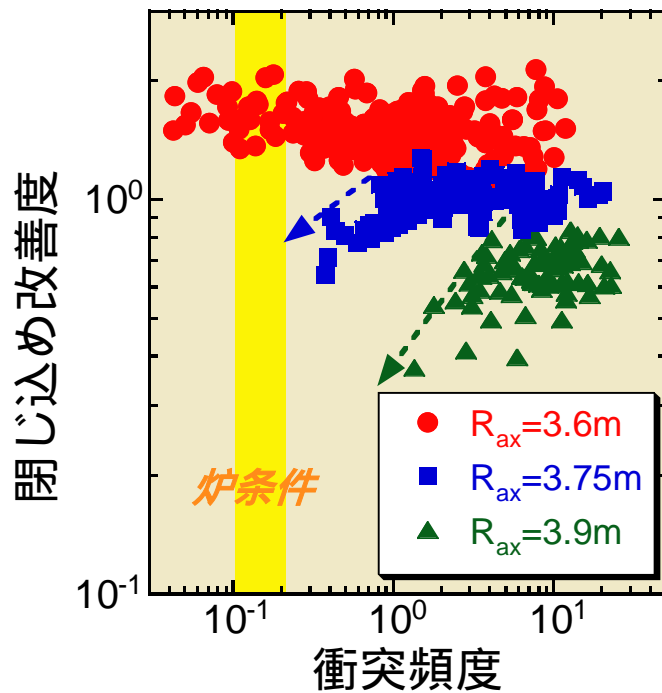


図 2.2-8 磁気軸位置を変えた3ケースについて実験で得られたエネルギー閉じ込め時間の衝突頻度依存性

ヘリカル系の閉じ込めを調べるに当たっては新古典拡散の性質を考えることが出発点となる。プラズマが高温になり、無衝突領域に入るとヘリカルリップルによる輸送の増大が予測されるためである。3次元の複雑な磁場配位においてもこの新古典拡散輸送を精度良く評価することができる数値計算コードが開発された。図 2.2-7 に GNET コード(京都大学、村上定義氏による)で評価した LHD における新古典拡散による熱輸送係数を示す。この図に示されているように無衝突領域に入ると  $v^*$  に反比例して輸送係数が増大するが、磁気軸位置を内側に寄せることによって、格段に輸送係数を抑えることができることが分かる。炉条件に対応する無衝突領域においても同じアスペクト比を持つトカマクのプラトー領域よりも低くすることさえ可能である。

さて、実験において、磁気軸位置を変化させた3ケースについてのエネルギー閉じ込め時間を衝突頻度に対して表示したものが図 2.2-8 である。エネルギー閉じ込め時間は ISS95 則の予想で規格化したもので、スケーリング則からの改善度を表す。これによると標準磁気軸位置 ( $R_{ax}=3.75m$ ) および外寄せ ( $R_{ax}=3.9m$ ) では衝突頻度が下がると閉じ込めが劣化することに対して、内寄せ ( $R_{ax}=3.6m$ ) では閉じ込めが炉条件より衝突頻度が下がっても劣化しないことが明らかとなった。これは新古典拡散に対する磁場配位の最適化によって新古典拡散を抑えることに成功したことを示している。この研究において、さらに重大な意味は衝突頻度の高い領域、すなわち、磁場リップルによる新古典拡散が輸送の本質を担わない領域においても、磁気軸位置による閉じ込め性能の差異が明確に見られることである。衝突頻度の高い領域では異常輸送が支配的であることから、異常輸送の磁場配位に対する依存性が発見された。

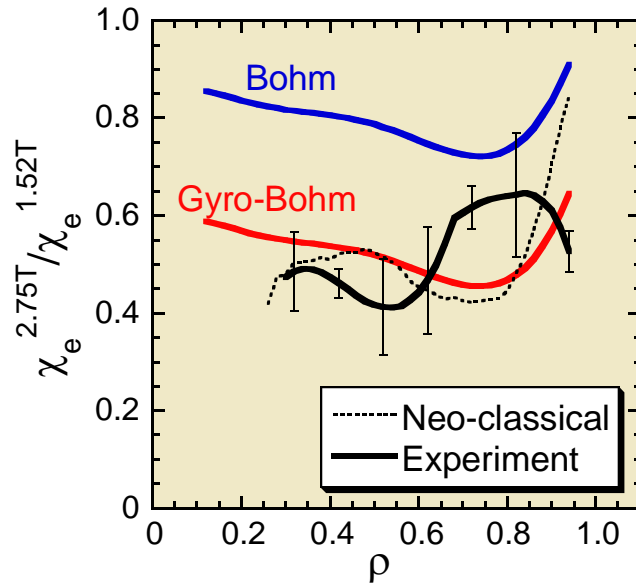


図 2.2-9 次元類似放電の熱輸送係数比の分布

エネルギー閉じ込めを決める熱輸送がどのような性質を持っているかについての研究も進められた。特に、炉条件への外挿という観点からは無次元量として最も飛躍の大きい規格化ジャイロ半径 $\rho^*$ に対する依存性が重要である。図2.2-9は磁場を変化させ、密度と加熱入力を調整することにより、 $v^*$ と $\beta$ が同じで $\rho^*$ のみが異なる放電を生成して、それらの輸送係数を比較したものである。磁場配位は良好な閉じ込めが観測された磁気軸位置  $R_{ax}=3.6m$  である。この比較によって、ジャイロ半径に依存しない Bohm 型よりも、ジャイロ半径に依存する Gyro-Bohm 型に近いことが分かった。この性質は巨視的なエネルギー閉じ込め時間のパラメータ依存性と矛盾しない。さらに付け加えて、新古典拡散からの予想と近いことが分かる。しかし、これは新古典拡散のジャイロ半径依存性が gyro-Bohm と類似することによるもので、熱輸送係数の絶対値の比較においては実験値が新古典拡散からの予想値より数倍大きい。したがって、異常輸送が支配的であると言える。ここにおいても新古典輸送を抑制することが、異常輸送の抑制と相関することが指摘された。

磁気軸位置の内寄せによる磁場配位の最適化により、新古典拡散を克服し、かつ異常輸送に対しても改善を示すことができた。この場合得られた実験値をトカマクの H モードプラズマと比較したものが図 2.2-10 である。横軸を  $IPB(y,2)$  則から  $q$  依存性を除いたものとして比較した。トカマクと LHD では回転変換分布 (あるいは等価プラズマ電流分布) が大きく異なり、トカマクのプラズマ電流と LHD の回転変換を直接比較することにあいまいさがあるためである。この図から分かるように、LHD のプラズマは  $q=4.5$  程度の安全係数を持つトカマク H モードと等価な閉じ込め性能を有している。図 2.2-3 にある核融合三重積で表した性能において大型トカマクに対して LHD は一桁劣っているが、大型トカマクにおける性能上限は負磁気シア-磁場配位による内部輸送障壁を伴ったいわゆる先進トカマク運転モードによって得られており、ITER の標準運転とされる ELMy H モードと比較すれば、LHD のデータはほぼ同じ位置に当たる。

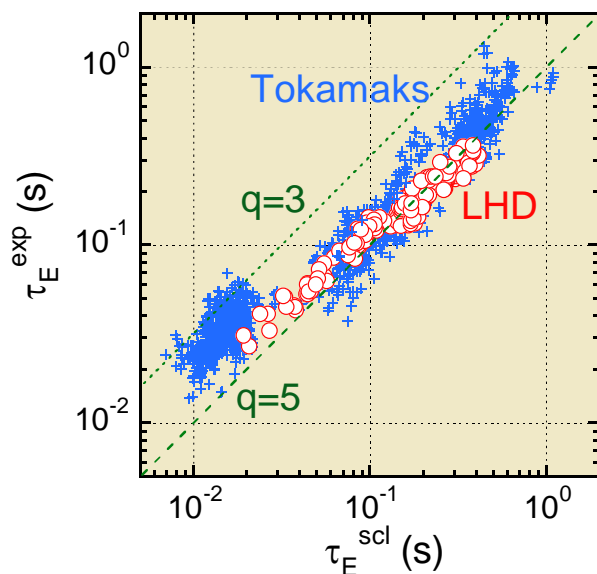


図 2.2-10 トカマク H モードと LHD 内寄せ配位でのエネルギー閉じ込め時間の H モードスケリング則との比較。但し、スケリング則から  $q$  依存性は排除してある。

LHD のデータを ISS95 則に照らして、中型装置実験と比較したものが図 2.2-11 である。後述するように、LHD では磁気軸位置のシフトによって明瞭な閉じ込め改善が見られる。図 2.2-11 にあるように、磁気軸位置 3.6m といういわゆる内寄せ磁場配位では、ISS95 則から体系的に 1.5 倍の改善度があることが明らかとなった。

磁気軸位置以外にも楕円度を 0.8 から 1.4 まで変化させた磁場配位においてデータベースが蓄積された。これまで取得された閉じ込めデータベースは国際協力によって国際ステラレータ閉じ込めデータベースとして整理のうえ、蓄積されている。LHD を含めた最近までのデータを取り込むことによって ISS95 則を見直した ISS04 則

$$\tau_E^{ISS04} = f \times 0.134 \times a^{2.28} R^{0.64} \bar{n}_e^{0.54} P^{-0.61} B^{0.84} \iota_{2/3}^{0.41}$$

が提案された(図 2.2-12)。このスケリングの導出には、図 2.2-8 や図 2.2-11 に示された磁場配位による系統的な差異を定量化することが前提条件として必要であった。個々の実験において、ジャイロボーム的な輸送の性質が普遍的かつ系統的に観測される一方、これらのスケリング則にある物理量では表現できない磁場配位への依存性の存在が明らかとなったからである。

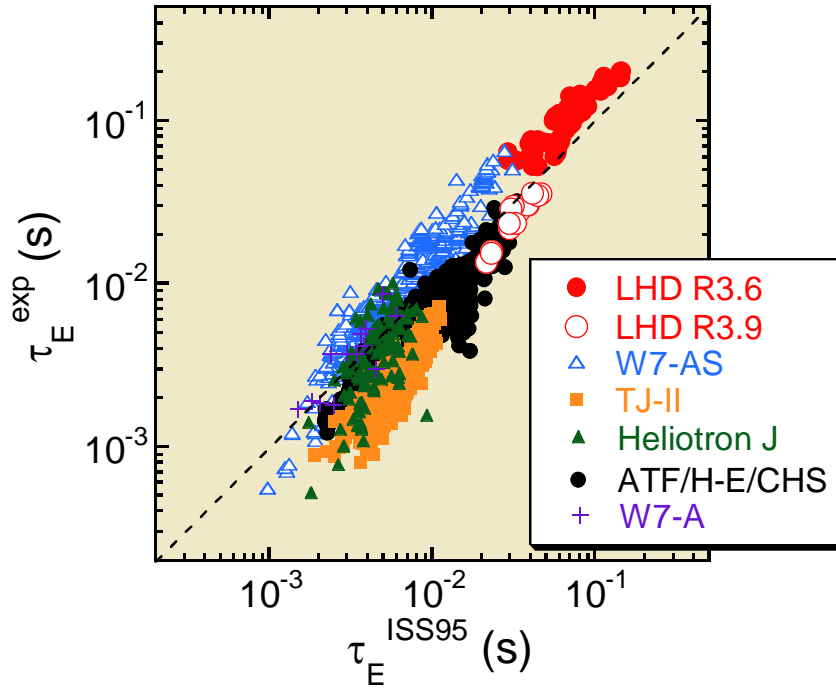


図 2.2-11 ISS95 から予測されるエネルギー閉じ込め時間と実験値の比較

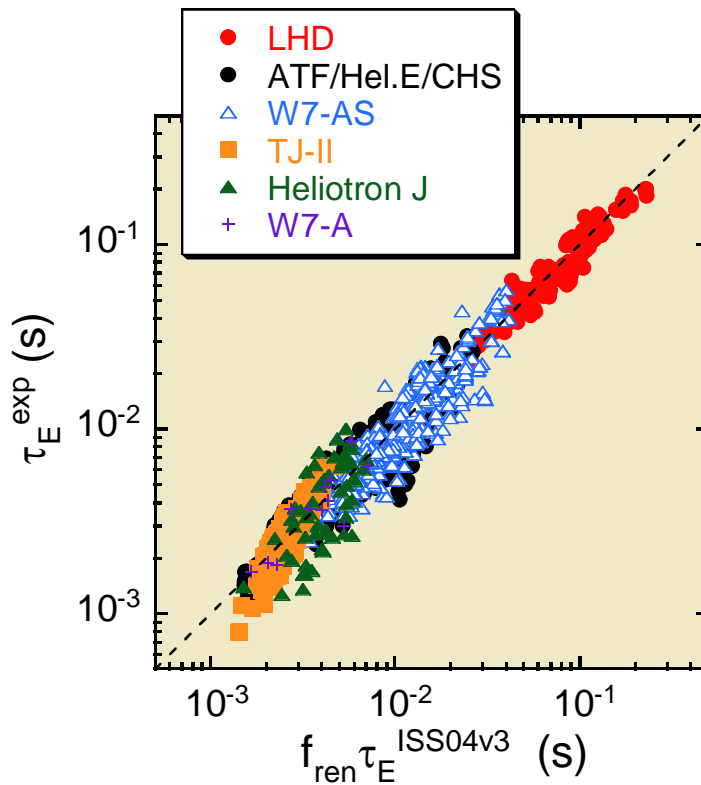


図 2.2-12 ISS04 則から予測されるエネルギー閉じ込め時間と実験値の比較

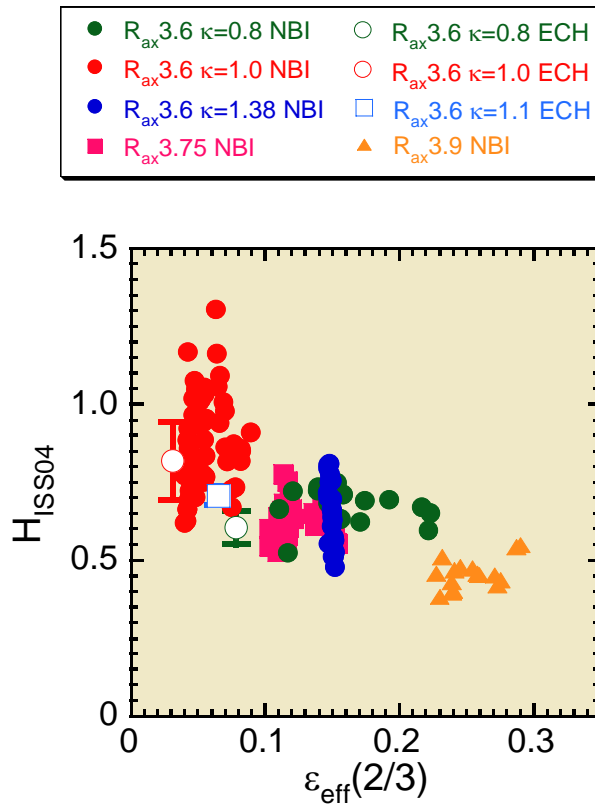


図 2.2-13 LHD における ISS04 からのエネルギー閉じ込め時間改善度の  
実効ヘリカルリップル依存性

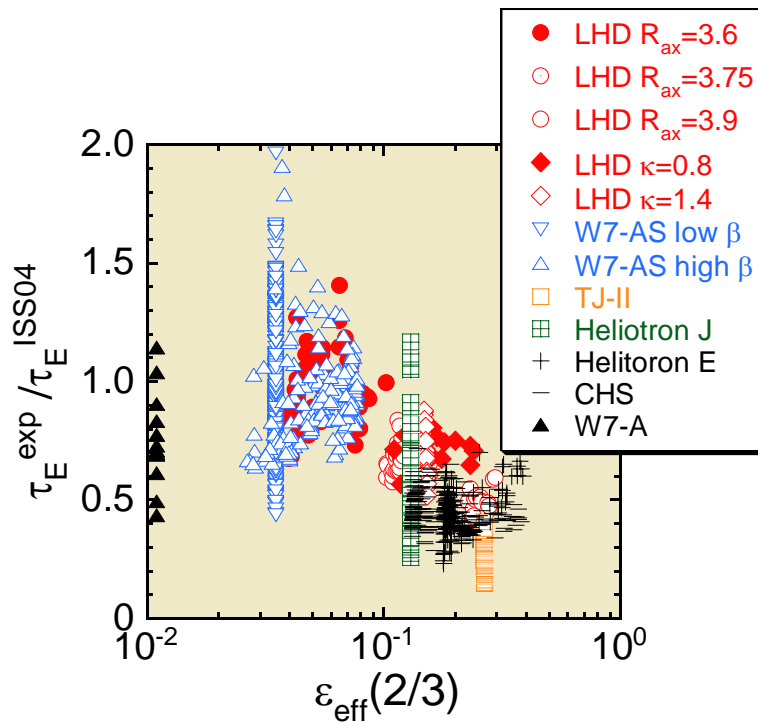


図 2.2-14 ISS04 からのエネルギー閉じ込め時間改善度の実効ヘリカルリ  
ップル依存性

この磁場配位依存性を表す物理量は未だ同定されていないが、磁場配位による差異が実効ヘリカルリップル $\varepsilon_{\text{eff}}$ と良く相関していることが示された。図 2.2-13 が LHD のデータについてであり、ほぼ $\varepsilon_{\text{eff}}$  の-0.4 乗の依存性が見られる。さらに図 2.2-14 は国際ステラレータデータベースに登録された多様なヘリカル系実験と比較したものである。データのばらつきはあるがその上限の包絡線は明確な $\varepsilon_{\text{eff}}$  依存性を示している。

ここで、注意すべきことは、中型装置においては衝突頻度の高いデータが多いこと、LHD では磁気軸内寄せによって新古典輸送は克服されていることから、ヘリカル系の閉じ込めは新古典拡散ではなく、異常輸送が支配的であることである。そして、注目すべきことは、新古典拡散自体による輸送が本質的でないにも関わらず、エネルギー閉じ込めおよび熱輸送が実効ヘリカルリップルの大きさと相関していることである。これは実効ヘリカルリップルの低減が異常輸送の抑制に関連していることを示唆している。この相関は、偶然の符合ではなく、その物理機構をつなぐものがあるという作業仮説に基づき、流れによる異常輸送の低減などの検討を進めている。これによって、磁場のリップル構造が環状プラズマの閉じ込めに与える影響を普遍的に定式化し、ヘリカル系の閉じ込め最適化の指導原理を確立できる可能性がある。



図 2.2-15 摂動磁場コイル(ローカルアイランドダイバータコイル)

### 2.2.3 高密度および閉じ込め改善

ローカルアイランドダイバータ(LID: Local Island Divertor)は強力な周辺粒子排気等、物理設計で期待された基本性能を有し、周辺プラズマ制御に有用であることが示された。この結果をもとに、LIDによる閉じ込め改善を達成すべく実験を行ってきた。図 2.2-15 に示すように、LHD は閉じ込め磁場を形成する超伝導コイルの他に上下10対の常伝導の摂動磁場コイル(ローカルアイランドダイバータコイル)を有している。これによって周辺部での  $m=1/n=1$  共鳴面を活かし、図 2.2-16 に示すような磁気島を発生させることができる。この磁気島内に



図 2.2-17 に示すダイバータヘッドを挿入し、粒子束を磁気島のセパトリックスを利用してダイバータヘッド裏面へ導くことができる。ダイバータヘッドは図 2.2-18 に示すように排気ダクト (baffle) に囲われており、ダイバータヘッド裏面でリサイクルした中性粒子は主プラズマへ戻りにくく、排気チャンバへ流れ込む。排気チャンバにはクライオポンプが設置され、排気速度は約  $200\text{m}^3/\text{s}$  であり、 $20\text{Pam}^3/\text{s}$  以上の排気粒子束が得られている。

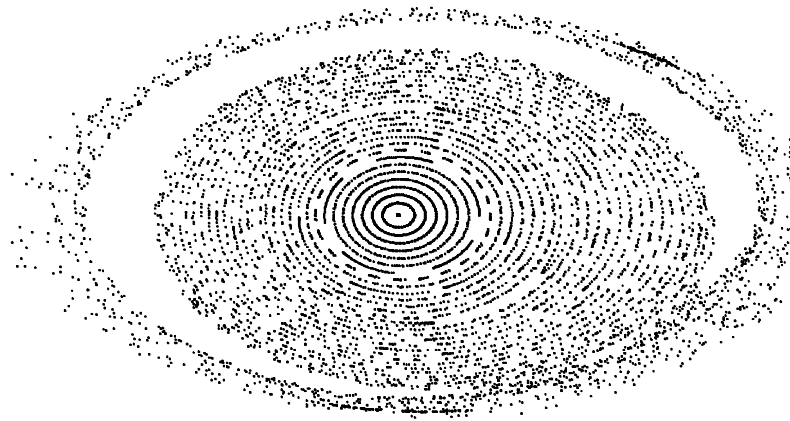


図 2.2-16 ローカルアイランドダイバータコイルによって生成される  $m/n=1/1$  磁気島

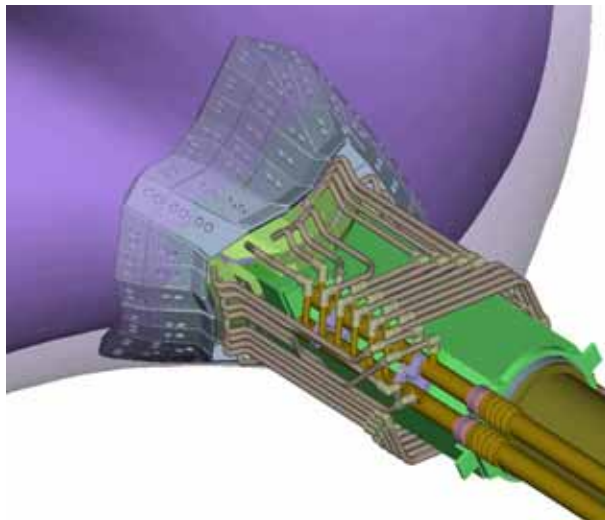


図 2.2-17 ローカルアイランドダイバータヘッドの磁気島への挿入



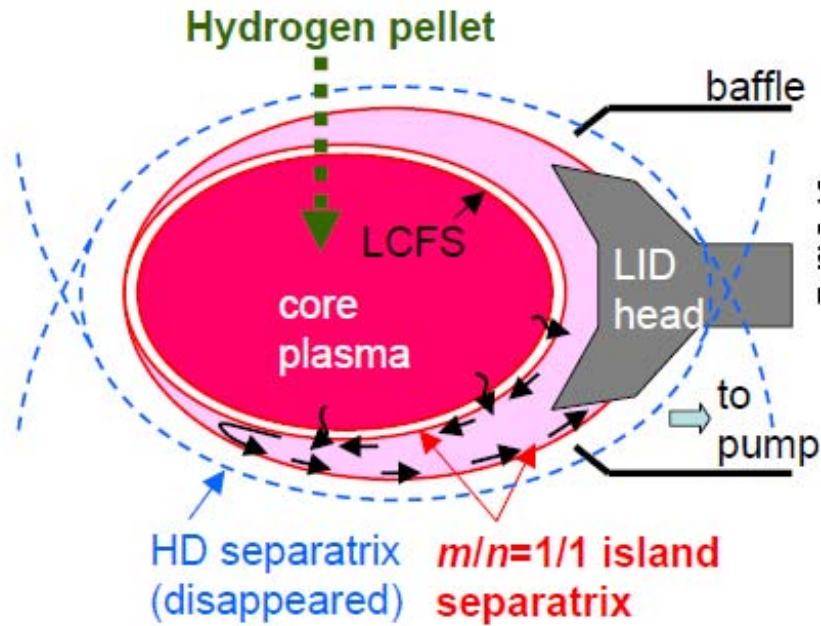


図 2.2-18 ローカルアイランドダイバータ運転の概念図

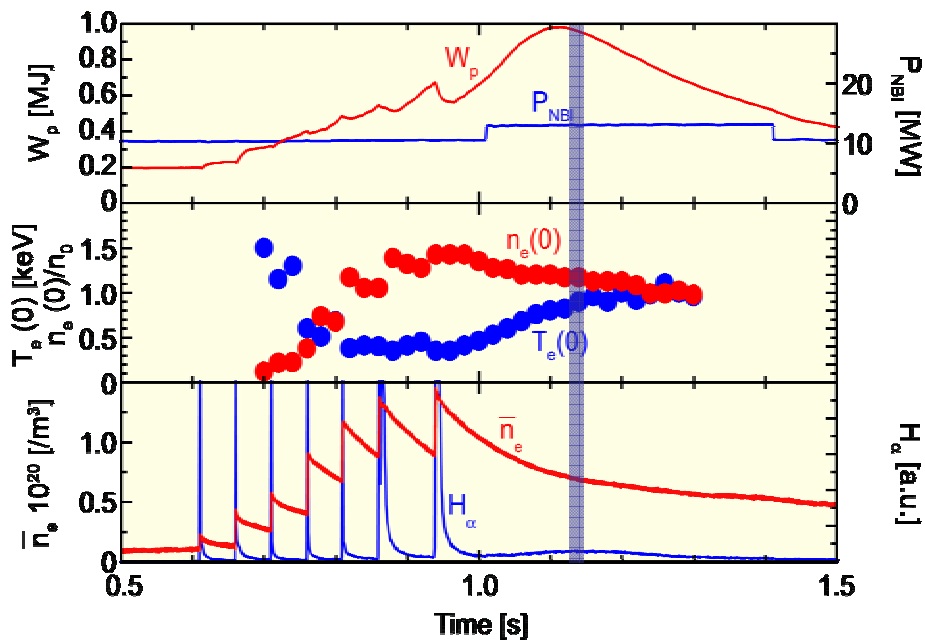


図 2.2-19 内部拡散障壁(IDB)の形成を伴う典型的な放電波形

LID 配位では、その良好な粒子制御性により、リサイクリング率の極めて低い状況を実現することが可能である。図 2.2-18 に示すように、この状態において固体水素ペレット入射によってプラズマコアに直接燃料供給を行う(放電波形を図 2.2-19 に示す)と、図 2.2-20 に示すような急峻な密度勾配を伴った中心密度が  $5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  に達する高密度プラズマを得ることができた。このような密度勾配を持つプラズマは、粒子拡散が著しく抑制されており、内部拡散障壁(Internal Diffusion Barrier、IDB)と呼ばれている。

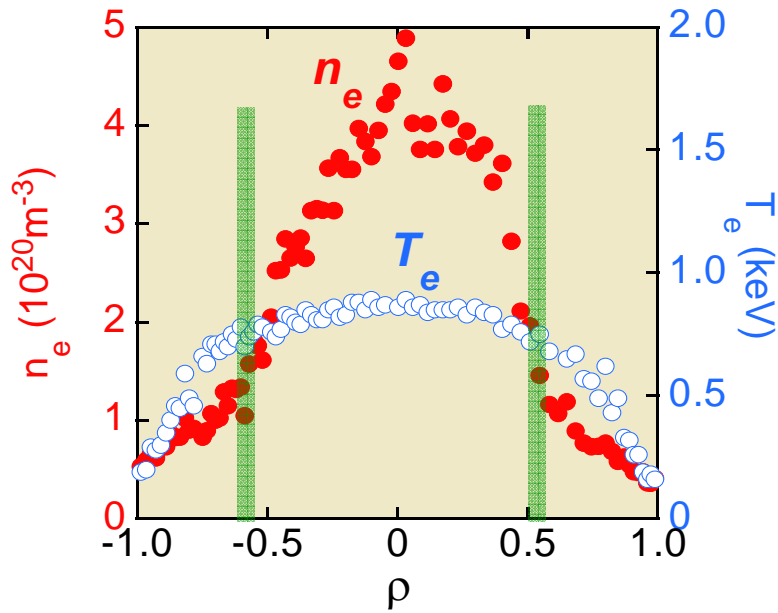


図 2.2-20 IDB(内部拡散障壁)プラズマの典型的な電子密度、電子温度分布

IDBを持つプラズマは運転領域が高密度側へ大きく拡大されており、ISS95 則で表現されるような密度依存性が保持されている(図 2.2-21)。さらにこの IDB プラズマは巨視的なエネルギー閉じ込め時間においても優れた性能を示している(図 2.2-22)。これらによって、核融合三重積の最高値  $4.4 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{skeV}$  が達成された。高い中心密度の達成により、中心ベータ値は高い磁場(2.64T)にも関わらず 4.4%に達している。

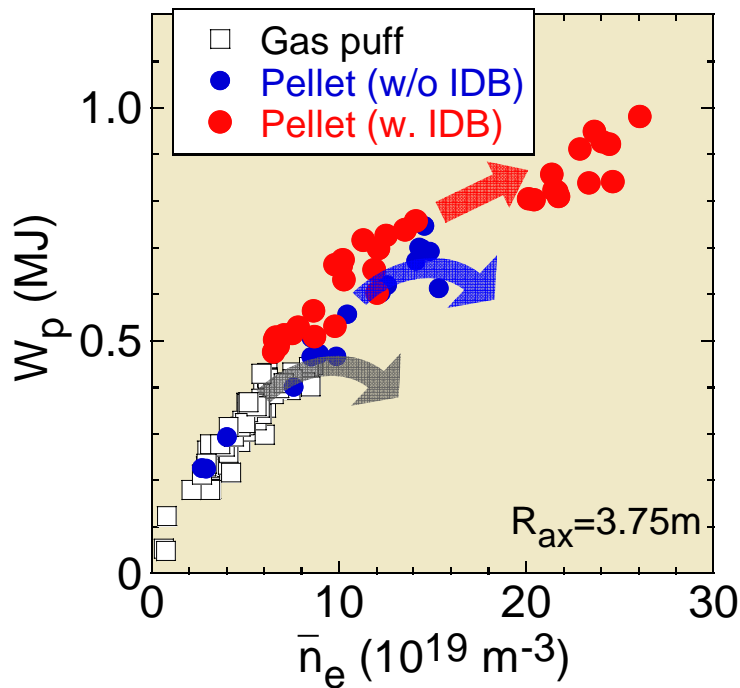


図 2.2-21 ガスパフ、ペレット入射、IDB プラズマの蓄積エネルギー ( $W_p$ ) の密度依存性

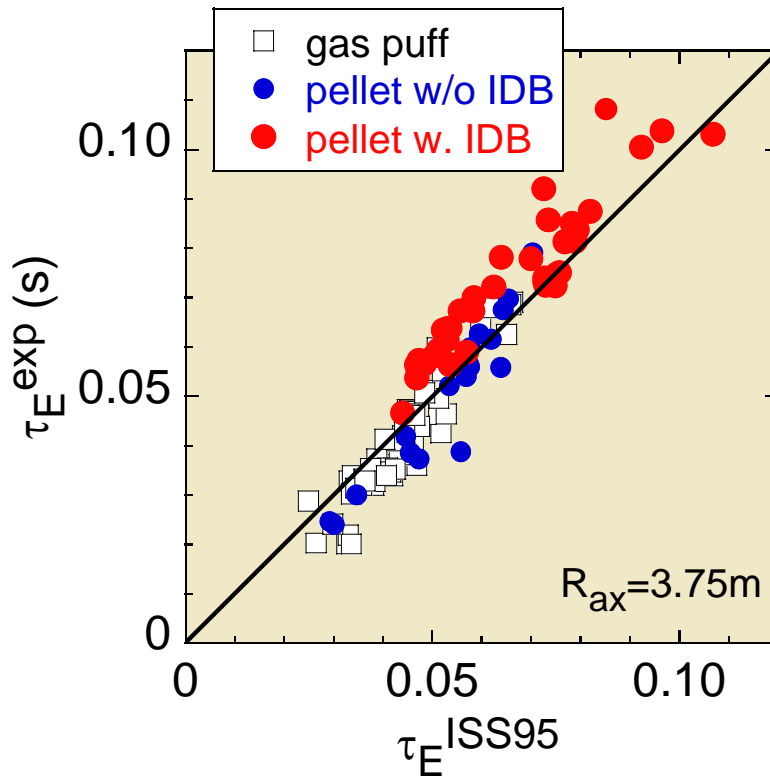


図 2.2-22 ガスパフ、ペレット入射、IDB プラズマのエネルギー閉じ込め時間の ISS95 則との比較

この IDB に伴って生成される超高密度プラズマは、これまでの比較的低密度なプラズマでの核融合炉設計に新しいシナリオを与える。トカマクでは高密度でのディスラプションや閉じ込め劣化、および電流駆動の必要性から、このようなシナリオを取れない。高密度運転はエロージョンなどの工学的要請を劇的に軽減でき、衝突頻度もプラトー領域となるため、ヘリカル系特有の新古典拡散の懸念もなくなる。ヘリカル系はこれまでも密度限界が高いなど、高密度での運転に有利とされていたが、IDB の発見はこの特長をさらに伸長させるものである。

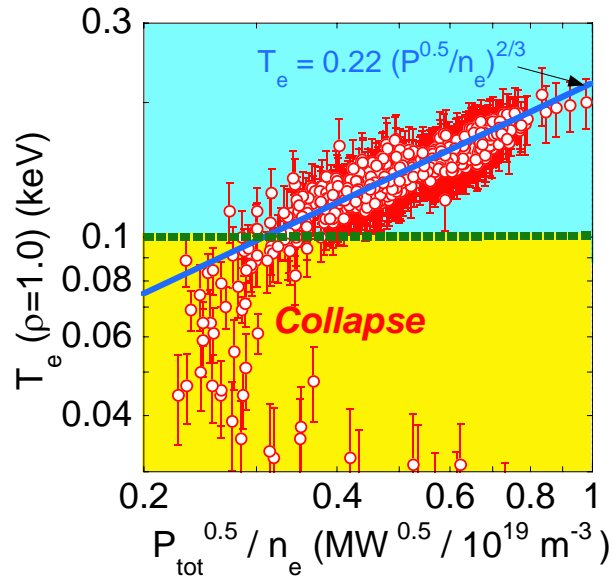


図 2.2-23 最外殻磁気面での電子温度の加熱パワーおよび周辺電子密度に関する依存性。

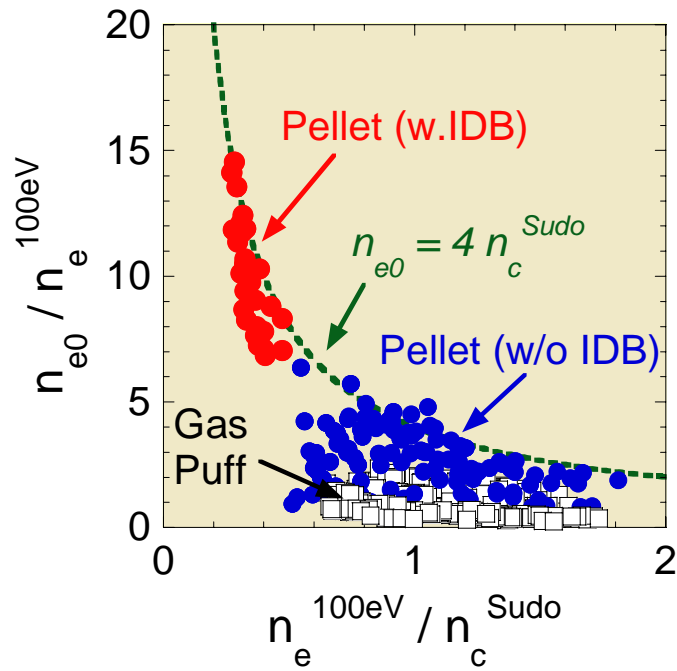


図 2.2-24 電子温度が 100eV となる周辺密度に注目した分布の尖塔化度と須藤密度限界で規格化した運転範囲。

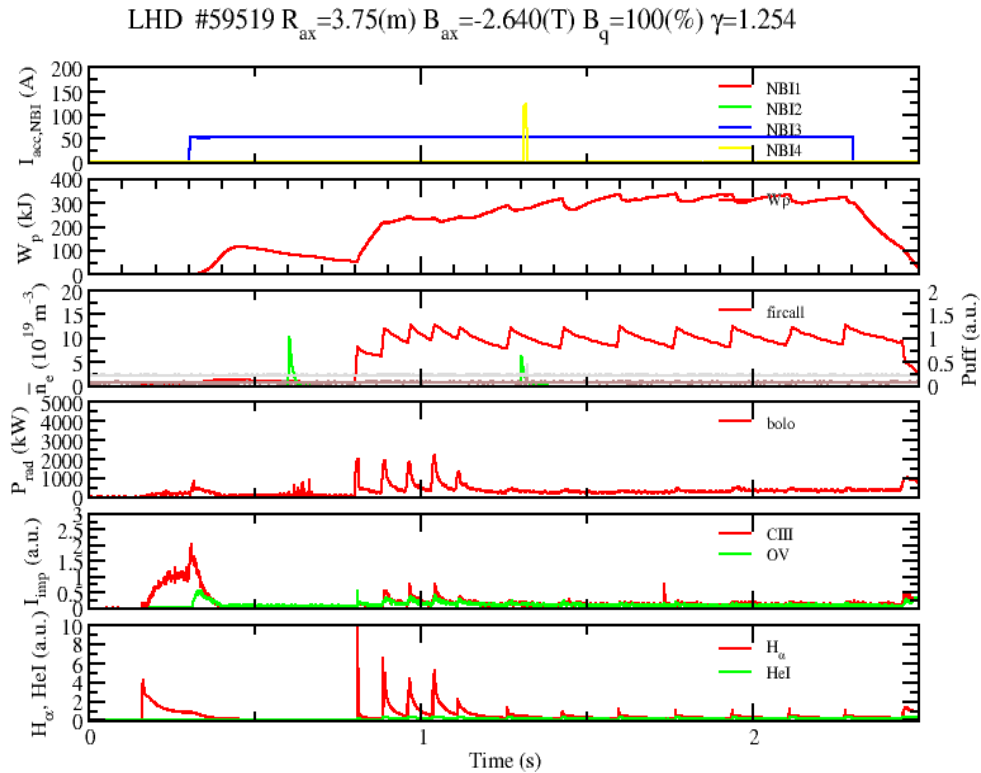


図 2.2-25 連続ペレットによる IDB プラズマの維持。

密度限界については、後述するような多様な条件において、100eV まで電子温度が下がる場所での密度が重要であることが見出されている。図 2.2-23 に示すように、周辺部の温度は  $P^{0.5}/n_e$  でスケールすることができ、100eV を切った辺りから物性が変化し、急激に温度が下がり、放射崩壊に至る。IDB プラズマの運転領域を密度分布の尖塔度と須藤密度限界で規格化した密度で示したものが図 2.2-24 である。このように、IDB プラズマでは密度分布が大きく尖塔化しており、その中心密度が須藤密度限界の4倍に達しているが、周辺部の密度は低く抑えられているため、通常のプラズマに比して密度限界に対してまだ余裕があると言える。

IDB の維持には固体水素ペレットによる中心補給が欠かせないが、図 2.2-25 に示す通り、連続ペレット入射によって準静的に IDB 状態を維持することに成功している。

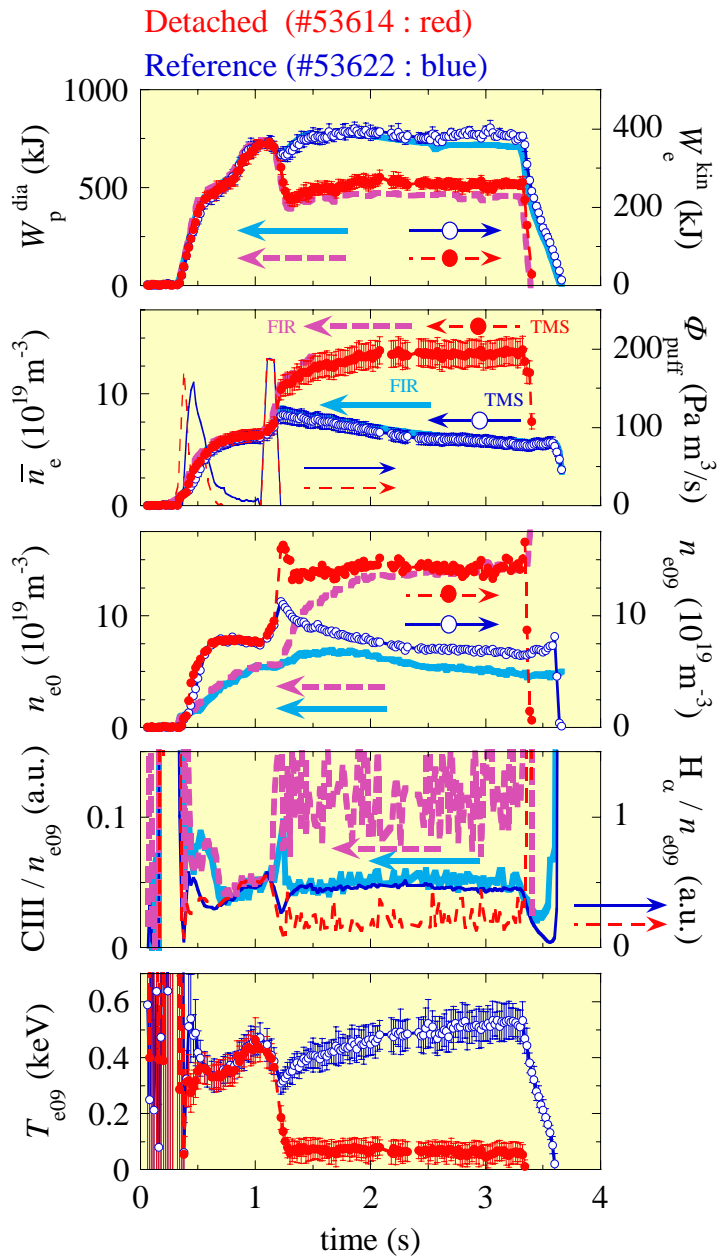


図 2.2-26 準静的なデタッチ放電の波形(赤線)。青線はデタッチを生じなかった参照放電波形。

この IDB に代表されるように、LHD では既に平均プラズマ密度で  $3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  を越える高密度プラズマが得られている一方、真空容器の高磁場側に取り付けた大流量のガスパフによる周辺プラズマの冷却条件を探り、プラズマがダイバータから離れたいわゆる「デタッチ」状態を準静的に維持できる条件を見出した。典型的な放電例を図 2.2-26 に示す。デタッチした放電(#53614、赤色)とデタッチしなかった放電(#53622、青色)を重ねて示している。ガスパフの密度フィードバックにより、 $t = 1$  秒までに  $\sim 6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  とした後、1 秒からの大流量ガスパフ(約  $190 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )によりデタッチさせている。この場合は両放電とも同じ大流量ガスパフであるが、フィードバック時の密度が若干低い #53622 ではデタッチしていない。#53614 で、

デタッチは  $t = 1.3$  秒までに完了しており、その後は加熱 NBI が停止するまで ( $t = 3.3$  秒) ガスパフ無しでデタッチを維持している。デタッチしているかどうかはダイバータ上のイオン飽和電流  $I_{sat}$  をモニターすることで判別するが、これは  $H\alpha$  信号とほぼ同じ振舞いをしているため、図には示していない。大流量ガスパフによって、まず  $\rho=0.9$  における周辺密度  $ne_{09}$  が増大し(ホロー分布)、その後数百 ms の時定数で中心密度も増大して ( $t = 1.3 \sim 2$  秒)、最終的にはフラットな密度分布が形成される。デタッチ中 ( $t = 1.3 \sim 3.3$  秒)、 $\rho=0.9$  における周辺部の密度と温度 ( $ne_{09}$  及び  $Te_{09}$ ) は定常的に保持されている。デタッチ時の  $H\alpha$  信号は、アタッチ時と比較して半分以下に減少しており、この時イオン飽和電流  $I_{sat}$  は数分の 1 以下になっている。また、周辺部が低温であることを反映して CIII の発光強度も大きい。デタッチ時の蓄積エネルギーは、アタッチ時と比較して低い。デタッチ時の蓄積エネルギー低下の第一要因として挙げられるのは、電子圧力分布がデタッチ時に縮んでいるということである。アタッチ時 (1.0 s 及び 1.2 s) の電子温度分布は、 $\rho = 1$  まで広がっているのに対し、デタッチ時 (1.5 s 及び 3.0 s) の電子温度分布は  $\rho = 0.9$  程度までしか広がっていない。この位置における回転変換は 1 であり、縮んだプラズマ柱の半径が有理面と関係して離散的に決まる可能性を示唆している。デタッチプラズマのエネルギー閉じ込めを改善し、高蓄積エネルギーと高密度を同時に、かつ安定に維持することが今後の課題であると同時に、これらのプラズマは過渡的に捉えられてきた放射崩壊の過程を調べる新たな実験対象として期待される。

#### 2.2.4 高ベータ領域の拡大および MHD 特性

LHD においてベータ値は確実に進展し、平成 18 年度の実験までに体積平均ベータ値は 5.0% に達した。この間の推移を図 2.2-27 に示す。

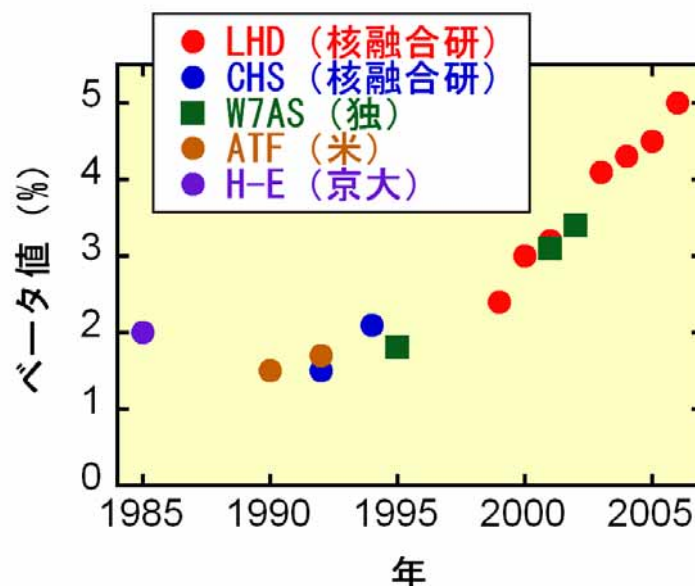


図 2.2-27 ヘリカル系装置実験における達成ベータ値の推移。

LHD の高ベータ実験において最も顕著な発見は磁気丘における MHD の安定性が交換型線形安定性理論を越えたところでも確保できることを示したことである。磁気軸を内寄せに

すると前述したように新古典輸送と異常輸送がともに抑制され、優れた閉じ込め特性を得ることができるが、この配位では磁気丘が強調され、MHD 安定性が破れることが懸念された。理想線形 MHD 理論は理論としての完成度が高く、また、トカマクの運転領域を予測することに実際、非常に高い精度を示していた。これに対して、LHD の無電流プラズマでは図 2.2-28 に示すように、メルシェ条件が破れたところでもプラズマは崩壊することなく、その不安定領域を通過して圧力を高めていくことができた。これは、線形 MHD 理論モデル自体の飛躍と非線形飽和の検討を強く喚起するものである。この発見によって、良好な閉じ込め状態と MHD 安定性を両立することができ、5.0%に象徴される高ベータプラズマが得られた。

さらに、コア部は高ベータによるシャフラノフシフトが磁気井戸を自発的に作り、これによって、交換型不安定性に対して安定な状態(第2安定領域)を実現した。図 2.2-28 に、この機構によってコア部に共鳴を持つ  $m/n=2/1$  モードが完全に抑制されることが示されている。

磁気軸の内寄せに加えて、プラズマの高 化を目指すには、MHD、輸送特性及び加熱吸収特性に対する磁場配位の最適化が重要となった。LHDにおける磁場配位は、磁気軸位置、磁場強度、プラズマのアスペクト比等を制御することにより幅広く変化させることが可能であり、これまでの実験で得られた知見および理論的予測から高 プラズマ生成に最適な磁場配位を見出す必要があった。最適な磁気軸位置については、これまでの実験及び理論計算により(1)輸送特性(新古典輸送):  $R_{ax} = 3.53m$ (計算)、(2)加熱吸収効率:  $R_{ax} = 3.6m$  近傍、(3)MHD安定性:  $R_{ax} > 3.5m$ 、との知見が得られている。(3)については、 $R_{ax} = 3.5m$  配位において閉じ込めに影響を与えるコア領域のMHDモードが観測されており、磁気井戸形成による安定化が困難であると予測されるためである。 $R_{ax} = 3.6m$  では、コアMHDモードは高 領域で安定化されることを確認している。結果として  $R_{ax} = 3.6m$  近傍で、かつ磁気軸シフトを可能な限り抑制することがプラズマの高 化に望ましいことから、ヘリカルコイルのパラメータである  $\alpha$  値を下げる(アスペクト比を上げる)ことにより自発的なシフトを制御することとした。ここで、 $\alpha$  は  $M/n \cdot a_c/R$  で定義されるヘリカルコイルのピッチパラメータであり、 $M$  と  $n$  はそれぞれコイルの周期数と極数(LHDは  $M/n=5$ )、 $a_c$  と  $R$  はそれぞれヘリカルコイルの小半径と大半径である。LHDは3層のヘリカルコイルを持つことから、その電流分布を制御することにより、実効的に小半径  $a_c$  を変えることができる。結果としてプラズマのアスペクト比を制御することが可能である。



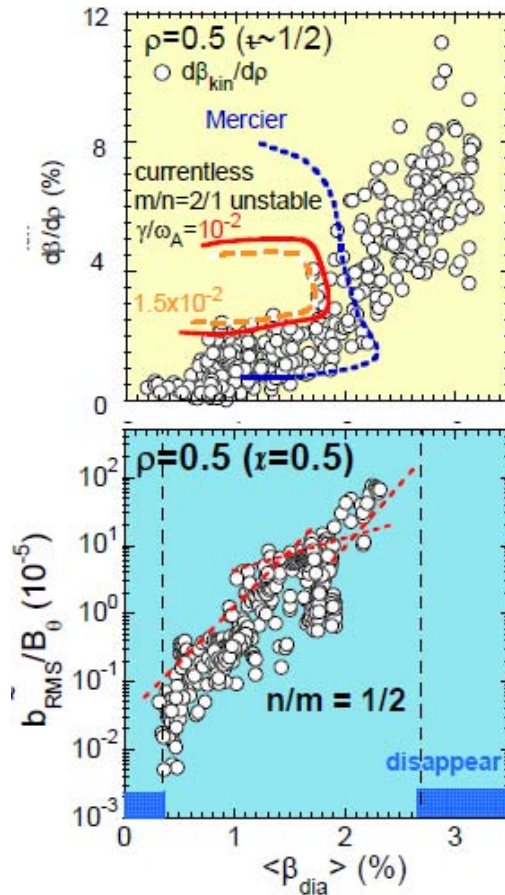


図 2.2-28  $\iota \sim 1/2$  にほぼ対応する  $\rho=0.5$  での圧力勾配および  $n/m=1/2$  モードの磁場揺動のベータ依存性。

図 2.2-29 に示すように、広範なアスペクト比  $A_p$  の比較を行い、 $A_p=6.6$  において、最大のベータ値が得られた。この時、図 2.2-30 に示されるように磁気軸のシフトが抑えられ、その結果として、図 2.2-31 に示されるように、ベータ値が上昇したときの加熱効率の劣化が抑えられている。アスペクト比がさらに大きくなるとベータ値は減少し始める。アスペクト比が大きくなるとシャフラノフシフトが抑制されて磁気井戸の生成が効率良く行われなるとともに、最も低次の共鳴を持つ  $m/n=1/1$  モードが磁気シアの弱い中心領域へ移動していく。結果として、このモードが大きく成長することにより、閉じ込めの劣化が発生する。

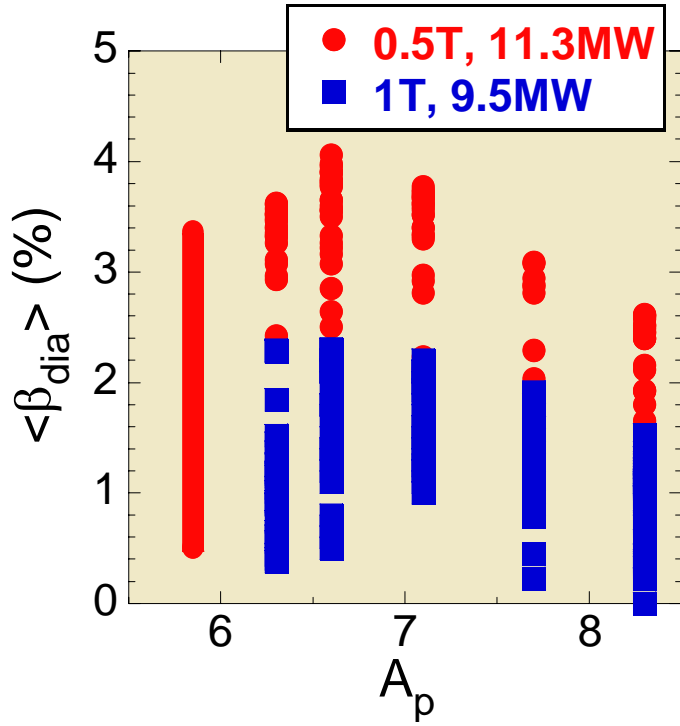


図 2.2-29 達成ベータ値のアスペクト比依存性。

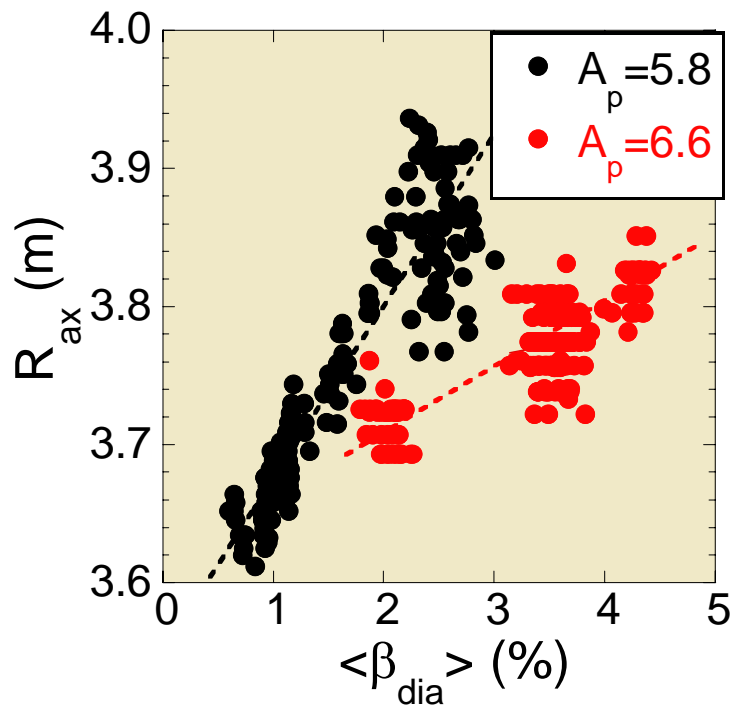


図 2.2-30 異なったアスペクト比での有限ベータ効果による磁気軸のシフト(シャフラーノフシフト)。

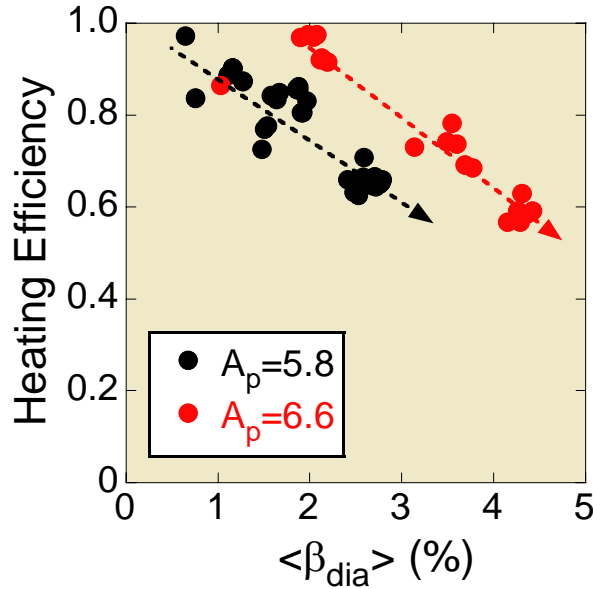


図 2.2-31 異なったアスペクト比での NBI 加熱効率のベータ値依存性。

図 2.2-32 に典型的な高ベータ放電を示す。4%を越えるベータ値がエネルギー閉じ込め時間の50倍以上維持されており、これは加熱パワーの維持時間によって制限されている。 $m/n=1/1$ より内側の共鳴を持つモードは安定化されており、観測される磁場揺動はプラズマ端部に共鳴するものに限られている。これらの領域では強い磁気シアによって理想モードは安定であり、観測されている揺動は抵抗性モードであると判断される。

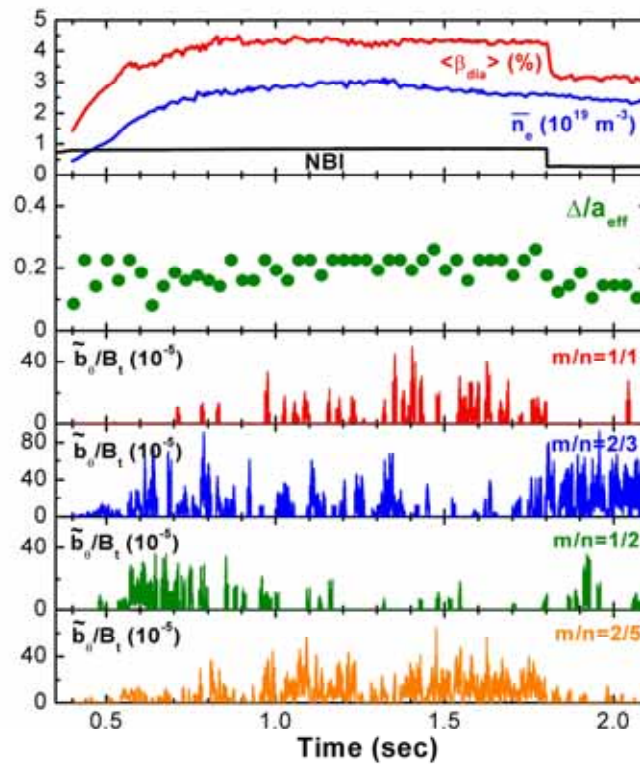


図 2.2-32 ベータ値が4%を越える典型的な放電波形

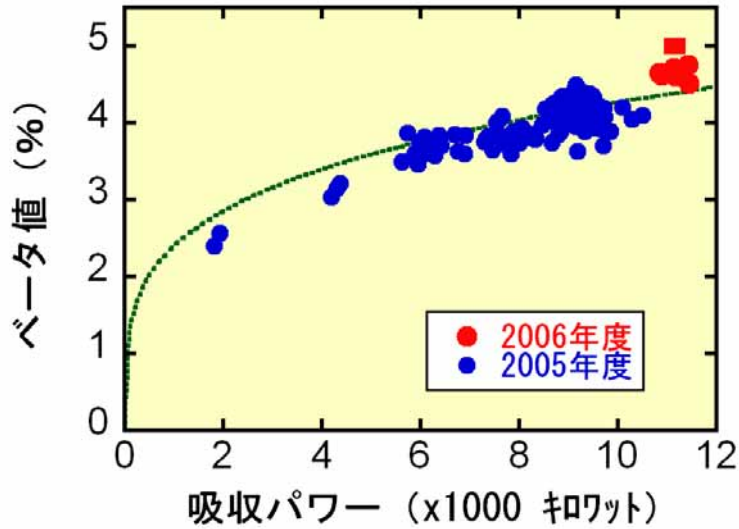


図 2.2-33 達成ベータ値の NBI 加熱パワー依存性

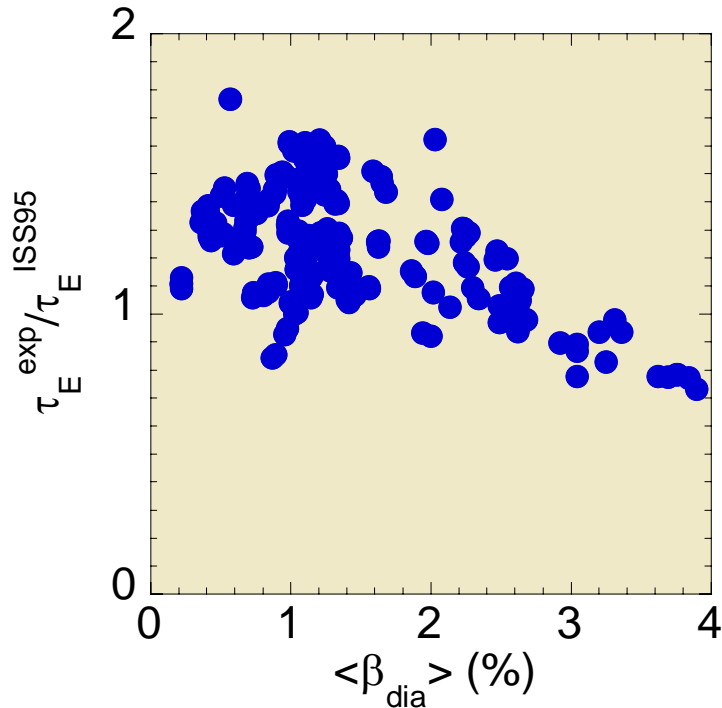


図 2.2-34 エネルギー閉じ込め時間の改善度のベータ値依存性

ベータ値は図 2.2-33 に示されるように、加熱パワーの増加によって上昇しているが、高ベータ領域では加熱パワーの0.25乗程度とスケーリング則から期待される0.4乗程度からの劣化が見られる。実際、エネルギー閉じ込め時間は図 2.2-34 に示されるように、スケーリング則に比して緩やかに劣化している。この劣化の原因として、一つは図 2.2-35 に示されるように、シャフラノフシフトがもたらす実効ヘリカルリップルの増大が考えられる。異常輸送が実効ヘリカルリップルと相関のあることは前述したとおりである。ベータ値の上昇は与えられた加熱パワーに対して密度の上昇によって得られているが、この高密度に伴う閉じ込めの劣

化が二つ目の原因に考えられる。前者はベータ値上昇に合わせた垂直磁場の制御により磁気軸を戻すことによって、改善されることが予想され、近い将来に実施する電源増強後の実験が期待される。

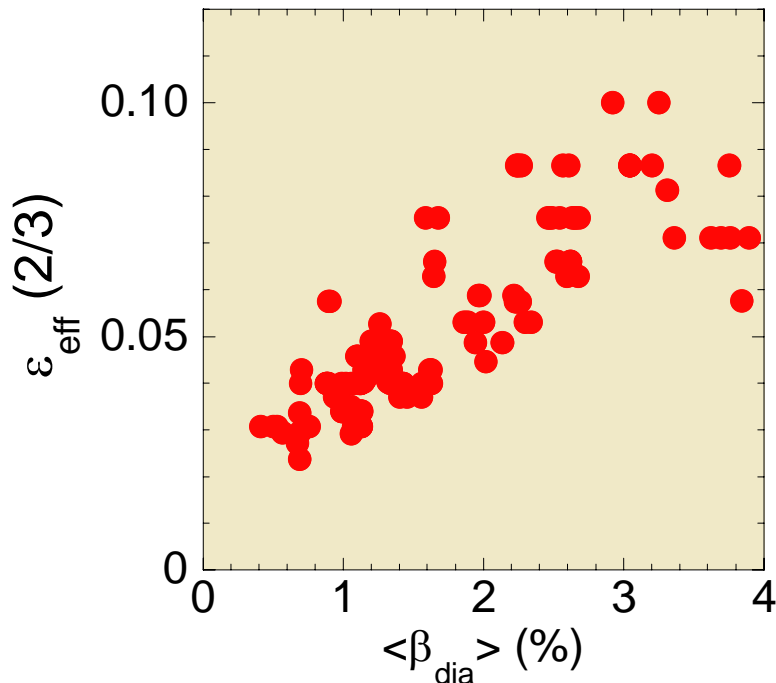


図 2.2-35 実効ヘリカルリップル( $\rho=2/3$  で評価)のベータ値依存性。

MHD に関わる物理実験課題は多岐にわたっているが、大きくまとめると、(1)配位の閉じ込め性能への影響、(2)MHD 不安定性の閉じ込めへの影響、(3)MHD 平衡同定法の探求、(4)トロイダル電流の特性評価に分けられる。

(2)では回転変換を上げる方向(順方向)のトロイダル電流が大きくなった場合に  $m/n=1/1$ 、 $2/2$ の磁気揺動モードが発現し、 $m/n=1/1$ モードの磁気揺動がバースト状に増大し、電子温度の急激な減少が起こり、電子温度減少後、輸送のタイムスケールでプラズマエネルギーが回復していく様子が観測され、理論予測との比較検討を進めた。逆に回転変換を下げる方向に最大 1T あたり 100kA を超えるプラズマ電流を流す放電を行った。そして、低回転変換時に予測される大きなシャフラノフシフトに付随する深い磁気井戸と強い磁気シア配位の実現による高安定性と高閉じ込め領域の探索、トカマクと類似の電流ホールの安定性と閉じ込めに共通する物理機構の解明、 $\neq 0$  共鳴面に関連した磁気島形成の研究を行った。MHD 平衡の特定には回転変換分布の同定が重要であることから MSE による計測も行った。また、より電流分布を尖塔化させる試みとして ECCD も印加した。 $\neq(0) \sim 0$  が期待される  $-130\text{kA/T}$  を実現したが、大きな不安定性は観測されなかった。一方、周辺 MHD モードの安定化や周辺での輸送障壁、 $m/n=0/0$  揺動等が観測された。

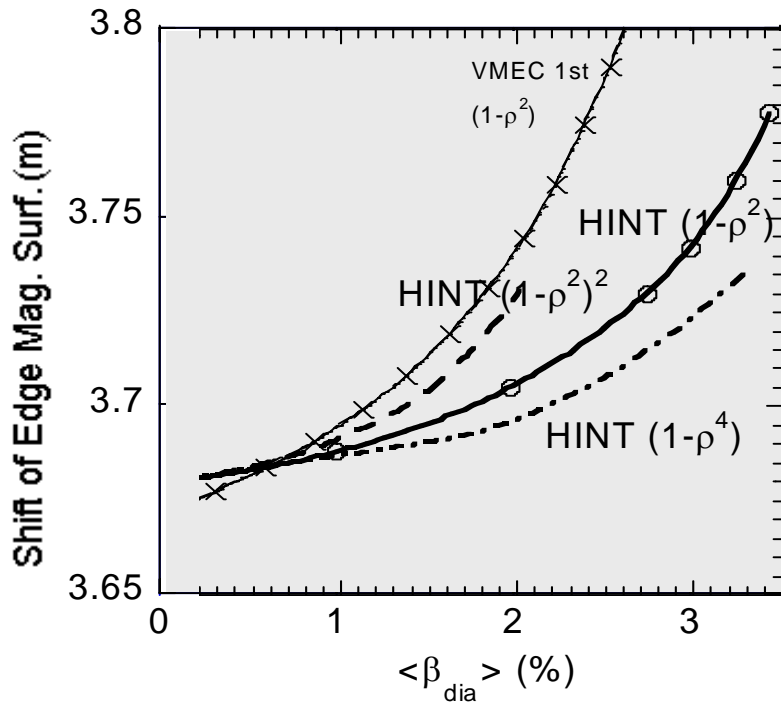


図 2.2-36 最外殻磁気面中心の有限ベータ効果によるシフト

(3)については、MHD 安定性解析と 1 次元輸送解析と基礎となる平衡配位の再構成の検討が進んだ。MHD 平衡は圧力分布、電流分布、境界条件が決まれば、一意に決定されることが知られているが、対称性のない 3 次元の磁場配位では数学的な意味での厳密な磁気面の存在が保証されておらず、MHD 平衡解を得るにはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の何らかのモデルを仮定する必要がある。特に LHD では周辺部のエルゴディック層の役割や磁気島の発生やヒーリングもあって境界条件の設定が難しい。計測結果と矛盾のない有限ベータでの周辺磁気面シフトの理論モデルの構築を目的とし、分布計測、平衡計測データと理論予測の比較を行っている。図 2.2-36 は  $R_{ax}=3.6\text{m}$ 、 $B_q=100\%$ 、 $\gamma=1.254$  配位における電子温度分布から評価した周辺磁気面のシャフラノフシフトと理論予測(VMEC、HINT)の比較結果である。入れ子状の磁気面をアприオリに仮定することが必要な VMEC コードとその仮定を必要としない HINT コードで理論予測値に違いがあるが、これはプラズマ境界の決め方や磁気面の存在の有無等の仮定が異なっているためと考えられる。現在のところ HINT コード予測の方が実験結果との矛盾が少ないが、これらを確認するために圧力分布や電流の効果も含めた平衡解析を行っている。また、圧力の非等方度のサドルループ測定による定量的評価に向けた検討が進んだ。MSE による磁力線ピッチ変換の測定から相対的な変化を評価することによって回転変換と結び付けられ議論できるようになってきた。例えば、上で述べた大きな  $Co$  方向のトロイダル電流による大きな MHD 不安定性が起る場合と起らない場合の回転変換の違いが示され、電子温度分布の平坦化の位置と MSE 計測による有理面の位置に整合性のあることが確認された。



### 2.2.5 定常実験

定常実験においては最終的に3MWの加熱入力によって1時間の運転を行うことが目標とされている。これは10GJの加熱入力の制御を意味し、核融合炉の点火の目安となる量に対応している。



図 2.2-37 真空容器内に設置されたICRF ループアンテナ

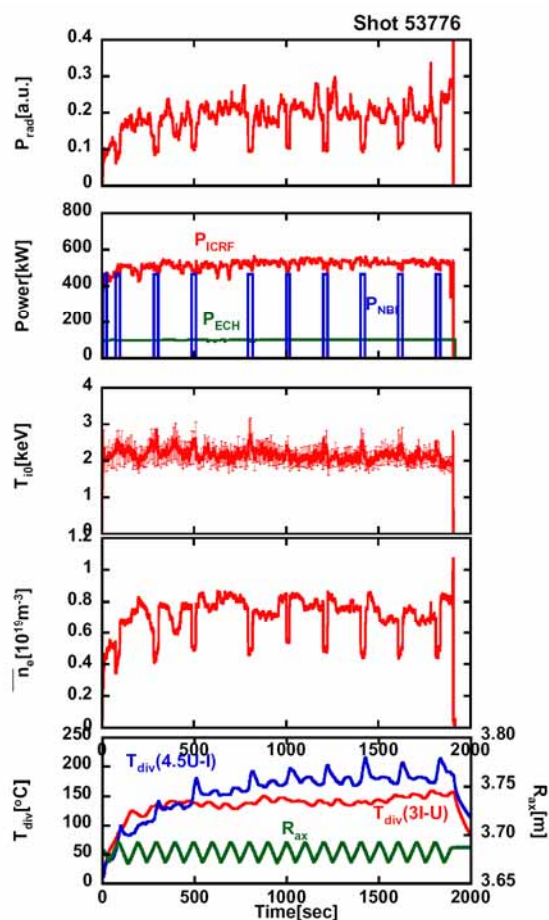


図 2.2-38 31分45秒の長時間放電波形

磁場配位の制御によってヘリオトロン磁場配位で課題とされた粒子損失を抑え、高エネルギー

ギー粒子の高い閉じ込め性能を達成したことを基盤とし、定常運転に適したプラズマを高周波で加熱するイオンサイクロロン加熱法による大電力定常加熱実験を重点的に行ってきた。結果として、真空容器内に設置されたアンテナ(図 2.2-37)からの高周波電磁波を主力として約 700 kW を入力することにより、プラズマの温度は 2keV 程度、密度は $(0.7-0.8)\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  の高温プラズマを 31 分 45 秒に亘り連続して保持することに成功した。放電波形を図 2.2-38 に示す。平均加熱パワーは 680kW で、ICRF(520kW)と ECH(100kW)を定常的に入射している。NBI は約 3 分間隔で 25 秒間の繰り返し入射を行った。中心イオン温度は 2keV 以上であり、電子温度は 1.5-2keV 程度に維持されている。電子密度はガスパフにより自動制御したパラメータであり、おおよそ  $0.7-0.8\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  に保たれている。時々 $0.5\times 10^{19}\text{m}^{-3}$  程度まで減少しているのは、NBI 加熱により入射パワーが増加し、自動制御の範囲を超えた環境変動により密度が減少したものである。

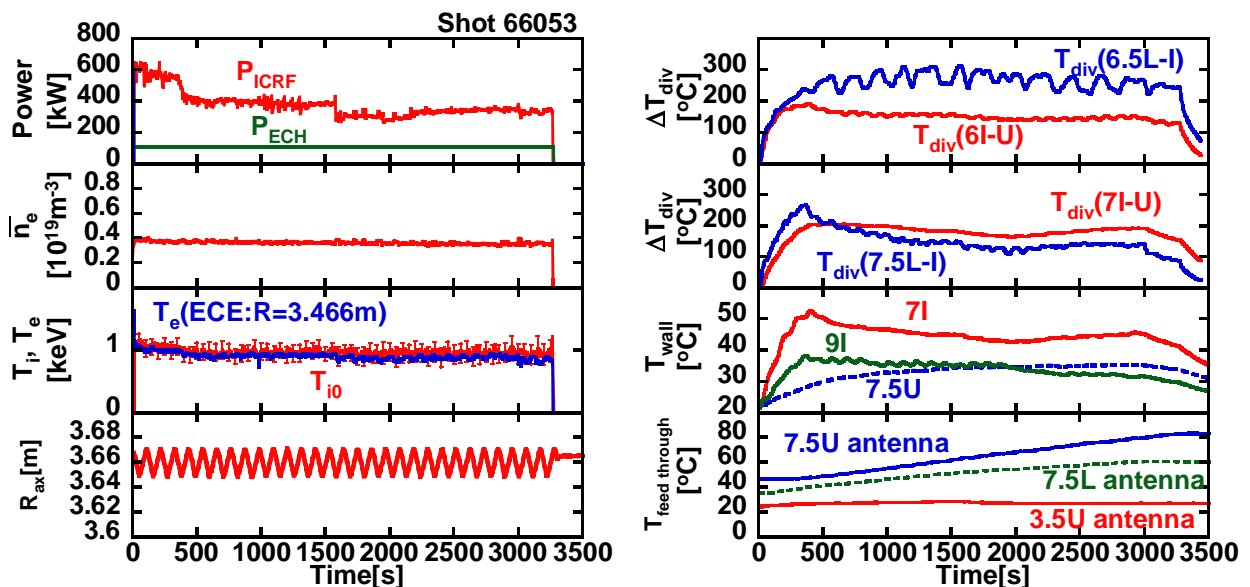


図 2.2-39 54分28秒の長時間放電波形。

この長時間運転には、閉じ込め磁場の最適化、ダイバータ機構の理解に加えて、プラズマと壁の相互作用における原子分子過程や固体表面に関わる物理研究から加熱や除熱に関わる工学研究に至る学術研究の積み重ねが活かされている。プラズマに入力したエネルギー値としては核融合研究にとって新しい領域となる 1.3GJ(13 億ジュール)を達成した。

この結果は以下の各種装置の改良や実験手法の開発により達成された。

- ・ 定常加熱機器の性能向上
  - ICRF 加熱の全般的性能向上
  - ECH の伝送路改良
  - NBI のイオン源改良による長パルス安定入射
- ・ ダイバータの除熱性能の改良
- ・ 磁気軸スイープによる熱流束の空間分散

さらに、加熱パワーを 490kW まで下げた状態で 54 分 28 秒の運転に成功し、入力エネルギーは 1.6GJ に達した。この時の放電波形を図 2.2-39 に示す。ECH 単独では加熱入力



110kW で 65 分の運転を達成している。

今後、最終目標を目指す予定である。以下にこれらの内容を述べる。

## 1) 加熱の性能向上について

定常実験では、ICRF 加熱、ECH 加熱、NBI 加熱を組み合わせる実験をおこなった。そのうち 8 割程度の入力エネルギー値を ICRF 加熱が担っており、これを主加熱装置として実験をおこなった。ECH 加熱は放電中に数回発生するダスト状固形物落下時のプラズマ維持の安定性を増すために効果があり、NBI はプラズマをトラス外側にスイングしたときの密度上昇抑制とヘリウムプラズマ中の水素イオン比の維持に効果的であった。ICRF 加熱はマイノリティイオン加熱モードで運転しており、ヘリウムプラズマ中の水素イオン密度の安定維持が必要である。

ICRF 加熱装置は第 7 サイクル(平成 15 年度)では、プラズマ実験をおこなわず、1 年間をかけてアンテナ、発振器、伝送路を含めた全ての機器の全面改修をおこなった。また高周波発振器は定常運転用の発振器を 2 台から 4 台に増強し、安定に安全に運転できるように整備をおこなった。同軸伝送路も内外導体共に水冷構造にして冷却能力を向上させた。これにより長時間運転による伝送路の熱伸びの影響を小さく抑えることが出来た。

ECH 加熱は定常運転用のジャイロトロン管の安定運転が可能になり、また真空排気型の導波管伝送路の冷却と排気系を改良したことにより、安定に定常 100kW レベルの入射が可能である。

NBI 加熱は 2 台のイオン源の冷却構造を長パルス仕様に変更したことにより、イオン源 1 台あたり 500kW/25 秒の入射が約 6 分間隔で安定におこなえるようになり、2 台のイオン源を交互に使用することにより、3 分間隔での入射が可能となった。

これらの加熱機器の性能向上と LHD 真空容器内の受熱板であるダイバータ板の温度上昇を抑えることに成功したことで、長時間プラズマ維持に成功した。

## 2) ダイバータ熱負荷の軽減について

第 6 サイクル(平成 14 年度)までの ICRF 加熱では標準磁場配位(磁気軸 3.6m)において 3 分以上の運転をおこなうとアンテナ近傍のトラス内側のダイバータ板が 300 以上に局所的に上昇し、ダイバータ板や壁からの脱ガスによると見られるプラズマ密度上昇がおり、放射崩壊して放電が終了していた。第 8 サイクル(平成 16 年度)からは、アンテナやダイバータ板の温度をモニターしながら、温度上昇を抑えるように運転をおこなった。トラス内側(図 2.2-38 の Tdiv(3I-U))のダイバータ板の温度上昇を抑えるには磁気軸を 3.7m 以上にする外側シフトが有効であるが、この場合は、トラス上方向のダイバータ板の温度(Tdiv(4.5U-I))の上昇が大きく、またアンテナのサイドプロテクタの温度上昇も大きくなるため、磁気軸を 3.65m から 3.7m 近傍でスイープさせることにした。最終的には磁気軸を 3.67 から 3.7m の間で往復動作させ、スクレイプ層からダイバータに出てくる熱粒子束を分散させて温度上昇を抑えることに成功した。図 2.2-38 左下段に磁気軸の位置と右上段にダイバータ板の温度が示されているが、磁気軸のスイープにより、ダイバータ板温度の上昇が飽和していることがわかる。2 か所のダイバータ板温度の変化は磁気軸の変化と同期して位相が反転し

ており、LHD のダイバータ熱流束の空間分布がこの磁気軸変化により大きく変化していることがわかる。また、4.5U-I のダイバータ温度は NBI の入射に同期してより大きく上昇している。

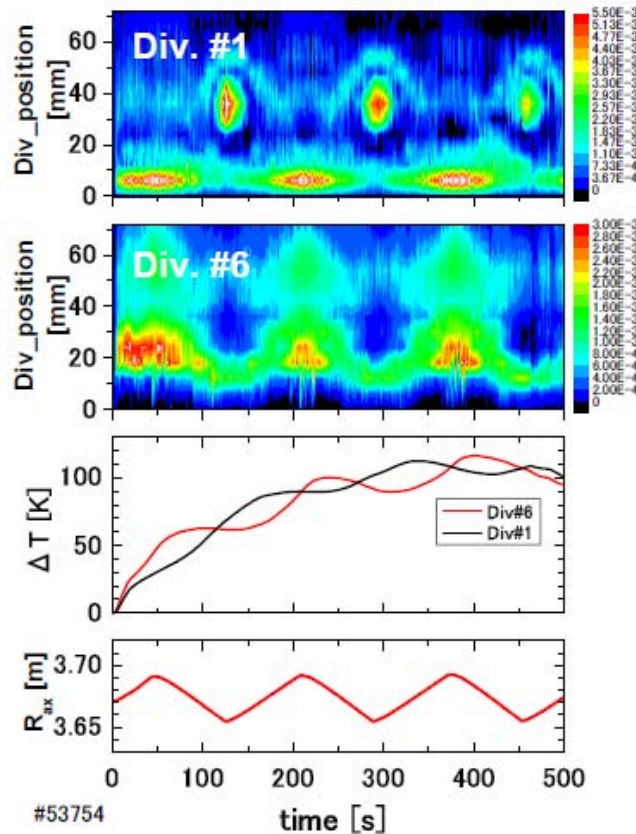


図 2.2-40 磁気軸掃引によるダイバータ熱粒子束の分散と温度上昇の抑制

### 3) 長時間放電のためのダイバータ板の改良と熱負荷分散および壁コンディショニング

平成16年度の第8サイクルに長時間の高入力エネルギー放電が可能となった理由として、定常加熱装置の改善に加えてダイバータ板の除熱性能の向上と熱負荷分散に成功した点が挙げられる。これには以下の3つの要素があげられる。これらの総合的な実験環境の向上により、長時間プラズマ維持が実現されたといえる。

- (1) プラズマからの熱流束を受ける受熱板を改良し、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。温度上昇の顕著な受熱板位置に高速イオン束の集中が起きていることが粒子軌道計算との比較によって確認された。これにより、熱負荷の大きい場所を同定することができた。
  - 熱伝導率の良い高性能受熱板を一部の熱負荷の大きい位置に設置した。
  - 受熱板と冷却配管の間に、熱伝導率の良い、ガスの噴出し難いスーパーカーボンシートを挟むことにより、受熱部から冷却配管までの高熱伝導率を実現した。
- (2) 受熱板上の熱負荷が特定の場所に集中しないよう分散させ、受熱板の温度上昇により大量のガスが噴出するのを防止した。

- 受熱板にプラズマが当たるよう、閉じ込め磁場を最適化した(プラズマ主半径を 3.67m から 3.70m とした)。
- 熱負荷が分散するように、放電中、プラズマの当たる位置を時間的に変化させた(磁気軸掃引、熱負荷の大幅な分散が可能になった)。

図 2.2-40 にその実証を示す。

(3) 壁コンディショニングの手法を改善

壁調整のため、プラズマに面した壁にボロン、チタン等をコーティングし、壁から鉄などの不純物やガスが放出され難くした。

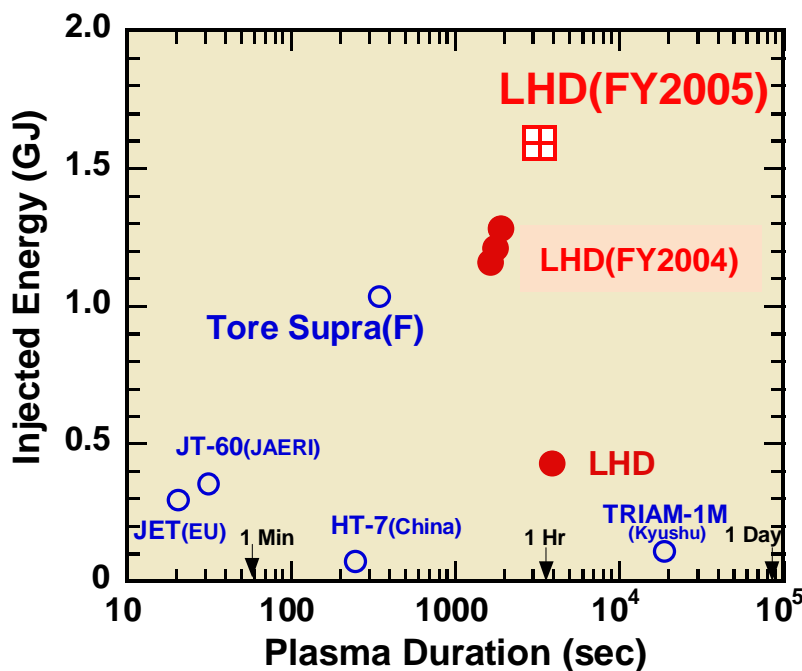


図 2.2-41 入力エネルギーとプラズマ維持時間で見た定常プラズマ達成領域

4) LHD の長時間記録の位置付け

図 2.2-38 および図 2.2-39 の長時間プラズマの入力エネルギー値はそれぞれ 1.3GJ および 1.6GJ に達した。この値は今までフランスの Tore Supra 装置が持っていたプラズマ維持世界記録 1.07GJ を上回る値になった。

図 2.2-41 に LHD とトカマク装置について、プラズマ維持時間とプラズマ入力エネルギー値のグラフを示す。図には高温プラズマを閉じ込めることのできる大型装置のデータが主に示してあり、100 秒以上のデータは LHD および超伝導トカマク装置で、数分から数時間のプラズマ維持が達成されている。JET や JT-60 のデータは高加熱入力で数 10 秒の実験である。LHD の実験データが世界の大型装置に比べても長時間運転の新しい領域に進んでいることがわかる。

今後は、より高い加熱入力で 2GJ 以上の入力エネルギー値を実現し、世界にインパクトを与えることの出来る実験をめざす予定である。

この長時間記録により、プラズマ電流を必要としないヘリカル型閉じ込め装置が、定常核融合炉へ高いポテンシャルを持つことを示すことが出来たといえる。また特筆すべきは、この実験は主にICRF加熱で実現したことである。イオンの閉じ込めに問題があると話題になり易いヘリオトロン配位で、磁場に垂直方向加速のマイノリティイオン加熱モードで、この記録を達成したことは特に意義深いものがある。

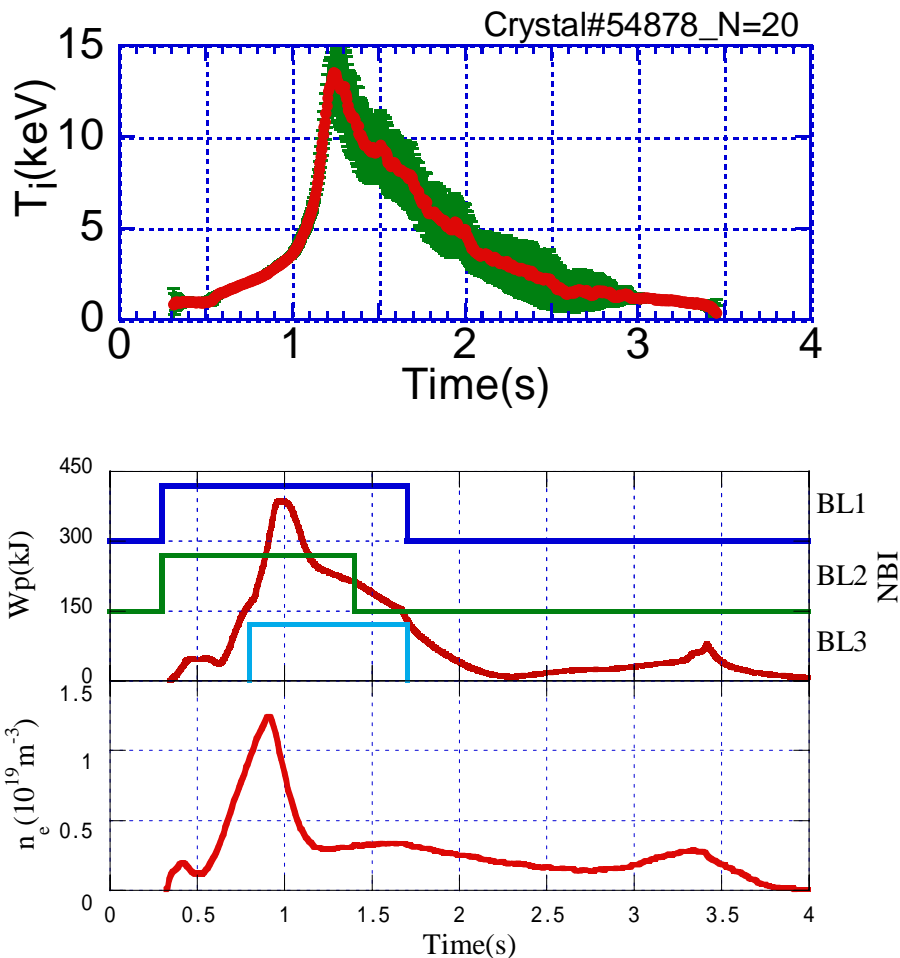


図 2.2-42 高 Z 放電による高イオン温度プラズマ生成の放電波形

### 2.2.6 高イオン温度

高イオン温度実験では、大電力中性粒子入射(NBI)加熱装置を用いた高イオン温度プラズマの生成、および高イオン温度プラズマの物理的特性を調べる研究を進めてきた。

高イオン温度プラズマの生成には中性粒子加熱入力パワーの増大ならびに閉じ込め性能の改善が重要になる。高エネルギービーム入射における入射ビームの透過成分を小さくし、プラズマへの加熱入力増加を狙って、アルゴン等を用いた高 Z 放電を行った。図 2.2-42 に代表的な放電波形を示す。閉じ込め磁場強度は 2.676T、磁気軸 3.7m であり、 $t=0.3$ s から NBI の入射によってプラズマを生成し  $t=0.5$ s からアルゴンパフで密度を上昇させる。そして、密度の下降にともない急峻なイオン温度上昇が現れ、 $t=1.2 - 1.3$ s の間で最高イオン温度  $13.5\text{keV} \pm 2\text{keV}$  のイオン温度を達成した。また電子温度も 4keV を超えており、中心部で平

坦な分布を形成した。加熱入射電力値は 10MW 程度である。高 Z 放電の実験週における継続したネオン・アルゴングロー放電洗浄やチタンゲッターなどの壁コンディショニングが、リサイクリングによる水素の混入を抑制し、その結果、高イオン温度が達成されたと推測される。

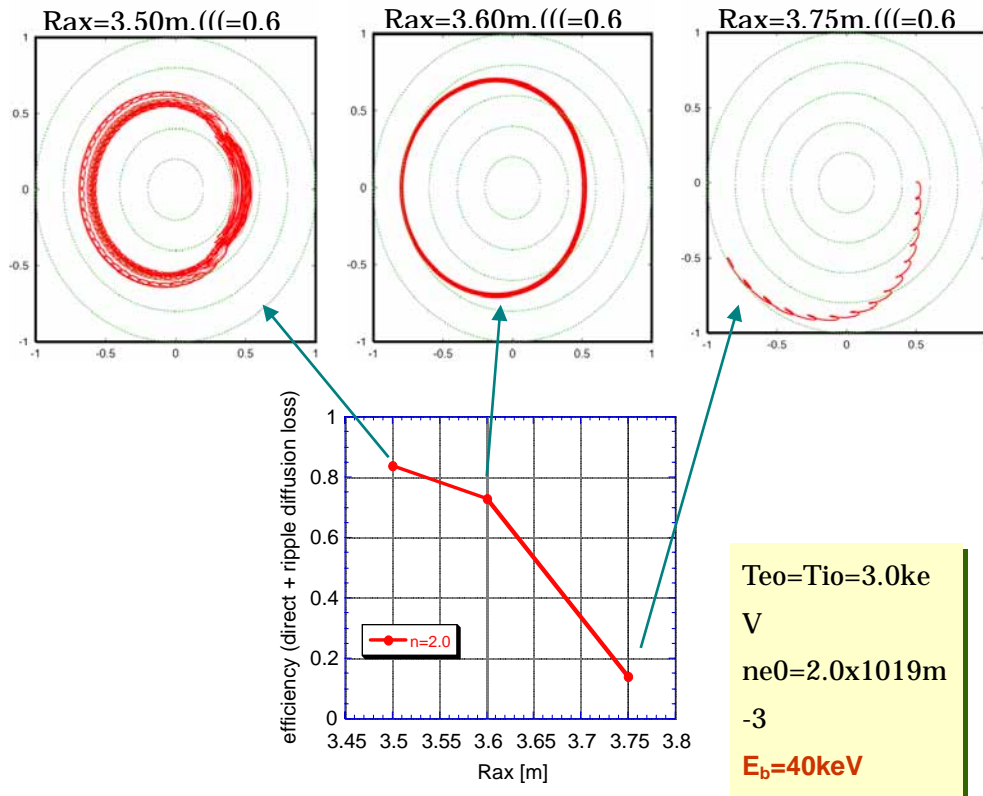


図 2.2-43 垂直入射されたビームイオンの軌道と加熱効率の磁気軸位置依存性

LHD では設計当初、磁場に垂直方向の高エネルギー粒子の閉じ込め性能が懸念されたため、接線入射の高エネルギーNBI によるプラズマ加熱実験が計画され、実施されてきた。接線NBIは、これまで見てきたように、LHDにおける高性能プラズマ実験を可能としてきたが、入射エネルギーが 180keV と高いため、主としてプラズマ電子を加熱し、イオンを十分に加熱することができない。そこで高 Z 放電を利用して等価的にイオンの加熱電力を増加させることにより、上述したように 13.5keV のイオン温度を得ることができた。一方、LHD 実験における ICRF 加熱を主体とした高温プラズマの長時間保持は、磁場に垂直方向に加速されたイオンを十分に閉じ込めることが可能であることを示している。また、高エネルギー粒子閉じ込めの理論研究の進展を受け、垂直入射された粒子の軌道をシミュレーションにより解析し、その閉じ込め性能を調べたところ、図 2.2-43 に示すように、Rax=3.6m 近辺より内側の磁気軸を内寄せにした磁場配位では、40keV 程度のビームイオンは十分閉じ込められることが判明した。そこで、イオンを主に加熱することのできる低エネルギーの垂直入射 NBI を平成 17 年度に設置し、水素プラズマにおける高イオン温度の達成を目指した。平成 18 年度には、



垂直入射 NBI を 40keV-6MW に増強して、高イオン温度実験を行った。その結果、図 2.2-44 に示すように、接線 NBI と組み合わせることにより、水素プラズマにおいて 5.2keV の中心イオン温度が、比較的高い密度の  $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  で得られた。第 11 サイクルにおいては、さらに密度が  $2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  の条件で、中心イオン温度は 6.8keV に達した。垂直 NBI は低エネルギービームを入射させるため、入射ビームを用いた CXRS によるイオン温度分布およびトロイダル・ポロイダル回転分布の測定を可能とした。図 2.2-44 は CXRS 測定による分布を示しているが、高イオン温度に関して大きなトロイダル回転が観測されている。電場の影響も含めたイオンの輸送解析を今後進めていく必要がある。

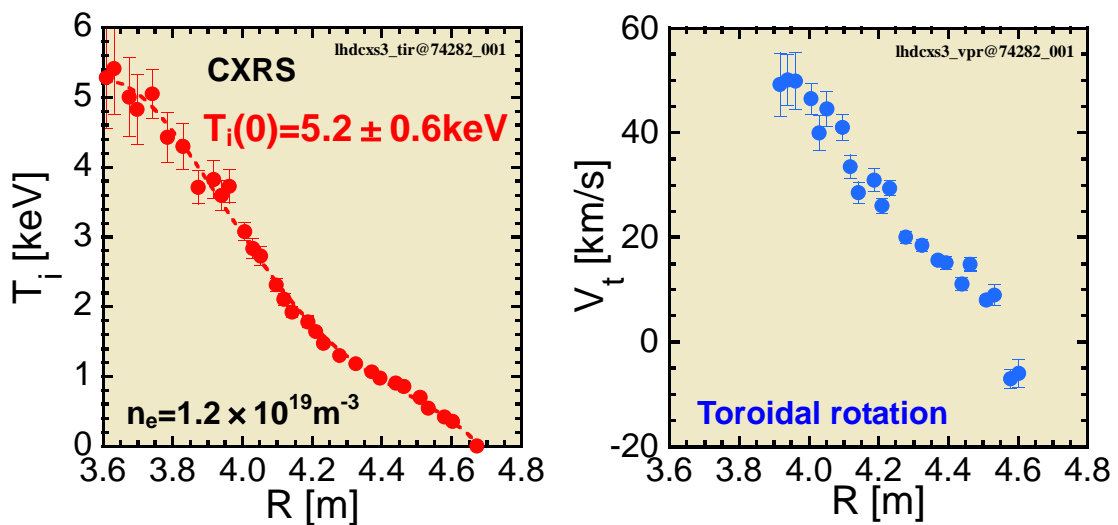


図 2.2-44 低エネルギー垂直入射 NBI を用いて加熱された水素プラズマにおけるイオン温度とトロイダル回転の径方向分布

### 2.2.7 高電子温度

高電子温度プラズマの、密度領域、磁場配位、NBI 駆動電流の方向、磁気島の有無による変化、また加熱や微小トレーサーをプラスチックでカプセル化した TESPEL (Tracer Encapsulated PELlet) を用いた過渡応答特性を組み合わせることで、高電子温度形成条件を明らかにし、さらには高電子温度プラズマの領域拡大を行う研究を進めている。

高電子温度プラズマの密度及び空間的領域拡大を目指して、電力吸収分布の異なる EC 加熱、ICRF 加熱及び TESPEL の非局所輸送による電子温度上昇と組み合わせを変え、密度領域を変えて高電子温度プラズマの実験を行った。TESPEL による非局所輸送によって引き起こされる局所的な電子温度上昇率は、 $\omega = 0.4$  付近では EC によるそれを上回る場合がある。このように高電子温度を得るための手段として TESPEL の非局所輸送を利用できる可能性が示唆された。また、TESPEL のコールドパルス、EC 加熱の熱パルスの過渡応答解析を継続しておこなっており、高電子温度プラズマの詳細な輸送解析の手段として定着しつつある。

高電子温度プラズマの電子温度分布の NBI 入射方向による違いを系統的に調べている。磁場の正転、反転、入射 NB の選択を行い、異なる条件での NB ターゲットプラズマに対して

局所的な中心 EC 加熱を行うことで、電子の輸送障壁様の構造形成が NBI 入射方向と磁場方向の相対的な関係(Co 及び Ctr)で異なることを確認した。磁場の正反や入射 NB の種類によらず、Ctr-NB 方向の場合には明らかな電子温度勾配のジャンプが  $\tau=1/2$  付近にある。同様に、Co-NB 電流駆動の場合には明らかな電子温度勾配のジャンプがみられず、幅広い台形型の電子温度分布となることが確認された。

### 2.2.8 電場による閉じ込め改善

電場と輸送障壁に関しては、CXRS による電場計測を用いた電場制御の検証、電子系内部輸送障壁(ITB)形成と電場構造との関連、重イオンビームプローブ(HIBP)の試験実験、非局所輸送の発現領域やその機構解明などの実験研究と、「非軸対称系配位における径電場構造」をキーワードとした理論予測・データ解析研究を組み合わせることで、LHD における径電場特性の解明・輸送機構の解明とそれに基づく閉じ込め改善シナリオの構築を念頭に研究を進めている。

電場シア形成による閉じ込め改善研究への外部制御性のある実験的ノブの確立を目指し、LID コイル電流値の制御によって、磁気島幅を外部制御した上で、磁気島より内側にペレットを入射し、密度勾配の促進に伴うイオンルートでの電場シア形成を試みた。連続ペレット入射により、形成されたシアを維持させることができた。図 2.2-45(左図)は、磁気島幅が大きい(LID コイル電流値=-1920A)場合に、ペレット入射により磁気島内側の密度勾配が増大することによって、大きな負電場が形成され、その結果、電場シアの形成に成功した例を示している。図 2.2-45(右図)では、磁気島内側での電場の時間変化が示されている。パイプガンによる単一ペレット入射では一時的に負電場が形成される(緑)が、連続でペレットを入射すると、その負電場が維持され、それぞれのペレットの大小(大:青、小:赤)に応じて、負電場・電場シア形成の時定数が変化する様子が示されている。密度勾配の形成時定数が異なるためと考えられる。

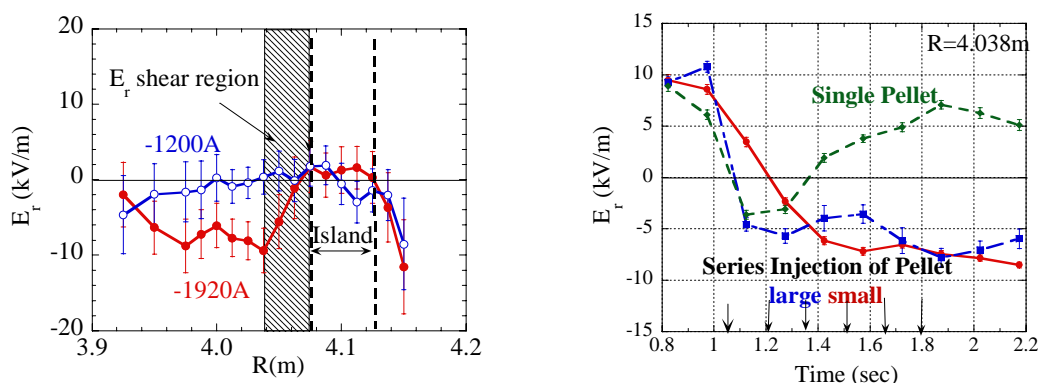


図 2.2-45 磁気島とペレットを用いた電場制御。(左図)磁気島の幅による違い。(右図)磁気島内のペレット入射条件の違いによる電場の時間変化の違い

重イオンビームプローブ(HIBP:Heavy Ion Beam Probe)は、電場とその構造を直接的に測定できると共に、プラズマ揺動の計測も可能である。しかし、LHD はプラズマサイズが大き

いため、必要とするエネルギーが 1MeV 以上と高く、また、プラズマ形状も複雑で、ポートの配置も限られていることから、必要とするビーム電流も比較的高い。そのため、開発と調整に時間がかかったが、平成 18 年度にその測定に成功した。図 2.2-46 に HIBP 装置の構成図を示す。ビームエネルギーの仕様は 6MeV で、Au 負イオンをタンデム加速して所定のエネルギーの Au 正イオンとし、LHD プラズマへ入射する。ビームの検出は MCP 付き高増倍率検出器で行う。この HIBP を用いて、NBI プラズマに ECH を重畳して形成された電子内部輸送障壁の電位分布を計測した。その結果、輸送障壁近傍に静電場が形成されていることが確認できた。そして、輸送障壁内部のポテンシャル信号に、図 2.2-47 に示すように、パルセーションと考えられる速い負のパルスの繰り返しが観測された。また、プラズマ密度・温度の変化を反映する HIBP 信号強度にもパルスが現れている。パルス発生時には、ポテンシャルの勾配が小さくなっており、周辺の ECE 信号にも熱パルスが観測されている。今後、新古典理論に基づいた電場分岐モデルとの比較・検証を進める予定である。

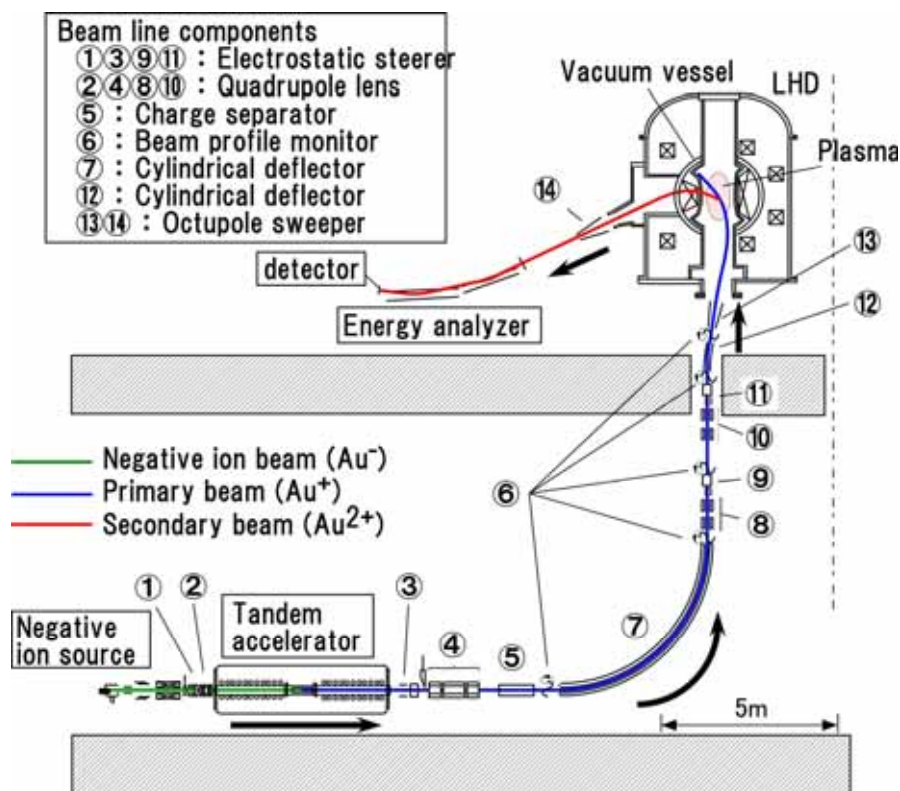


図 2.2-46 HIBP(重イオンビームプローブ)装置の構成図



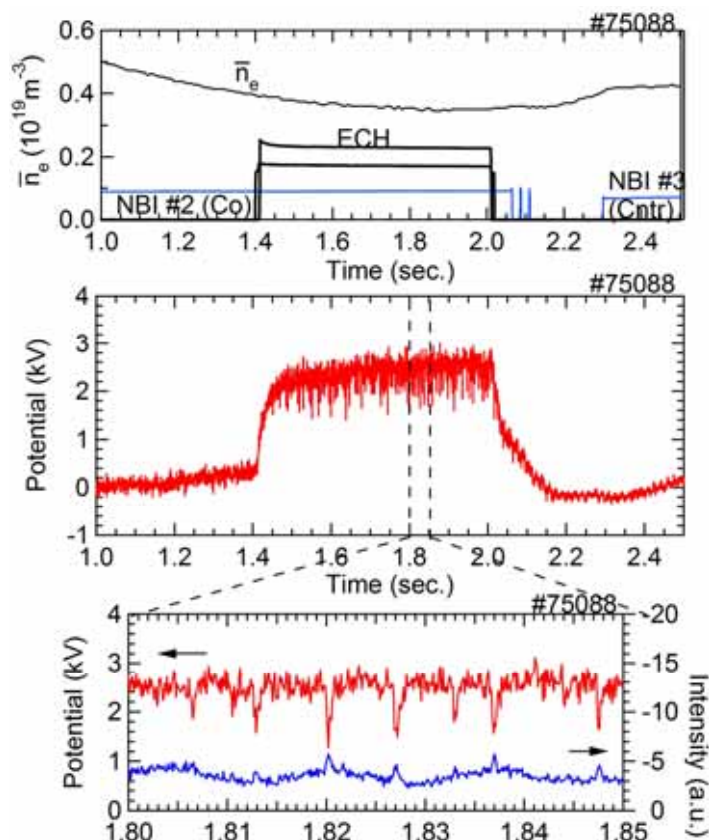


図 2.2-47 HIBP で測定された輸送障壁内部のポテンシャル信号

### 2.2.9 粒子および不純物輸送

粒子および不純物輸送に関しては、以下に示す2つに対して研究が進んでいる。

#### (1) 不純物入射(ペレット、ガスパフ)による閉じ込め領域の不純物輸送解明実験

LHD では炭素や金属不純物を中心とした不純物ペレット入射装置と TESPEL、そして不純物ガスパフを用いた不純物輸送研究が進められている。

炭素ペレットを水素、ヘリウムプラズマにそれぞれ入射し、粒子輸送係数(拡散係数、対流速度、リサイクリング係数)の背景イオン質量依存性の評価を行った。拡散係数は水素、ヘリウムで大きな違いはないが、背景イオン質量が大きい場合に対流速度は小さくなることが観測された(図 2.2-48 (a)、(b))。また、対流速度は周辺の密度勾配の大きな関数になっていることも明らかになり、この傾向はアルミニウム及びチタンペレット入射時も同様であった(図 2.2-48(c))。

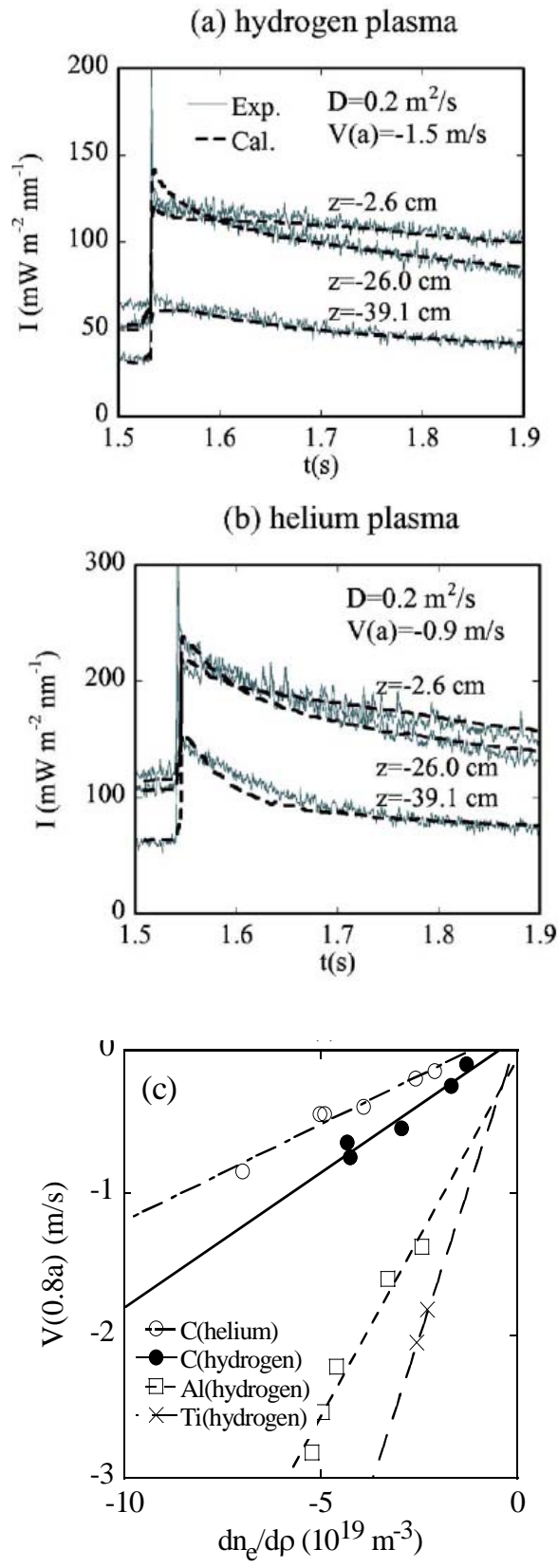


図 2.2-48 不純物ペレット輸送解析

TESPEL によりチタントレーサをコアプラズマ中に入射後、50、250、350msec 後にそれぞれ ECH を印加した場合、50、250msec の場合はほぼ同じ時定数で TiK $\alpha$  発光強度が減衰す

るが、350msec の場合はその他の場合に比べて  $TiK\alpha$  発光強度の減衰時定数が3倍程度長いことを観測した。すなわち ECH による不純物の吐き出し効果は、チタントレーサ入射後時間が経つと弱くなることを示唆しており、ECH による不純物吐き出しの機構と ECH 印加時の径方向電場の変化の関係を調べた。ECH を印加すると、電場は正に変化している領域が現れており、径方向電場が不純物吐き出し機構の一つの要因であることが示唆される。

この他、キセノンガスを用いた EUV 領域のスペクトル分析が行われ、これは LHD プラズマを光源として利用する事例となっている。

## (2) 周辺・ダイバータプラズマ計測、及び計算機シミュレーションとの比較

放射崩壊に至る際のプラズマ中の不純物(主に炭素)の実験データを詳細に研究するためには、LHD プラズマ中の不純物(炭素)の輸送を解析しなければならない。そこで、炭化水素(イオン)の挙動を取り扱うことのできる中性粒子輸送シミュレーションコード(EIRENE (ステラレータバージョン))を利用して、ダイバータプラズマ中の炭化水素分子・イオンの密度分布などを求める初期的なシミュレーション計算を行った。この計算では、ダイバータタイル上のストライクポイントから炭化水素(メタン:  $CH_4$ )をプラズマ中に放出させている。大半径方向で内側のダイバータレグに沿って炭素の密度の高い領域が形成されており、CCDカメラによるCIIの観測結果とは定性的に矛盾しないことが分かった。

### 2.2.10 高エネルギー粒子の閉じ込め

高エネルギー粒子の振る舞いに関して、以下に示す2つの項目に着目した実験を行った。

(1)ICRFによる高エネルギーテールの生成、(2)LHD における高エネルギー粒子閉じ込め特性の評価。特に(2)については(a)高い高速イオンエネルギーを有したプラズマの生成、及びそのようなプラズマにおける高エネルギー粒子の振る舞い、(b)NB-blip 法による高エネルギー粒子の定量評価、(c)PCX(Pellet Charge Exchange)による高エネルギー粒子のエネルギースペクトルの局所的な計測、を行った。

ICRF 加熱による高エネルギーテール生成では、定常放電実験時に少数 H イオンの He イオンに対する比を制御することができたため、高エネルギーテールの生成に成功し、1MeV を越える高エネルギー粒子の存在を観測することができた(図 2.2-49)。今後は、さらなる ICRF パワーの投入や、強磁場における第2高調波加熱などといった手法によって、より高いイオンテールの生成を目指す。

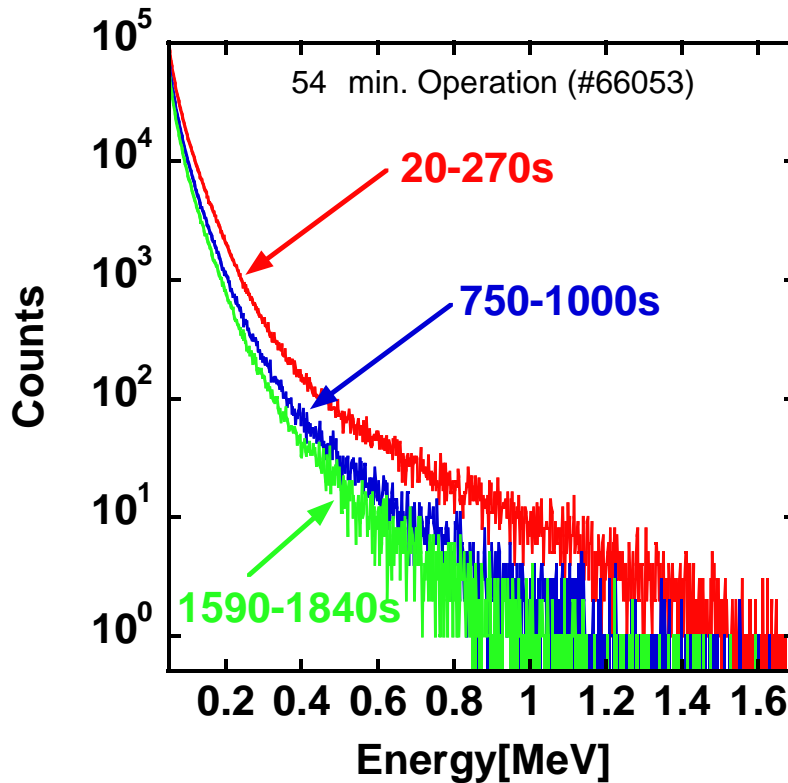


図 2.2-49 ICRF を用いた定常放電時に荷電交換中性粒子分析器で観測されたイオンエネルギー分布

ペレットの溶発雲を利用した能動的な荷電交換中性粒子計測(PCX: Pellet Charge eXchange)が平成16年度(第8サイクル)より開始され、NBI プラズマに対して計測を試みた。PCX 計測は、ペレット入射パスとほぼ一致する視線を持つ位置に中性粒子分析装置(NPA)を配置し、ペレットの入射に伴う中性粒子スペクトルの変化を利用して、能動的にプラズマ中のイオンのエネルギースペクトルを計測する手法である。ペレットはプラズマ入射後にプラズマ周辺から中心へと移動していくので、その溶発雲も時間とともに中心部へと侵入する。したがって、ペレット入射後に観測された中性粒子のエネルギースペクトルの時間変化は、ペレットのパスに沿った場所での高エネルギー粒子スペクトルの空間分布を表すこととなる。ペレット溶発雲の位置が周辺部から中心部へと行くに従って、得られるスペクトルの高エネルギー成分が増加した。これはプラズマが中心部に行くほど電子温度が高く、その結果、エネルギー減速時間が長くなり、高エネルギー成分が蓄積されやすくなるという古典的な解釈と一致する。今後は、ICH プラズマなどに適用し、高エネルギーテール成分の空間分布を局所計測し、テール生成のメカニズムの理解に役立て、更に LHD における高エネルギー粒子閉じ込めの評価を行う予定である。

## 2.2.11 装置工学

LHD は世界最大の超伝導コイルシステムを有する核融合実験装置である。装置工学実験では、プラズマ実験に安定した磁場を提供するための信頼性向上の研究を行ってきた。さらに大型超伝導コイルシステム特有の物理現象に関する研究も進めている。研究テーマは次の通りである。

- (1) LHD 超伝導コイルの性能確認と健全性確認
- (2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響(AE)信号を用いた機械的擾乱の診断(成蹊大学との共同研究)
- (3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定
- (4) LHD 超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場の観測(東北大学、山口大学との共同研究)
- (5) LHD 超伝導コイル電源の電流制御-プラズマ電流消滅時の制御特性向上(大阪大学との共同研究)
- (6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価
- (7) LHD 電磁力支持構造物の二相流ヘリウムによる冷却の最適化(日本原子力研究所(当時)との共同研究)
- (8) LHD ヘリカルコイルの過冷却(サブクール)改造

これらの研究課題についての成果の概要を以下に述べる。

### (1) LHD 超伝導コイルの性能確認と健全性確認

LHD は 1997 年 12 月に建設を完了して翌年 1 月より各機器の動作試験と気密試験等を行った。最終のヘリウムリーク試験において計 5 箇所リークが発見されたが、全てのリーク箇所(溶接部)の補修に成功した。1 回目の冷却では流量計の測定範囲の不適合やヘリウムインベントリの過小評価等のトラブルがあったものの、計画通りに 4 週間で冷却を完了することができた。冷媒の圧力損失や熱負荷についても設計値と良く一致する結果が得られており、設計と製造の健全性が実証されている。第 1 サイクルでは計画通りに 1.5 T までの励磁を行って超伝導コイルシステムの健全性を確認した。約 4 カ月の 1.5 T プラズマ実験を経験してから第 2 サイクル途中の 10 月に標準 3.0 T までの励磁が試みられたが、その途中の 2.75 T においてヘリカルコイルに広域の常伝導伝播が発生して緊急減磁インターロックが働いた。ヘリカルコイルにおいては動的な冷却安定性の不足が明らかとなり、運転電流値は定格の 90%以下に制限されている。ポロイダルコイルと超伝導バスラインは最初から 4 T を定格値として設計されていることもあり、3 T 近傍までの励磁試験においては安定した超伝導特性を示している。

LHD では冷却サイクル毎に一連の励磁試験を行い、超伝導コイルシステムの健全性を確認してきている。システムの健全性は、2)で述べるバランス電圧測定、AE 測定、そして 3)で述べるひずみ測定によって検証している。特にヘリカルコイルについては、常伝導伝播が起り得る電流値までの励磁試験を毎回実施してきており、これまでのところ冷却安定性の劣化は観測されていない。

## (2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響 (AE) 信号を用いた機械的擾乱の診断

### 2.1) はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) の超伝導コイル群では、励磁に伴って各コイルのバランス電圧に多数のスパイク信号が観測される。これまでヘリカルコイルで観測されるスパイク信号に対して「パルス波高解析」を適用することで、巻線の機械的特性に関する定量的情報を得る手法を開発してきた。第7サイクル実験からは、ヘリカルコイル容器に AE (音響) センサーを取り付け、励磁に伴って発生する AE 信号の測定を開始した。バランス電圧の冷却サイクルに伴う推移や、AE 信号との対比を調べた結果について以下にまとめる。

### 2.2) バランス電圧信号の冷却サイクルに伴う推移

励磁に伴ってヘリカルコイルに観測されるバランス電圧スパイク信号の総和を励磁履歴に対して調べると、図 2.2-46 に示すように、各冷却サイクルにおいて同じ条件の2回目以降の励磁では、1回目と比べて総和が減衰することがわかる。これは巻線のトレーニング効果を表しているものと解釈できる。また、加温と再冷却の後、次のサイクルにおける最初の励磁では、ある程度までスパイク信号強度が初期化されるものの、冷却サイクルを重ねるごとに強度が減少していることも明らかとなっている。

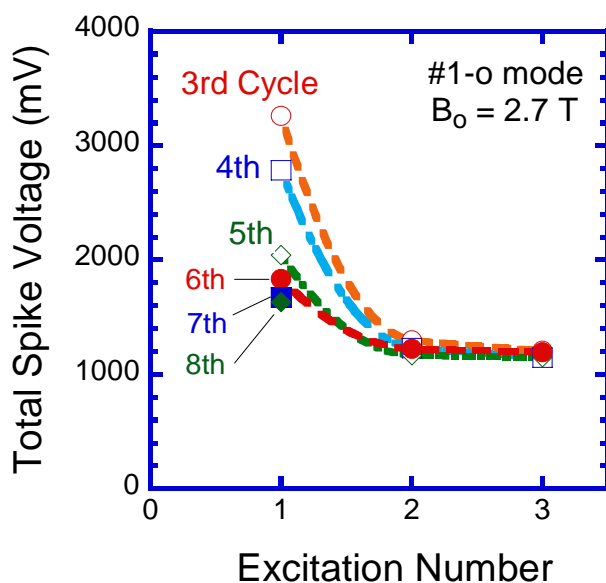


図 2.2-46 ヘリカルコイルのバランス電圧スパイク信号の総和の励磁履歴

### 2.3) AE 信号とバランス電圧信号の比較

LHD の超伝導コイル群において励磁に伴って発生する機械的擾乱についてさらに詳しく調べることを目的として、AE 信号の測定を開始した。ヘリカルコイル容器の4カ所に AE センサーを取り付け、エンベロープ信号をサンプリング周波数 10 kHz で取得した。測定信号の1例を図 2.2-47 に示す。図には、ヘリカルコイルのバランス電圧信号について、低周波数領域 (10 Hz) と高周波数領域 (1 kHz) の計測結果も合わせて示している。これについて、高周波数領域では低周波数領域には観測されないタイミングで信号が観測されているが、これ

までの観測の結果、高周波数領域にかかる信号の一部は、ポロイダルコイルが変位することによって生じる機械的な振動をピックアップしているものであることが明らかとなっている。AE 信号についてもポロイダルコイルの振動を捉えているものが多数あることがわかっている。

一方、AE 信号の積分値について励磁回数に対する依存性を調べたところ、図 2.2-48 に示すように2回目の励磁より減衰し、バランス電圧の測定結果と類似の傾向を示していることも明らかとなった。

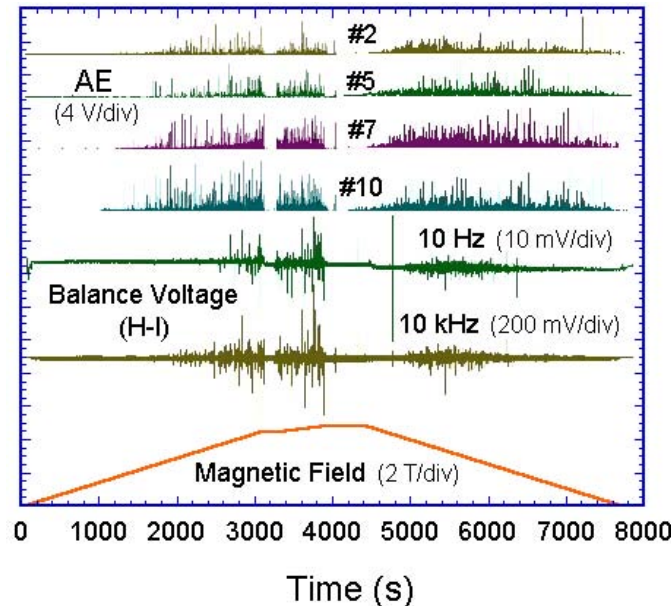


図 2.2-47 ヘリカルコイルのバランス電圧信号と AE 信号

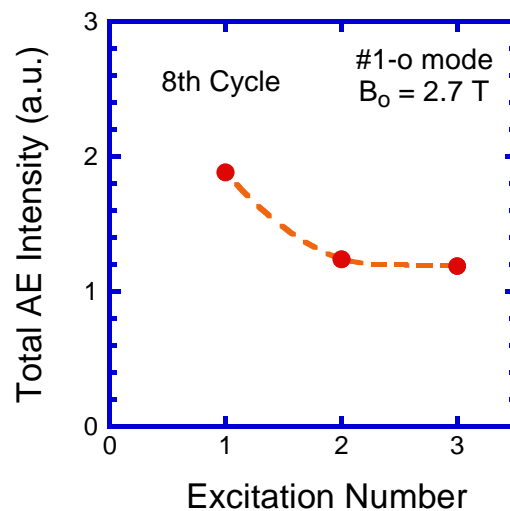


図 2.2-48 第8サイクルにおける励磁回数に対する AE 信号の変化

### (3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定

LHD 電磁力支持構造物は超伝導コイルとともに 4.5 K に冷却され、巨大な電磁力を支持している。材料は板厚 100 mm の SUS316 鋼である。LHD 建設時に電磁力支持構造物の内側及び外側赤道面に、各 10 箇所、ひずみゲージを貼付しており、その出力を実験サイクル毎に点検し、異常の有無を検討している。励磁によって渦電流が発生し、SUS316 鋼の温度



が上昇するが、0.02 T/min という低速励磁では、温度上昇は起こらない。ただし、液体ヘリウム供給元の圧力変動によって 0.03 度程度の温度変化がある。図 2.2-49 に 2000 年 10 月 4 日の測定結果と 2004 年 11 月 24 日の測定結果とを比較して示す。両者は最小分解精度 $\pm 3$  デジット以内 (1 デジットは  $2.5 \times 10^{-6}$  ひずみに相当) にあり、有意な差は認められない。図 2.2-50 は過去 8 回のポロイダル方向ひずみの計測結果をまとめたものである。横軸はセクター番号で、10 セクターの内側赤道、外側赤道での測定結果である。各測定位置でひずみの絶対値は異なるが、これはポート形状などが異なるためである。しかし、いずれの位置においても、測定値は最小分解精度 $\pm 3$  デジット以内にある。トロイダル方向ひずみの計測結果もポロイダル方向ひずみと同じ傾向を示している。これらのことから、建設から 9 年経過したひずみゲージは依然として正確に動作しており、かつ、電磁力指示構造物の赤道面付近の溶接部は健全であることが分かる。

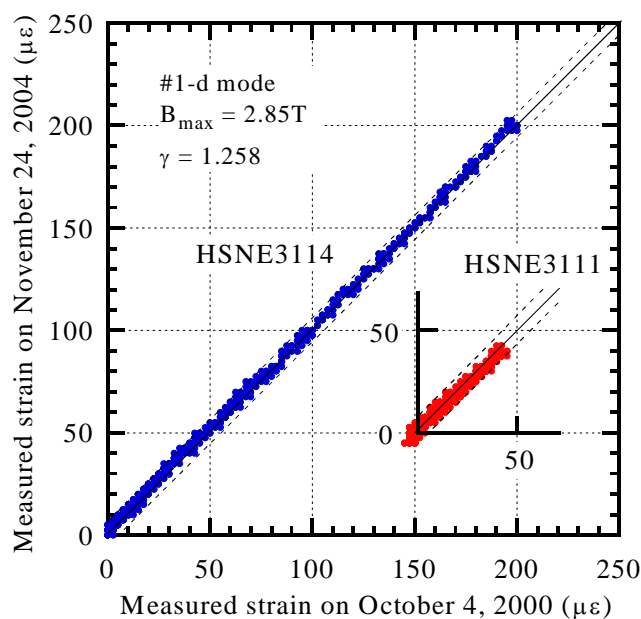


図 2.2-49 2000 年 10 月 4 日の測定結果と 2004 年 11 月 24 日の測定結果の比較



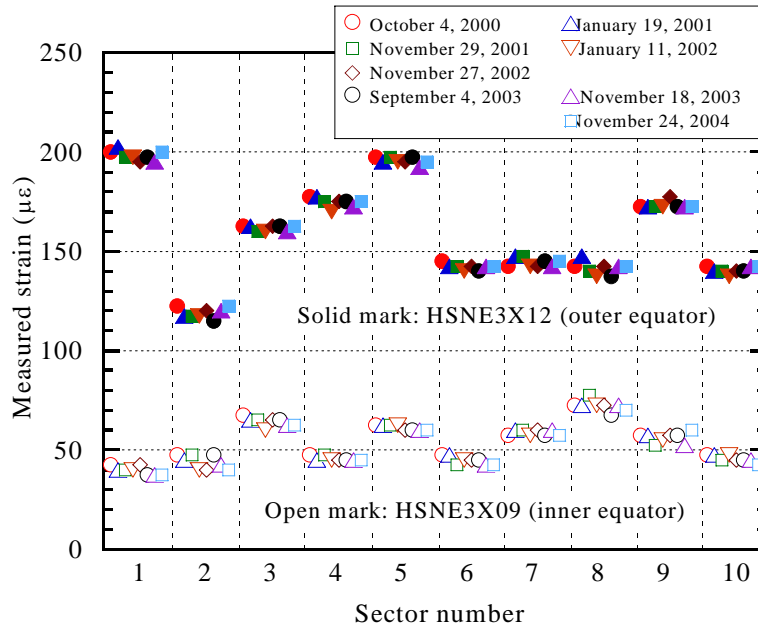


図 2.2-50 5 年間のポロイダル方向のひずみ測定結果(内側赤道と外側赤道)

#### (4) LHD 超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場の観測

##### 4.1) はじめに

ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を用いた大型超伝導コイルにおいて、コイル近傍の磁場を測定したとき、通電電流が一定であっても長い時定数を持った小さな磁場変化が観測されている。この磁場の長時定数成分はコイル内部の結合電流ループによるものと考えられているが、その電流経路が複雑なために、定量化には至っていない。本研究では、CIC 導体を用いている LHD ポロイダルコイル(IS コイルおよび OV コイル)の近傍にホール素子を取り付け、磁場の長時定数成分の観測を試みた。

##### 4.2) 測定方法

図 2.2-51 に LHD の断面図とホール素子の取付け位置を示した。IS コイル、OV コイルの内周面にそれぞれ4個のホール素子を取り付けた。上側コイルと下側コイルに 180 度方位を変えて 2 カ所ずつに素子を取り付けた。測定した磁場の方向は一軸で鉛直方向である。観測は、通常のプラズマ実験期間に連続して行う。また IS コイルと OV コイルのみで通電する特別な通電実験も実施した。

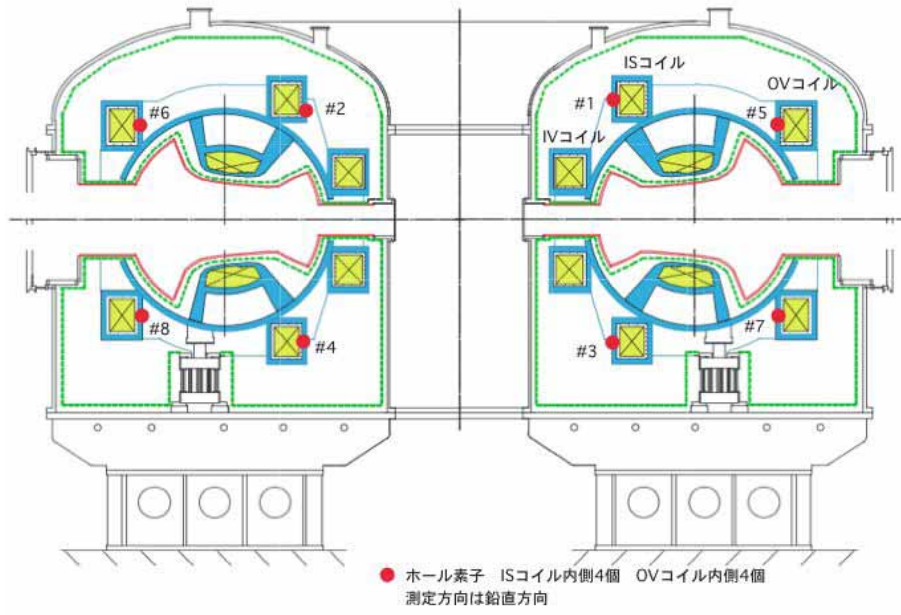


図 2.2-51 LHD の断面図とホール素子の取り付け位置

#### 4.3) 実験結果

図 2.2-52 は典型的な測定データである。IS コイルに 14 kA (OV コイルに 4.6 kA) を通電し、1 時間保持した後、減磁した。減磁が終了し、電源とコイルを切り離れた後の磁場の変化を図に示した。電源と切り離されているにもかかわらず、磁場の変化が観測された。その変化を指数関数を用いてフィッティングした曲線を、図の中に同時に示した。測定磁場のオフセットには、素子自身のオフセット、アンプのオフセットに加え、減衰が見られない残留磁場が総合的に含まれている。そしてフィッティング曲線の減衰時定数は約 2000 秒であった。他の LHD ポロイダルコイルにおいても、これまでの観測例と同様の長時定数成分が存在することが確認された。さらに非通電時だけでなく、通電中のフラットトップで電流値が変化していない状態でも、磁場の微小変化は観測された。構造物の渦電流ではこのような長時定数減衰は発生しない。従って超伝導性に関係した結合電流ループに起因していると考えられる。

これまでに、通電を保持する時間が長いと、減磁後に観測される変化の時定数も長くなるということが分かっている。IS コイルについての結果を図 2.2-53 に示した。いずれも IS コイルを 14 kA まで通電した後の、残留磁場の変化時定数を示した。ホールド時間がゼロの場合(三角波通電)は、時定数は 500 秒程度である。一方、ホールド時間を 1 時間にすると時定数は 1000 ~ 2000 秒に増大した。この現象から結合電流ループの時定数は一つではなく、広く分布していることが分かった。

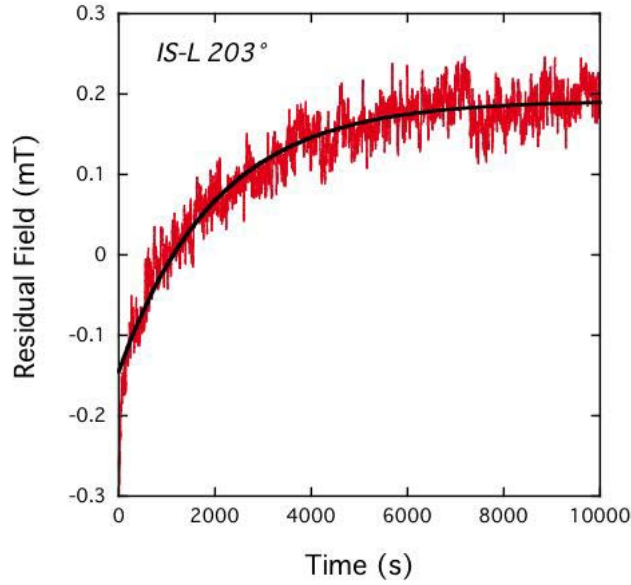


図 2.2-52 IS コイルを 14kA から減磁した際の残留磁界の変化

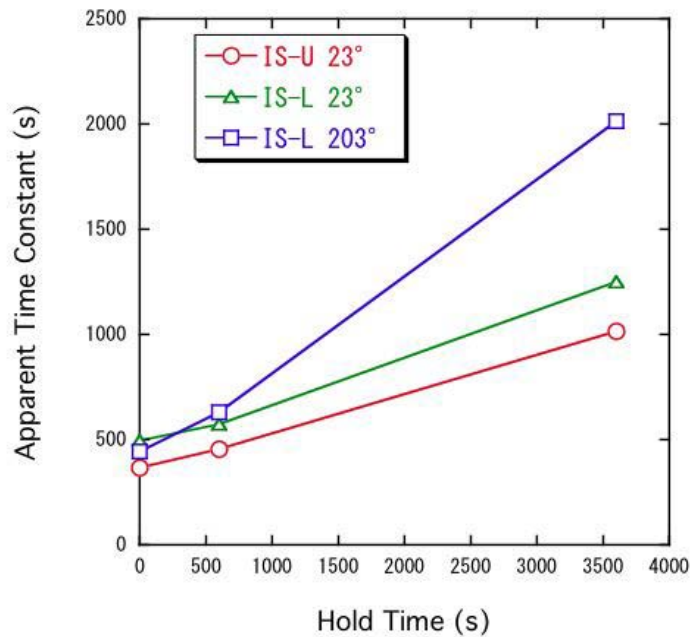


図 2.2-53 IS コイルを 14kA まで通電した後の残留磁場の変化時定数

## (5) 超伝導コイル電源の電流制御

### 5.1) 研究の目的

核融合プラズマ実験装置用超伝導コイル励磁電源には所定の実験条件を達成するために下記の条件が要求される。また、将来の核融合装置においても同様の条件が予想される。

- ・所定の精度でコイル電源を制御できること
- ・所定の動的制御が可能であること
- ・システムパラメータの変動、外乱に対して頑強、安定であること

・超伝導コイルシステムに与える擾乱が少ないこと

本研究はこれら条件を満たす電流制御システム開発を目的としている。

## 5.2) これまでの成果

外乱信号の影響を抑制する制御系を構築するための理論である H 制御設計手法を利用して、安定性と制御特性の両立を図った制御系を設計してきた。その過程で、以下に示す制御システムを開発した。

a)超伝導コイル電流のみを検出し使用する制御系

b)プラズマ電流も検出し、制御擾乱を抑えた制御系

・プラズマ電流に関わらずコイル電流を一定とする制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が一定に保たれるが、コイル電圧は大きく変動し、特にプラズマ電流が急速に減少したときの動揺が著しい。

・プラズマ電流による鎖交磁束変化を抑制する制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が変化するが、コイル電圧の変動は少なく、プラズマ消滅時の擾乱も小さく抑え得る。

これまでの実験で、プラズマ消滅時の信号が過大となる結果、制御系に擾乱が入るといった問題があった。そこで、新たに、プラズマ電流信号に非線形フィルタ(一定レベル以下の信号には作用せず、一定以上の信号に対しては LPF 特性を持たせた)を挿入して、過渡時擾乱抑制を検討した。その結果を以下に纏める。

実験結果を図 2.2-54、2.4-55 に示す。図 2.2-54(a)は電流一定制御時のコイル電流および電圧、(b)がこのときのプラズマ電流である。プラズマ実験中もプラズマ電流変化率に対抗するコイル電圧が発生し、コイル電流を一定に保っていること、プラズマ消滅時の電圧もコイル電源定格以内であってその後に擾乱は生じていない。本実験では、プラズマ電流が低めであったことから、擾乱抑制効果のうち非線型フィルタによる割合の同定は困難である。しかしながら、本制御システム自体は高速な現象にも擾乱が少なく運転可能なことが示唆された。図 2.2-55(a)は磁束一定制御時のコイル電流と電圧、(b)がこのときのプラズマ電流である。フィルタ回路周辺のオフセット除去が不完全なため、コイル電流にドリフトが生じた。プラズマ生成消滅前後を通して、過大な電圧は発生していない。今後は、フィルタを含めたパラメータの最適化、非線型制御の検討、従来の P 制御への技術移行を検討予定である。

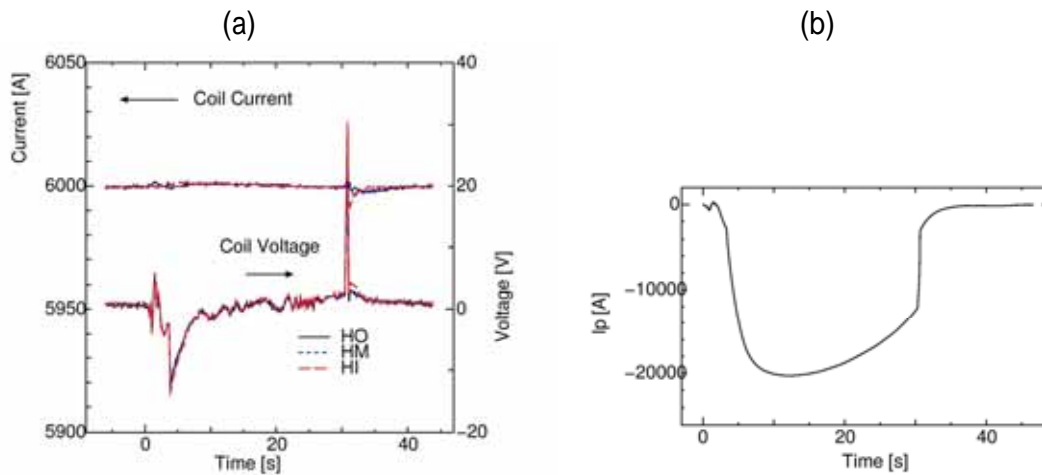


図 2.2-54 コイル電流一定制御の実験結果 (a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

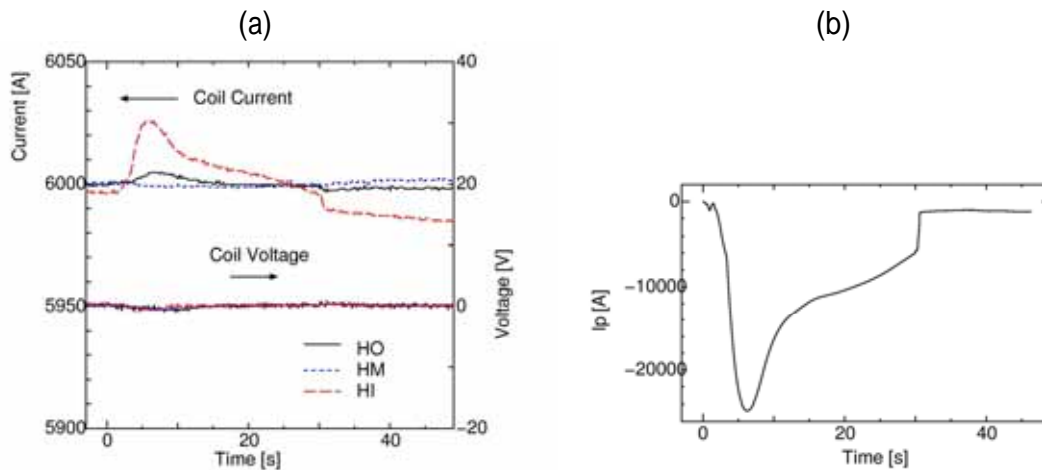


図 2.2-55 鎖交磁束一定制御の実験結果 (a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

#### (6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価

ヘリカル型核融合実験装置あるいは核融合炉においては、閉じた磁気面を形成する精度良い超伝導コイルシステムが必要である。超伝導コイル対におけるバランス電圧計測から、超伝導コイルシステムの幾何学的な精度を評価することを目的に実験を行った。

コイル対の単体励磁実験結果から、コイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々(例えば、OV 上、OV 下)と、別のコイル対(例えば HI コイル対)との相互インダクタンスの誤差は  $M \sim 0.3\text{mH}$  程度であった。線電流近似による簡易的なインダクタンス計算より、前記相互インダクタンス誤差は剛体的な位置不整を想定する場合、 $\sim 1\text{mm}$  の位置ずれに相当する。真空磁気面マッピングにおいて観測されているナチュラル・アイランドの原因になるような  $8\text{mm}$  程度の剛体的な位置不整、言い替えればコイル中心位置不整および傾きは存在しないことが推定される。

本サイクルでは LID コイル群(A 電源系統、B1 電源系統、B2 電源系統)とコイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々との相互インダクタンスの違いも評価している。この場合の  $M$  は最大で  $0.03\text{mH}$  程度であった。現在、超伝導コイル間のバランス電圧のアンバランスとしては

観測されない超伝導コイルの非等方性変形の可能性も視野に入れて、実験データを分析している。

#### (7) LHD 電磁力支持構造物の二相流ヘリウムによる冷却の最適化

LHD 電磁力支持構造物の冷却方式は、二相流ヘリウムによる 20 並列の強制冷却であるが、その熱特性は詳細には調べられておらず、また二相流の冷媒流量の配分など、最適な冷却条件についても研究がなされていない。そこでまず、電磁力支持構造物の冷媒を 2 時間停止して再開する実験を行い、各並列流路および電磁力支持構造物の温度上昇および冷媒供給再開後の温度不安定の有無を調べた。その結果、次のことが分かった。

- (1) 電磁力支持構造物の温度上昇から定常熱負荷の概算が可能である
- (2) 現状の冷媒流量においては並列流路間の温度不安定性は生じない(小さい)
- (3) 各流路には固有の周期の温度振動が観測されるが、1 K 以内の振動であり許容されるレベルである。

#### (8) LHD ヘリカルコイルの過冷却(サブクール)改造

LHD のヘリカルコイル導体では、高い冷却安定性を確保するために安定化材に高純度アルミニウムが採用された。しかしながら、導体断面の大型化によって低抵抗の安定化材への電流拡散時間が長くなったことが原因で、定格電流値の約 90%の電流値において常伝導部の拡大伝播が起こり得ることが明らかとなり、それ以下の電流値(約 11.2 kA)で運転されてきた。そこで、冷却安定性を改善して高磁場励磁を可能とするために冷媒温度を下げる改造を第 10 サイクル前に実施した。追加した過冷却システムが所定の性能を達成することを確認してから、サブクールされた状態での励磁試験を行い、11.5 kA までの励磁に成功した。

冷媒温度を下げる方法として、ヘリカルコイル全体を減圧する方法と入口側に減圧熱交換器を追加して圧力は変えずに過冷却状態にする方法の 2 通りを比較・検討して、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な後者の方式を選択した。図 2.2-56 に示すように、低温排気圧縮機を採用することによってコンパクトな設計が可能となり、設置空間の問題は解決された。また、既設ヘリウム冷凍機の能力で供給可能な 3.0 K の過冷却ヘリウムは約 50 g/s と見積もられており、ヘリカルコイルの定常侵入熱が約 100 W であることから、この場合のヘリカルコイル出入口の平均温度は約 3.5 K まで低下できることになる。この改造による改善効果を定量的に調べるため、同一仕様の導体で製作されたモデルコイルを用いて過冷却ヘリウム中の冷却安定性試験を実施した。モデルコイルの冷却方式は、できるだけ実機を模擬するため低温排気圧縮機を用いた冷却システムを新しく準備した。モデルコイルは内半径が 200 mm で 24 列×12 層のレイヤー巻コイルであり、最大経験磁界がヘリカルコイルと同じである。導体間に等間隔で配置されている絶縁スペーサに挿入されたヒータによって局所的に常伝導部を発生させて、導体長手方向の電圧タップにより伝播の有無を判定した。飽和ヘリウム中では、電流値が閾値(動的な最小伝播電流  $I_{(mp)}$ )である 10.6-10.7 kA を超えると 1 ターン以内の片側伝播が始まり、さらに電流値を上げると 1 ターンを超えて低磁場領域までの片側伝播、両側伝播と回復、クエンチと変化した。片側伝播は LHD ヘリカルコイル

でも観測されており、その原因には超伝導線からアルミニウム安定化材に電流が転流する際に外部磁界を横切ることによる電磁現象が関与していると考えられている。また、1ターン以内で伝播が止まる原因は、導体の姿勢に伴う沸騰熱伝達の変化と考えられる。一方、過冷却ヘリウム中では、過冷却度に比例して  $I_{(mp)}$  が上昇し、3.5 K では 11.7 kA まで上昇した。ヘリカルコイルで常伝導伝播が発生している場所が3層目と推定されることを考慮すると、図 2.2-57 に示すように、LHD ヘリカルコイル内の温度を 3.5 K 程度に下げることによって 12 kA の励磁が期待できることになる。

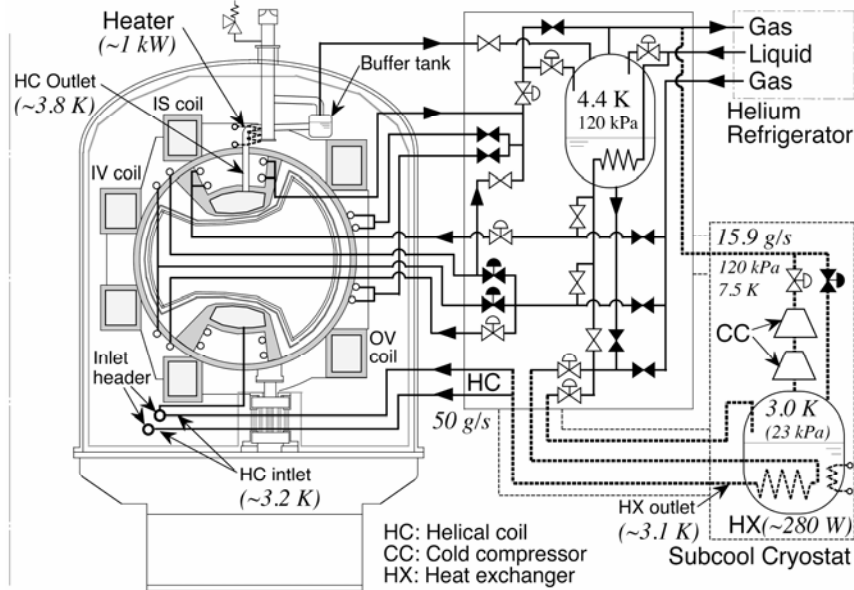


図 2.2-56 ヘリカルコイル冷却システムの過冷却改造

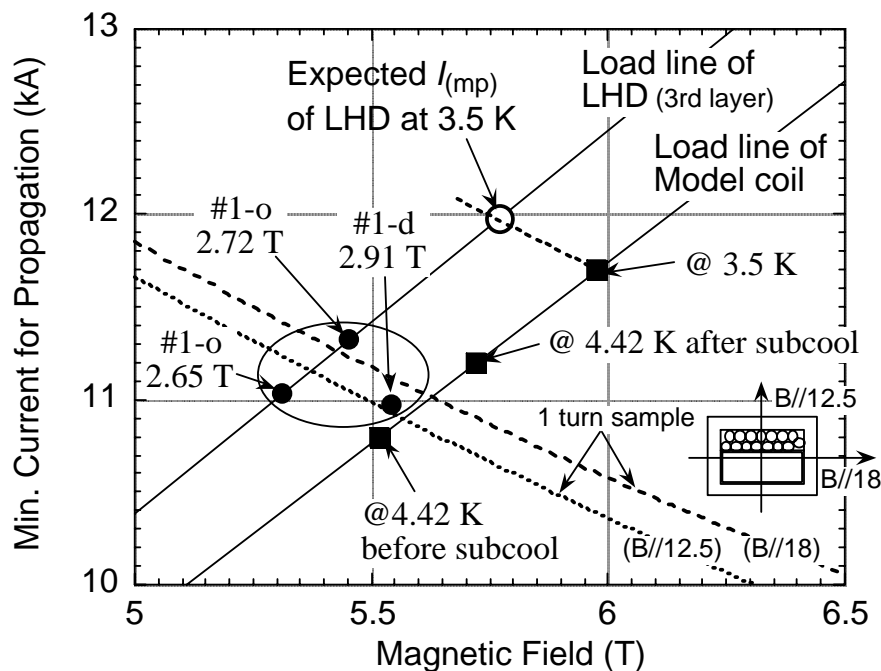


図 2.2-57 モデルコイルとヘリカルコイルの動的な最小伝播電流



第10サイクル実験前に、大型ヘリカル装置のヘリカルコイルの冷媒供給側に減圧熱交換器を追加する改造を実施した。まず、追加した過冷却システムの性能試験を行い、図2.2-58に示すように、ヘリカルコイルの入口と出口を各々3.2 Kと3.8 Kに低下させることに成功した。モデルコイルを用いた安定性試験では、最小伝播電流がサブクール度にほぼ比例して高くなる結果が得られており、低い温度を保持することが重要であるため、励磁に伴う温度上昇を評価した。図2.2-58から分かるように、励磁速度が速くなるほど、結合損失と構造物の渦電流損失が増大して温度上昇が大きくなる。評価の結果、通常の1/2の電流変化率3.5 A/sであれば、励磁に伴う発熱の約2/3がヒステリシス損失となり、11 kAまでの励磁においてもコイル出口温度を4.0 K以下に保つことができることを確認した。

ヘリカルコイル内部には温度計が設置されていないため、サブクールヘリウム冷却時の巻線部の温度を実測することができない。励磁試験前には、巻線部の温度はコイル出口温度よりも低いと考え、コイル出口を4.0 K以下に保持することによって「動的な最小伝播電流」は11.6 kA以上に高まると推測した。ところが3.5 A/sで11.0 kAまで励磁してすぐに、0.7 A/sで11 kA以上の高磁場励磁を試みたところ、11.4 kA付近において、コイル最上部付近から常伝導部の片側伝播が始まり、最も高磁場の内周赤道部で止まる現象が2回観測された。外周赤道部付近でも伝播速度が遅くなっており、冷却条件がコイル長手方向および断面内で不均一であることが示唆される。飽和ヘリウム冷却では、コイル最下部付近で常伝導伝播が始まり最上部付近で停止したことから、H-Iブロックへの気泡の集積による局所的な冷却の悪化が主要因と推察されている。過冷却ヘリウム冷却では、定常侵入熱によるコイル断面内温度分布に加えて、交流損失によってH-Iブロックの温度が局所的に高くなっている可能性がある。11 kAにおいて2時間以上保持した後に高磁場励磁を行うように励磁方法を変更してからは、11.5 kA相当までの励磁において常伝導伝播は観測されていない。現在、ヘリカルコイル内の自然対流を考慮した温度分布の解析を試みている。励磁速度と電流保持時間の最適化および締付励磁法の改良による高磁場励磁を計画している。

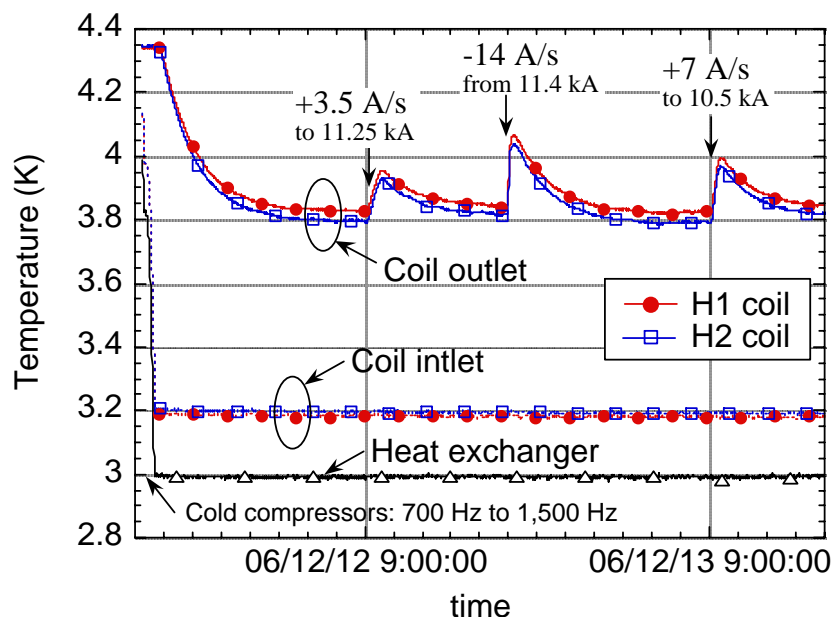


図 2.2-58 過冷却運転時のヘリカルコイル出入口の温度変化



#### (9) まとめ

装置工学実験では、大型超伝導コイルシステムの健全性、信頼性を確認する手法として、バランス電圧測定、ひずみ測定を継続的に行ってきた。システムの健全性が確認され、プラズマ実験に必要な磁場を提供することができた。また新たに音響(AE)測定を導入し、より正確に健全性を実証する研究を開始した。ヘリカルコイルの冷却安定性を改善するため、過冷却改造を実施し、計画どおりに、ヘリカルコイル温度を飽和温度 4.4 K から 3.8 K(コイル出口)まで低下させることに成功した。安定に高磁場励磁を行うためには、励磁に伴う交流損失による温度上昇に留意する必要があることが分かり、励磁方法の最適化を研究している。

大型超伝導コイルで初めて確認された残留磁場の変化は、コイルシステムの性能に影響を与えるものかどうか調査する必要がある。新しい電源制御技術は、プラズマの高性能化に直結する可能性があるため、早急な開発が望まれる。その他、コイル位置精度を評価する手法、並列流路の二相流ヘリウム冷却の最適化など新しい研究も開始された。

### 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。

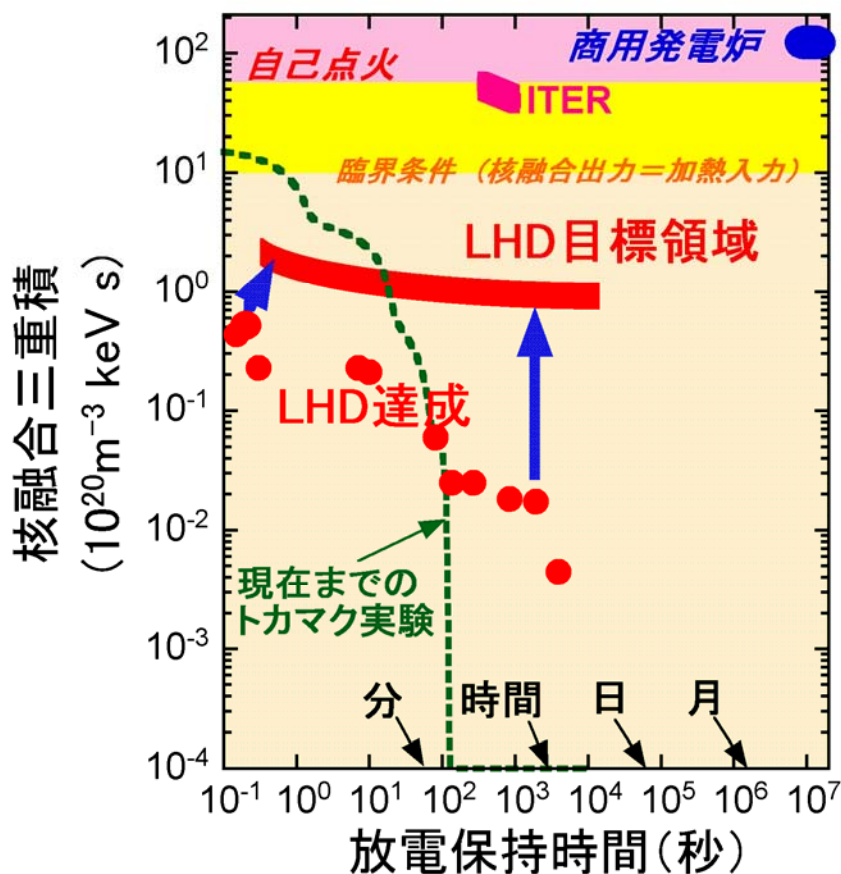


図 3.1-1 LHD で達成された核融合三重積と放電維持時間。ITER と LHD の目標領域を合わせて示す。

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<br>(1000万度)                              | 11    | 20   | 38   |
| エネルギー閉じ込め<br>時間 (秒)                            | 0.22  | 0.28 | 0.45 |
| 核融合三重積<br>( $10^{19}$ keV・秒・個/m <sup>3</sup> ) | 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      |

また、DT 実験を実施した大型装置である JET と TFTR から得られた、DT 実験時と DD 実験時のエネルギー閉じ込め時間の比較を行ったものが図 3.2-1 である。ここにおいても、燃料イオンの質量数を増加させることによって閉じ込め改善が図られることが示されている。

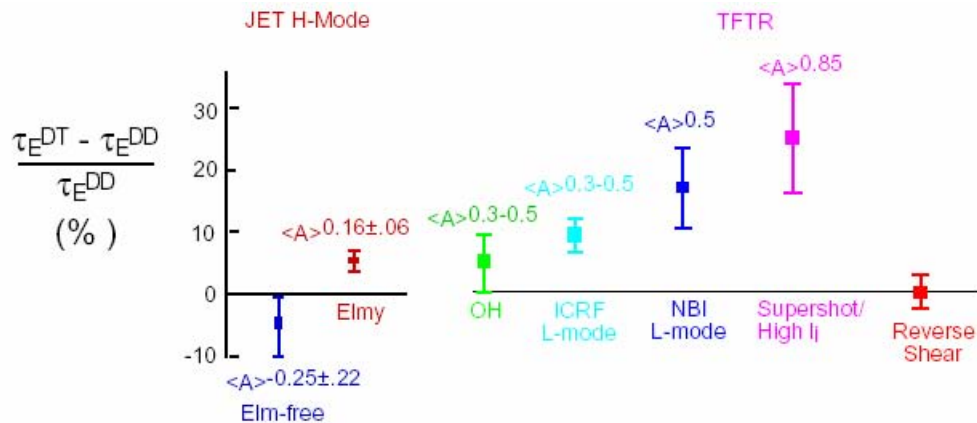


図 3.2-1 JET の H モードと TFTR における種々の閉じ込めモードにおけるエネルギー閉じ込め時間の増分の比較

これらの表・図に示されているように多くのトカマク実験で、異なる閉じ込めモードにわたって広く燃料イオンの質量数の増大(例えば、水素から重水素への転換)による閉じ込め改善が観測されており、次のようにまとめられる。

- 1) オーミック放電では線形閉じ込め状態よりも飽和閉じ込め状態において、燃料ガスの質量数  $A$  に対して、 $A^{0.5}$  程度のより強い依存性が見られる。
- 2) L モードよりも H モードの方が  $A^{0.3}$  から  $A^1$  へと、より強い依存性が見られる。
- 3) 反転磁場配位による内部輸送障壁を伴うような高性能プラズマでは質量比依存性は小さいようである。

以下に特徴的な個別の事例を述べる

### 3.2.1.2 オーミック加熱閉じ込め

オーミック加熱閉じ込めでは電子加熱が支配的であり、これまでのヘリカル系実験と類似した状況であると考えられる。

図 3.2-2 に ASDEX におけるオーミック加熱プラズマの電子密度および電子温度分布を示す。同様の電子密度に対して重水素プラズマの場合、より高い電子温度が得られ、閉じ込めが改善されていることが分かる。さらに、端部でのより低い電子密度、そして電子密度分布の尖塔化が見られる。

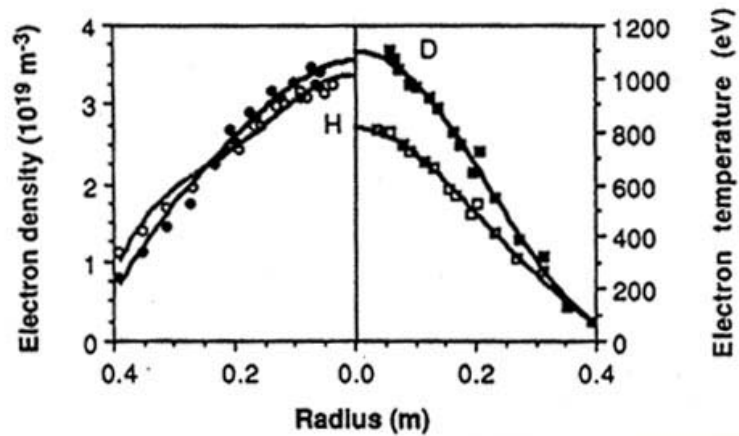


図 3.2-2 ASDEX における水素(白)および重水素(黒)を用いたオーミック加熱プラズマの電子密度(左)、電子温度(右)分布

図 3.2-3 に、同じく ASDEX のオーミック放電におけるエネルギー閉じ込め時間の密度依存性を示す。オーミック放電ではアルカトール則で記述される密度に比例する状態が低密度領域で観測され、これが高密度で飽和している。重水素を用いると、この閉じ込めの飽和状態が大きく改善されていることが分かる。さらにペレット入射によっても、飽和状態が劇的に改善されている(破線)。これらの事実は、イオンの伝導損失の役割が重要であることを示唆している。

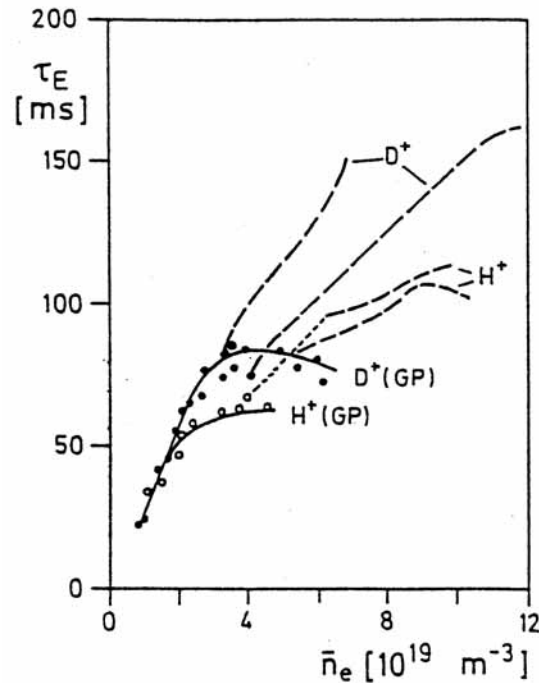


図 3.2-3 ASDEX のオーミック放電におけるエネルギー閉じ込め時間の密度依存性。



### 3.2.1.3 Lモード

図 3.2-4 に ASDEX におけるバルクプラズマと NBI の水素、重水素の組み合わせ実験結果を示す。これによると、水素プラズマへの水素ビーム入射時が最も閉じ込めが悪く、重水素プラズマへの重水素ビーム入射時が最も閉じ込めが良い。同位体効果が足し算で現れている。しかし、この同位体効果はオーミック加熱時よりも緩やかである。Lモード閉じ込めはボーム的であり、そこではラーマー半径効果の弱い長波長の乱流が支配的であることが示唆されていることに留意する必要がある。

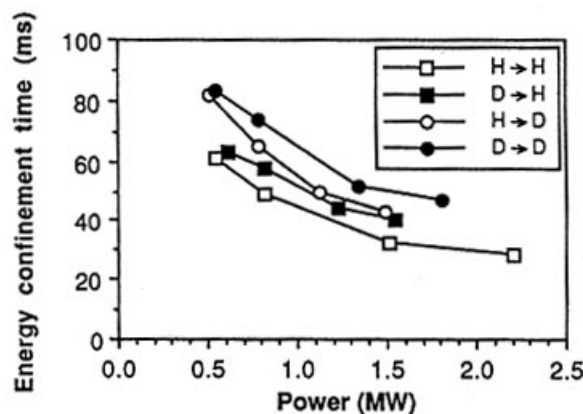


図 3.2-4 ASDEX における NBI 加熱された L モードプラズマのエネルギー閉じ込め時間の加熱パワー依存性

次に TFTR での角運動量(トロイダル回転)の輸送をしてみる。図 3.2-5 に角運動量の輸送係数をモデルと比較したものを示す。ここで、スケーリングモデルは

$\chi_{\phi, scale} \propto P^{0.65} n^{-0.73} l_i^{0.65} A^{-0.8}$  と記述される。観測された角運動量輸送係数は  $A^{-0.8}$  という強い

質量比依存性を示した。さらに図 3.2-6 に示されるように、この角運動量閉じ込めとエネルギー閉じ込め時間の間に強い相関があることが分かった。トカマクの L モードにおいてはイオンの熱伝導損失が主たる損失機構であり、角運動量の輸送がイオンの熱輸送と関係していることが示唆されている。

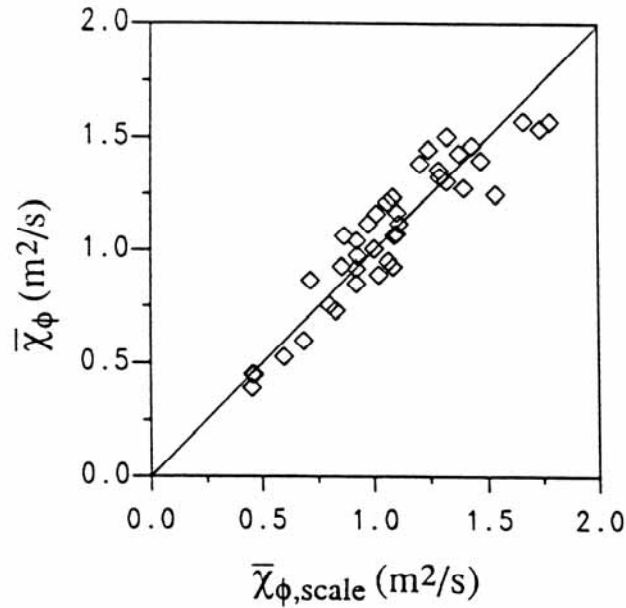


図 3.2-5 トロイダル角運動量輸送係数のスケージングと実験値の比較

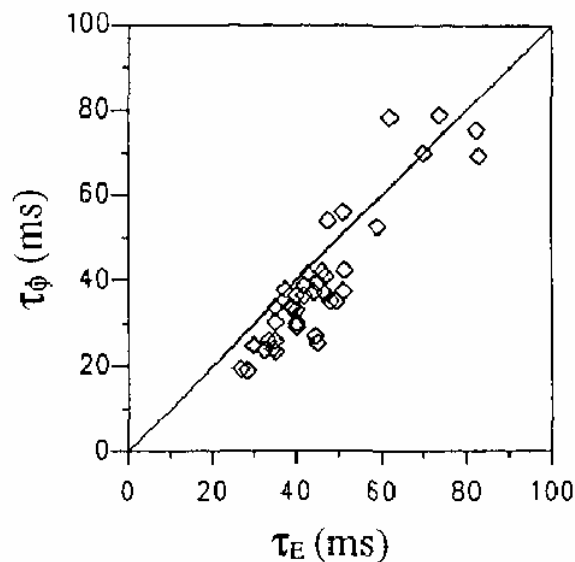


図 3.2-6 トロイダル角運動量閉じ込め時間とエネルギー閉じ込め時間の相関

#### 3.2.1.4 Hモード

トカマクプラズマの、Hモードにおけるエネルギー閉じ込め時間のスケージング則はジャイロボーム的である。ジャイロボーム拡散を仮定すると、ラーマー(ジャイロ)半径が質量の平方根に比例するため、熱輸送係数が  $A^{0.5}$  の依存性を持つこととなり、重水素の方が水素よりも1.4倍程度閉じ込めが「悪く」なることが予想される。

しかしながら、JETにおける三重水素までを用いた実験によって、熱化プラズマのエネルギー閉じ込めは、図 3.2-7 に示すように  $A^{0.16 \pm 0.06}$  の、弱いながらも質量に対して正の依存性をもつことが示されている。

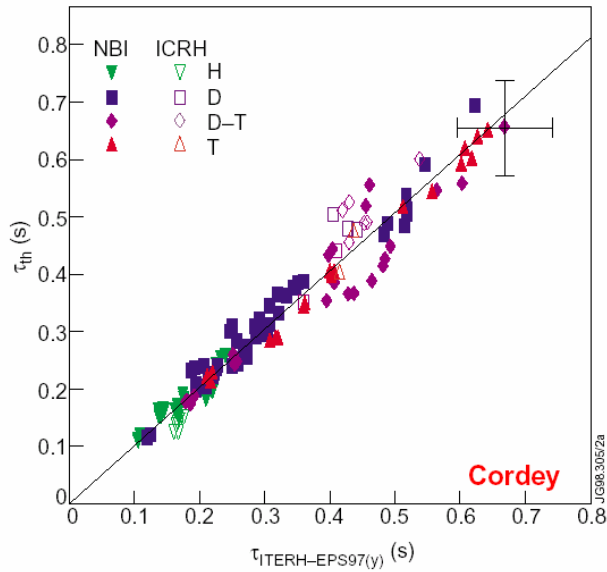


図 3.2-7 JET における燃料ガスを変えた場合のエネルギー閉じ込め時間

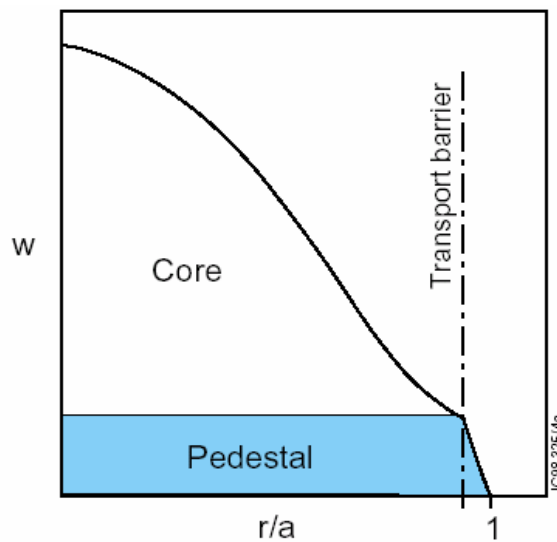


図 3.2-8 圧力分布を H モードに固有なペDESTAL部とその上のコア部に分けて考える。

さらに、H モードにおいて特徴的なことはペDESTAL部において、同位体効果が顕著なことである。図 3.2-8 に示すように、H モードに固有なペDESTAL部とその上のコア部に閉じ込めを分けて考える。図 3.2-9 に JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーを示す。水素から重水素、三重水素と同位体質量が大きくなるにつれ、蓄積エネルギーは増大し、 $W_{ped} \propto A^{0.96}$  と、ほぼ質量に比例して閉じ込めが改善されている。図 3.2-10 にあるように  $W_{ped}$  は  $BT^{0.5}A^{0.5}$  でスケールすることができる。

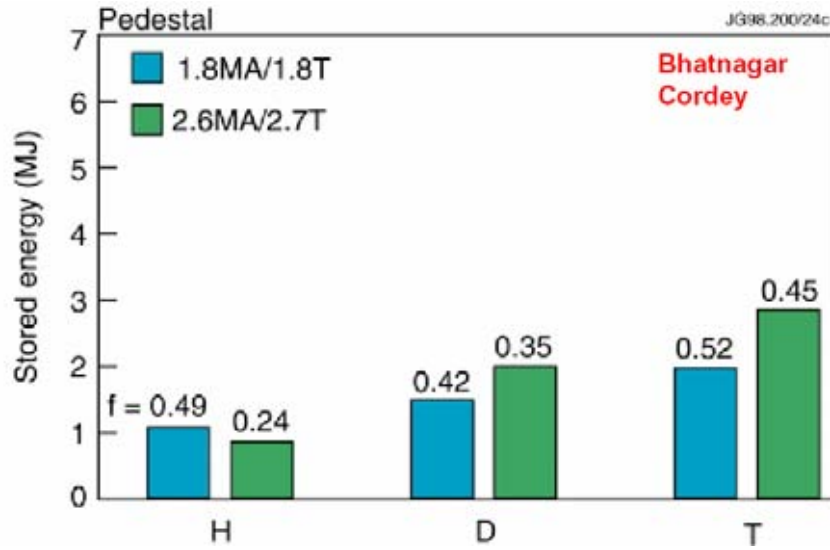


図 3.2-9 JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーへの同位体効果

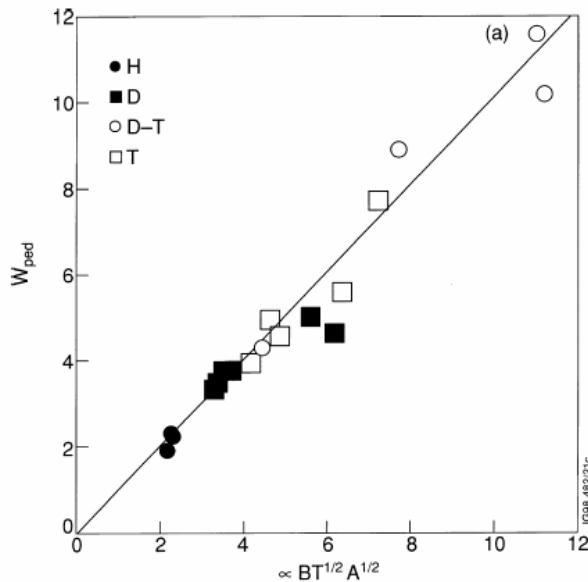


図 3.2-10 JET におけるペDESTAL部の蓄積エネルギーのスケーリング表現との比較

一方、コア部においては、図 3.2-11 に示すように  $\chi_i \propto A^{0.73 \pm 0.04}$  と評価されるイオンの熱輸送係数の劣化が見られ、コア部の熱化成分の閉じ込めは  $\tau_{th,core} \propto A^{-0.17 \pm 0.1}$  と評価される (図 3.2-12 参照)。このようにコア部ではジャイロボームの描像と矛盾しない結果となっている。

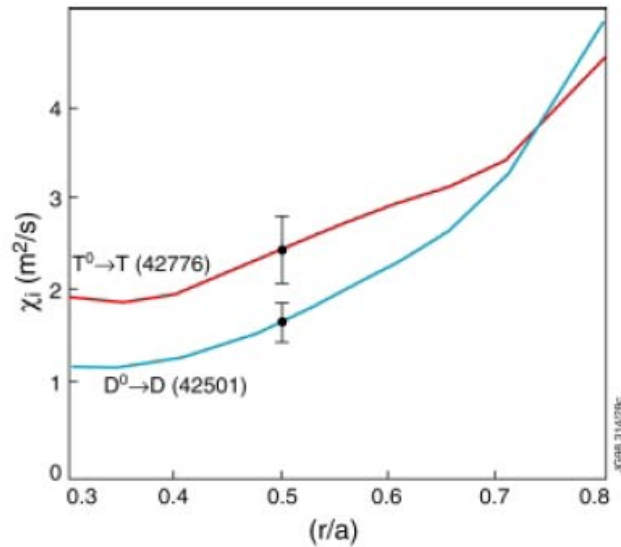


図 3.2-11 JET におけるイオン熱伝導係数の径方向分布

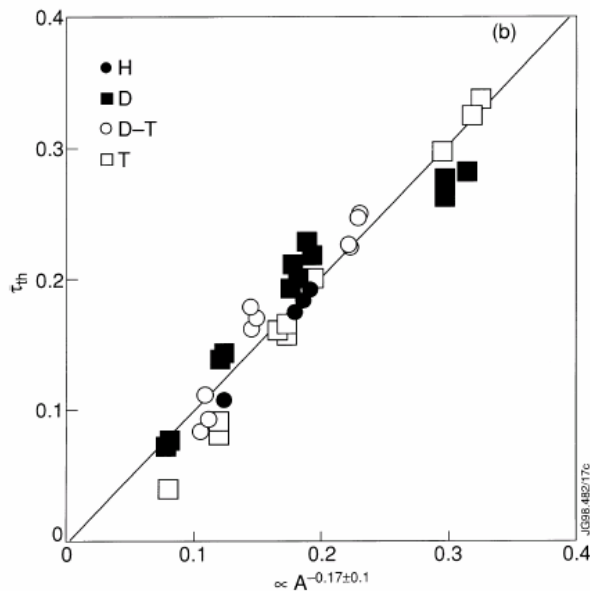


図 3.2-12 JET におけるコア部のエネルギー閉じ込め時間のスケールリング則との比較

H モードのエネルギー閉じ込めについてまとめると、ペDESTAL部では質量比に見られる同位体効果による改善が顕著であり、コア部については質量比がやや弱い劣化をもたらすということである。結果として、この両者が相殺し、全体の閉じ込めは質量比に対して緩やかな改善を示すことになっている。

図 3.2-13 に燃料ガスを変えた場合の ELM の波形を示した。ペDESTAL部における顕著な同位体効果は、この ELM 周波数の低下とそれによるエネルギー損失の抑制によるものと考えられている。これはバルーニング不安定性に対する有限ラーマー半径による安定化効果が、ラーマー半径の大きい、より重い水素同位体の方が有効であるためと考えられている。

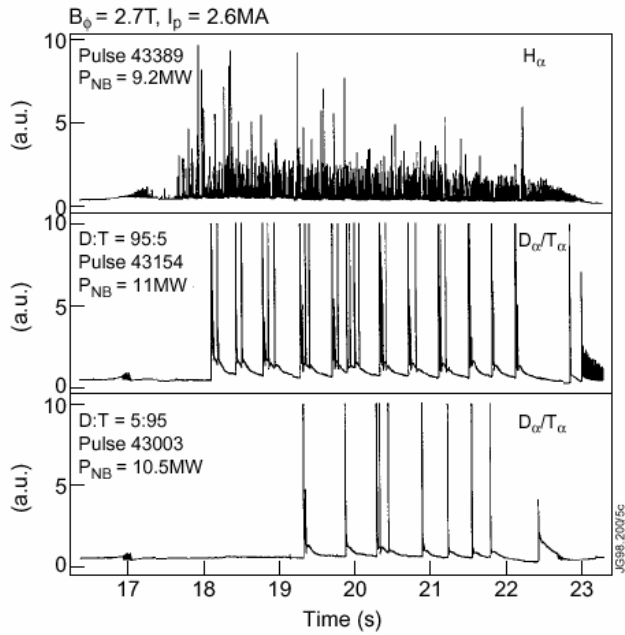


図 3.2-13 JET における ELM 波形

さらに、H モードにおいて顕著な同位体効果は、H モードへの遷移の閾値パワーの軽減である。図 3.2-14 に示すように、H モードへの遷移に必要な加熱パワーは質量比に反比例して少なくなる。

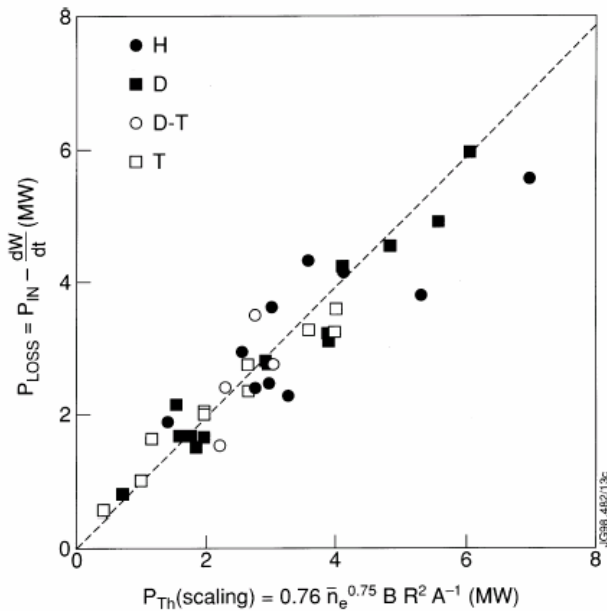


図 3.2-14 JET における H モード閾値パワーのスケーリング表現との比較

同様の結果が、ASDEX や DIII-D など多くのトカマク装置で確認されている。ここでも L モードで見られたような質量の加算効果が見られている。重水素プラズマでは閉じ込めの改善によって周辺部の温度が高くなり、それが閾値パワーの軽減をもたらしていると理解されている。また、ELM 周波数の低下も関連していると考えられている。

### 3.2.2 ヘリカル系における閉じ込め改善について

ヘリカル系では、重水素による同位体効果について、W7-AS において精密な比較実験が行われている。図 3.2-15 に典型的な ECH 放電を示す。ここでは、リサイクリングの影響を避けるため、重水素化したボロナイゼーションによる壁コンディショニングを行っている。運転密度と加熱パワーを正確に調整し、同じ条件での放電を比較した。蓄積エネルギーが重水素によって 2 割程度上昇することが観測され、重水素による閉じ込め改善があることを実証した。

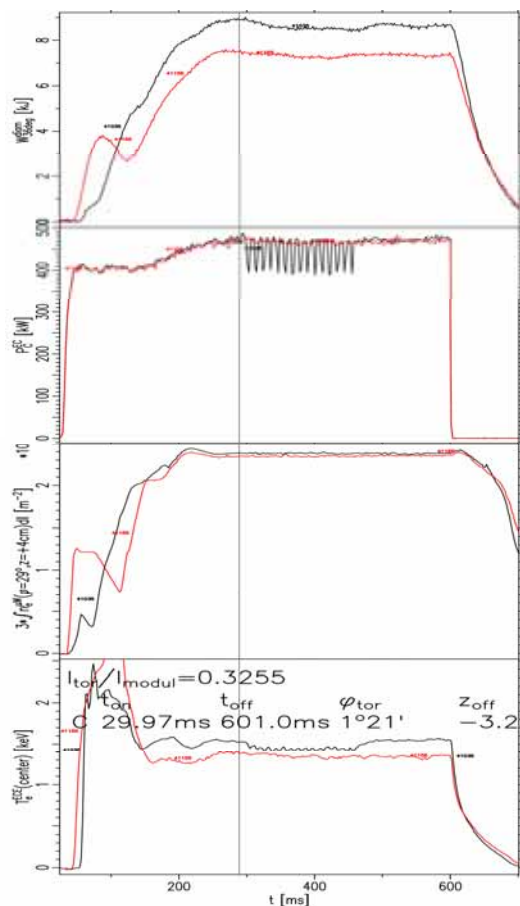


図 3.2-15 W7-AS における ECH 加熱された水素 (赤) および重水素 (黒) 放電の波形。上から蓄積エネルギー、ECH 加熱パワー、線密度、中心電子温度を示す。

W7-AS では、NBI 加熱時に発生する高密度 H モードについても重水素の効果を経験的に調べている。図 3.2-16 に蓄積エネルギーの密度依存性を示す。水素の場合は  $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  を越えるところで、蓄積エネルギーが大きく不連続に上昇して閉じ込め改善モード (高密度 H モード) が発現する、いわゆる遷移現象が明確に見られる。一方、重水素の場合は  $1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  以下の密度において、明らかに水素放電より高い蓄積エネルギーが実現された。しかし、この場合、高密度 H モードへの明確な遷移が観測されていない。これは、重水素と水素プラズマにおいて、閉じ込め改善に関わる特性が異なることを示す例となっている。



る。

ここで注意したいのは、W7-AS において重水素と水素の違いが明確に見えるのは、磁気島によってプラズマ境界が規定される場合であり、リミター配位やNBIの高パワー加熱時においてリサイクリングが大きくなる場合は、その差異が明瞭でなくなることである。これらは、周辺部での原子過程が原因となっていること、そしてその影響がコアプラズマに及ぶことを示唆しており、粒子制御の重要性を喚起している。

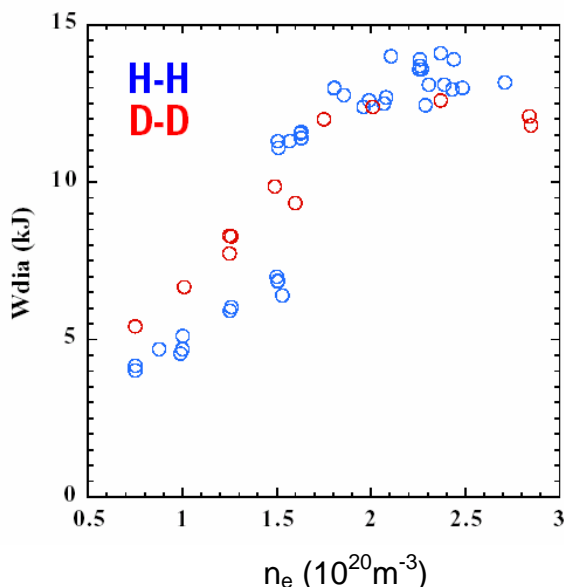


図 3.2-16 W7-AS における蓄積エネルギーと密度の関係。NBI加熱パワーは1 MW

また、Heliotron E および ATF においても小規模ながら、重水素プラズマ実験が行われている。そこで得られたエネルギー閉じ込め時間を、同様な条件での水素プラズマと ISS95 則を元に比較したものが図 3.2-17 である。

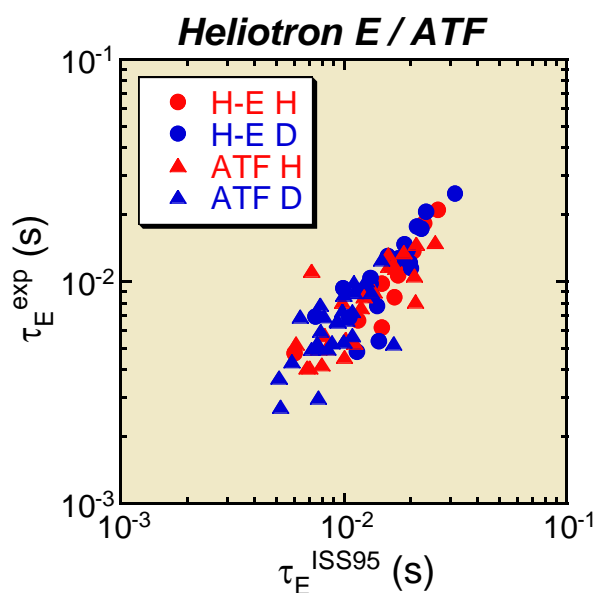


図 3.2-17 Heliotron E と ATF でのエネルギー閉じ込め時間の重水素・水素の比較

また W7-AS での NBI 放電について、重水素ビームの加熱吸収パワーの算定が仮の予備的なものであるが、図 3.2-17 と同様にエネルギー閉じ込め時間について W7 スケーリングを元に比較したものが図 3.2-18 である。

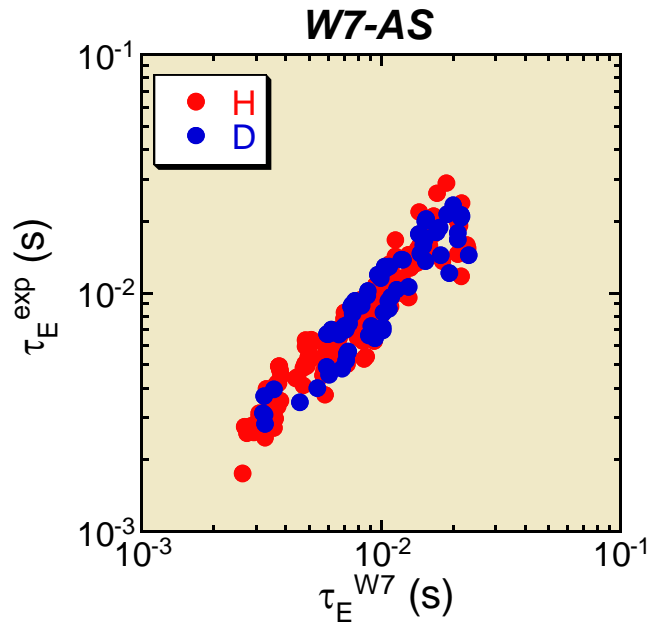


図 3.2-18 W7-AS におけるエネルギー閉じ込め時間の水素、重水素プラズマの比較

これらの実験結果をスケージング則からの閉じ込め改善度として、まとめたものが図 3.2-19 である。これからは、重水素により、Heliotron E および ATF では小さいが、同位体効果があることが示唆されるが、W7-AS では明瞭な差があることを示してはいない。

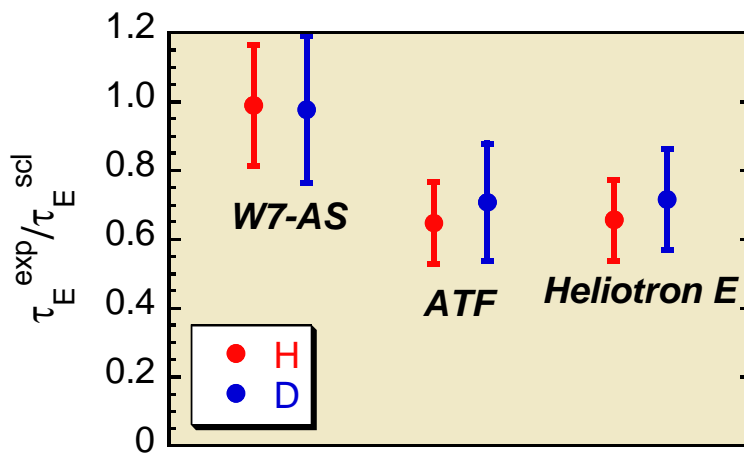


図 3.2-19 ヘリカル系におけるエネルギー閉じ込め改善度の比較

ここで、エネルギー閉じ込め時間は確かにプラズマ性能を端的に示すスカラー量ではあるが、この0次元の量はさまざまな物理現象が複合して投射された結果であり、また、スクエリング表現では扱えない物理を反映した、ある分散を伴っている。したがって、輸送を司る現象を一意的に表すものではないことに注意しなければならない。

ヘリカル系においても、図3.2-15および図3.2-16に示したように、水素と重水素プラズマでの輸送特性には明確な差異を示す実験結果がある。一方、エネルギー閉じ込め時間に縮減して統計的に見ると明瞭な差異がデータ分散の中に隠れてしまうことがあり、この一見矛盾した結果を解きほぐすことが課題である。LHDにおける重水素実験においても、水素プラズマとの多様な差異が観測されると予想され、これらを矛盾なく説明する物理モデルの構築が、将来の核燃焼実験の予測のために必要不可欠である。

### 3.2.3 閉じ込めに関するまとめ

同位体効果はトカマク実験においてあらゆる運転領域で見られている。その質量比依存性は  $A^{-0.2}$  から  $A^1$  と幅広く、プラズマ端部からコアまで全ての閉じ込め領域に影響している。同位体効果は確実かつ強固な性質であり、プラズマ端部における原子過程だけによって起こるものではない。一方、大型装置や、小型装置であっても粒子制御の良好な状態において、その効果がより明瞭となる傾向があり、これはプラズマ周辺部における原子過程が一因とはなっていることを示しており、この効果がコアプラズマへ及ぶことも示唆している。

トカマク、ヘリカル系を問わず、環状プラズマにおいては、輸送係数が規格化ラーマー半径に比例して大きくなるいわゆるジャイロボーム型の輸送が基本的な輸送過程であると考えられている。そこでは、質量  $A$  に対してエネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  は  $A^{-0.2}$  の依存性を示し、重水素では若干の閉じ込め劣化が予想される。実際、大型トカマクにおける軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験で矛盾ない結果が得られている。これらは特にコアプラズマについて当てはまる事実であるが、ヘリカル系では未確認である。

同位体効果が最も顕著に現れるのがトカマクの H モードである。トカマクでは閉じこめ境界に障壁が形成される H モードにおいて、その遷移に必要な加熱パワー閾値が  $A^{-1}$  の依存性を示す。つまり、重水素実験条件では軽水素実験条件の半分の加熱パワーで H モード遷移が発生する。さらに H モードのペDESTAL部の圧力および幅が  $A^{0.5}$  即ち、イオンのラーマー半径に比例する実験結果がある。重水素実験では軽水素実験時よりも H モード時の ELM 周期が長くなるのが、これらと関連していると考えられている。H モードについてのトカマク実験からの知見を整理すると、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも、(a)低い加熱パワーで遷移を起こし、(b)ペDESTALの圧力、幅とも大きくなり、(c)ELM 周期が長くなる。結果的にペDESTAL部で稼ぐ蓄積エネルギーは  $A^{0.5}$  に比例することになり、全体のエネルギー閉じこめに対する同位体質量効果は  $A^{0.41}$  として現れる。

ヘリカル系においても W7 - AS の実験から、エネルギー閉じ込め時間や閉じ込め改善モードの遷移特性に差異が観測されている。

このように、質量による同位体効果は多種多様な実験でその存在が広く認められている普遍的な性質である、一方、実験および理論に未解決として課された課題も大きい。

これらの知見から、LHD の重水素実験に当たって、考えられる留意点として以下の3点が

あげられる。

- (1) 質量比効果はイオンの熱伝導損失に与える影響が大きい。電場を介した異常輸送の低減との関連もある。
- (2) 角運動量の輸送に与える影響が大きい。電子熱伝導損失が支配的な系、プラズマの回転が仕事をしにくい系、MHDが限界を決めていない系では同位体効果が出にくい可能性がある。また、ゾナルフローなどの流れのシアへの影響に注目しておく必要がある。
- (3) LHDはプラズマ径が大きいので、コア部での原子過程の役割は小さいが、周辺プラズマでの原子過程の影響(放射損失や荷電交換による運動量損失など)を抑制する良好な粒子制御を実現することが、好ましい同位体効果を促すと考えられる。

そこから、演繹される戦略としては、プラズマの回転を利用した閉じ込め改善モード、イオン加熱が有効な実験条件が重水素実験の前提、という観点が重要となる。

### 3.3 実験シナリオ

将来の核融合炉では重水素・三重水素が燃料として用いられるのに対して、LHDでは軽水素あるいはヘリウムのみを用いるプラズマ実験をこれまでに10年間実施してきた。LHDにおける重水素実験は核融合反応そのものを研究対象とするのではなく、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および要素技術の実証を行うことが役割を担う。

これまでに集積された実験データは大型トカマク実験と比較・対照できるレベル(物理パラメータの差異が1桁以内)に達している。そこでは多くの科学的な知見が蓄積されてきており、今後さらにヘリカル系核融合炉を見通すために研究の統合化を図っていくことが中長期的な目的となる。このためには、プラズマの特性を核融合炉条件へ外挿できるモデルを確立することが必要であり、そこでは、できる限り核融合炉条件に近い実験データの集積を図ることが求められる。そのため、プラズマ性能の向上を図るとともにプラズマ燃料の同位体効果を把握することが本質的な課題と位置づけられる。

重水素実験においては、LHD実験の最終目標とされるプラズマ性能の達成が目的となる。  
すなわち

- 1) 密度  $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  において中心温度 10keV を越える高温高性能プラズマを生成維持する。
- 2)  $10^{20} \text{m}^{-3} \text{s keV}$  を越える核融合三重積を達成し、内部輸送障壁を利用した超高密度プラズマによってさらに伸長を図る。
- 3) 磁場 1T においてベータ値 5% を達成し、さらに高磁場化による性能向上を進める。

の3点が目標となる。

目標1)について言えば、重水素の利用により閉じ込めが33%向上すれば、装置工学的に十分耐用性のある、磁場 3T、25MW の加熱吸収パワーによって達成されることが予想される。一方、この閉じ込め改善がない場合は、加熱パワーでは 50MW を必要とする。あるいは

は 25MW の加熱時に磁場を 4.2T に増強しなければならない。加熱パワー50MW および磁場 4.2T は装置工学上の仕様を越えており、実現することは極めて難しい。したがって、閉じ込め改善が目標を達成するために必須である。

プラズマ燃料として重水素を用いる実験では中性子や  $\alpha$  線の発生を伴うため、それらの計測機器への影響や、実験条件の転換にかかる作業への制約、そして現実的かつ段階的な設備整備の観点から、実験計画の初期段階においては軽水素のみを用いた基礎実験を遂行することが適当である。現在の核融合炉開発のための高温プラズマ研究は重水素・三重水素(DT)反応を目標としており、基礎実験から得られた理解を応用していく段階として、軽水素を用いた現在の実験の次に核融合プラズマ条件により近い燃料である重水素を用いた実験を志向することが理にかなっている。

また、後述するように、重水素を用いることによって閉じ込めが改善することが期待され、これによって装置設備が現有のままでも、より高性能なプラズマを研究対象として手にすることが可能である。大型トカマク実験を中心に核融合プラズマ実験では世界的に重水素が用いられているのはこのためである。閉じ込め性能を代表する核融合三重積(温度、密度、エネルギー閉じ込め時間の積)で見ると、重水素の利用によって多くのトカマク実験で見られているように閉じ込め性能が50%向上すれば、2倍以上の改善が得られることとなる。さらに、主要な加熱装置である中性粒子入射(Neutral Beam Injection, 以下 NBI と記す)装置の増強を、重水素を用いることによって効果的に行うことができる。このように上記の吸収加熱パワー25MW の確保と重水素の利用は相乗的に LHD 実験計画の飛躍的な進展に直接つながるものである。

したがって、現在得られつつある物理的理解および実験設備整備の基盤の上に、核燃焼プラズマを扱う次段階の研究計画を見据えるためには、LHD における重水素実験の遂行により、プラズマの高性能化を図り、閉じこめ物理の質量依存性(同位体効果)を明らかにして、DT プラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築することを最重要課題として位置づけ、これに取り組むことが是非とも必要である。この結果として設計が可能となる、次段階の、DT プラズマを対象とした研究計画は土岐サイトで実施するものではない。

加えて、実験計画の策定に当たっては、世界に類のない実験環境を提供する共同利用装置としての位置付けから、実験機会の増大、具体的には放電回数をできる限り十分に確保するという観点も重要である。

### 3.3.1 重水素実験の課題と予想される成果

重水素の利用により、大きく3つの結果が生まれる。

磁場閉じ込めの根本的な要素にラーマー運動があるが、重水素イオンのラーマー半径が軽水素イオンのそれと比較して $\sqrt{2}$ 倍大きいことが輸送機構に多様に作用する。この他にも原子過程や化学反応にも質量の違いが影響を与え、これらの基礎物理過程に同位体効果という視野の拡大が生じる。結果として閉じ込めおよびMHD安定性の改善に繋がるものと期待されると同時に、三重水素の振舞いに対する予測精度が飛躍的に高まる。

さらに、質量の異なった軽水素と重水素を混合することにより、イオンサイクロトロン共鳴(ICRF)加熱の選択枝が拡大されプラズマ加熱の効率化を図ることができる、NBI の重水素

化により高い中性化効率を利用して、高エネルギー化、ひいては加熱パワーの増力を行うことができる、などの実験手法の拡大をもたらす、研究の多様性を生む。

以上の観点からの課題と予想される成果を以下に整理する。

#### (1)閉じこめの改善

トカマク、ヘリカル系を問わず、トロイダルプラズマにおいては、輸送係数が規格化ラーマー半径に比例して大きくなるいわゆるジャイロボーム型の輸送が基本的な輸送過程であると考えられている。ジャイロボーム型の輸送モデルでは質量  $A$  に対してエネルギー閉じ込め時間は  $A^{-0.2}$  の弱い依存性を示し、重水素では若干の閉じこめ劣化が予想される。大型トカマクでは、軽水素、重水素、三重水素を用いた比較実験によって、プラズマ中心部についてはこれを支持する結果もある、一方、輸送係数が質量  $A$  の平方根程度で逆に改善されるという結果もある。さらにプラズマの閉じ込め性能そのものは中心部の局所的な性質だけに支配されるものではないことに注意が必要である。以下に述べる構造形成が関わる。これらの性質を基本的なところから明らかにしていく必要がある。

トカマクでは高い加熱パワー入力条件でプラズマが自発的に遷移を起し、輸送障壁を形成することが知られており、ヘリカル系でも類似の現象が観測されている。

トカマクでは閉じ込め境界に障壁が形成されるHモードにおいて、その遷移に必要な加熱パワー閾値が  $A^{-1}$  の依存性を示す。つまり、重水素実験条件では軽水素プラズマ条件よりも半分の加熱パワーでHモード遷移が発生する。

HモードのペDESTAL部の圧力および幅が  $A^{0.5}$  即ち、イオンのラーマー半径に比例する実験結果がある。

Hモード時のELM周期は重水素プラズマの場合、軽水素プラズマよりも長くなる。

Hモードについてのトカマク実験から得られた知見を整理すると、重水素プラズマは軽水素プラズマよりも、(a)低い加熱パワーでHモード遷移を起し、(b)ペDESTALの圧力、幅とも大きくなり、(c)ELM周期が長くなる。結果的にペDESTAL部で稼ぐ蓄積エネルギーは  $A^{0.5}$  に比例することにより、全体のエネルギー閉じこめに対する同位体質量効果は  $A^{0.41}$  として現れる。すなわち、周辺部で温度密度が上昇し、中心部の若干の劣化があっても、総和として閉じ込めが大きく改善する。

トカマク実験では内部輸送障壁についてもHモードと類似した性質が観測されている。

以上のことから、LHD実験において特に肝要なことは以下の点である。

ヘリカル系においても基本的な閉じこめ性質がジャイロボーム的であり、ペDESTALの形成も観測されている。しかしながら、同位体質量効果は未確認である。重水素を用いた実験により閉じ込めの改善が期待され、またその結果をトカマクで得られた知見と比較検証することはトロイダルプラズマの包括的理解即ち外挿性の高い理解を得るために極めて重要である。

ヘリカル系特有の閉じこめ改善方法として新古典拡散による電場を利用するものがある。重水素を用いることにより、電子ルートへの遷移が起こりやすくなる。生じた電場がイオンの閉じこめを改善することが期待される。

閉じこめ改善の実現は、同じ加熱パワーに対して、プラズマパラメータ領域が高温、高密

度領域へ飛躍的に拡大することを意味しており、経済的・効率的な戦略である。

## (2) MHD 安定性の改善と安定性限界への試み

トカマクではHモードペDESTALの圧力勾配がballooning modeで決まっており、重水素を用いることにより、より安定化される(上記記述部分に関連)。

アルフベン固有モードについては、中性粒子ビームエネルギーが同じであればアルフベン速度、ビーム速度ともに  $A^{0.5}$  で遅くなるので、重水素を用いても変化はないと考えられが、重水素ビームの採用によりビームエネルギーを高くすることができれば、不安定化されやすくなる。特徴周波数が  $A^{-0.5}$  に比例しており、重水素では下がるため、計測精度および理論との比較研究の向上が期待できる。

現在のヘリカル系実験でのベータ限界はMHD特性よりもエネルギー閉じ込め時間と加熱パワーの積で決まっている。重水素実験により、閉じ込め改善と加熱パワーの増大を図ることができるので、ベータ値の増加を図り、MHD安定性によるベータ限界へ近接し、MHD安定性が運転領域限界を規定すると予測される条件での実験研究が可能となる。

## (3) 加熱実験手法の拡大

NBIの加熱パワーを増大するには加速電圧を上げる(高エネルギー化)が効率的であるが、その場合シャインスルー損失が問題となる。これは高い温度達成を指向した低密度運転において深刻である。重水素を用いれば荷電交換断面積が倍増するので加熱パワーを倍増させても同じ吸収効率を確保できる。

NBIに重水素を用いることにより、ピッチ角散乱を起こす臨界エネルギーが増えるため、同じエネルギーに対してイオンに吸収されるパワーが増大する。ビームのエネルギーと電子温度の比が30程度の場合、イオン加熱パワーは軽水素の場合、全体の1/4であるが、重水素の場合は1/3となる。また、軽水素プラズマへの重水素ビーム入射ではこの比は1/2に達する。このように、現状では電子加熱が支配的であるという拘束を同等のイオン加熱が行われる条件へ大幅に緩和することができる。

イオンサイクロトロン加熱は、軽水素マイノリティでの条件で行われる。マジョリティとして、ヘリウムを用いることも可能であるが、スパッタリング軽減のため重水素を用いることが望ましい。また  $\text{He}^3$  マイノリティ、重水素マジョリティの組み合わせも可能となる。

## (4) 水素同位体と壁との相互作用

燃料ガスとなる水素および重水素は、プラズマ周辺部から低エネルギーのイオン、あるいは比較的高エネルギーの荷電交換中性粒子として流出、対向壁に入射し、一部は固体壁中に蓄積する。水素同位体の対向壁面でのリサイクリングとそのプラズマ性能への影響を明らかにすることはプラズマ・壁相互作用研究の課題となる。これらリサイクリングと蓄積の挙動には質量比による同位体効果があることが知られており、興味深い研究対象である。



### 3.3.2 重水素実験に取り組む際の方針

#### (1) NBIの高エネルギー化による加熱パワー増大

前述したように、重水素実験に伴って加熱パワーを増強し、吸収パワーを25MWとすることが目標の達成の手段として求められる。

重水素ビームはプラズマ中での吸収効率が高いため、加速電圧を増やして高エネルギー化を図っても、加熱効率を劣化させることはない。あるいは、加速電圧を上げなければ、ビームがプラズマの中心まで届かず、有効な加熱が得られないということになる。すなわち、加速電圧の増強によって、加熱パワーを増大しつつ、軽水素と同様の加熱吸収効率を得られることが期待される。このためには電源の増強とイオン源の改造が必要となるが、パワー増強の効率的な手段たりえる。

また、重水素実験で発生する中性子およびトリチウムの多くは重水素ビームと重水素プラズマの間の核融合反応によるものであり、この量は入射エネルギーと共に増加する。したがって、NBIの重水素化を図るに当たって、必要とされる技術開発要素、設備投資、および発生する中性子・トリチウムの量と、期待される効果のバランスを最適化することが必要である。

この最適化にあたり、考慮すべきことは比較的低エネルギーの垂直入射NBIの採用である。LHD実験計画当初は、ヘリカル系に特有な捕捉粒子の振る舞いを懸念し、損失の少ない、環状のプラズマに対して接線方向からの入射を採用した。このためプラズマ中のビーム経路が長くなり、中心まで加熱を行うために高い加速電圧が必要となった。また、接線ポート径の制約から収束がよいイオン源が必要なことから、180keVの負イオン源からなる設計がなされ、現在3ビームラインで14MWの入射が行われている。そして、従来の重水素化案ではこれらについて250keV程度に増強することとされていた。

この10年間の実験研究の進展に伴い、磁気軸を内寄せすることによる新古典拡散の最適化配位が、そこで心配されたMHD不安定性の影響が深刻なものでなく、プラズマ自身の閉じ込め及び、ICRFによって生成された高エネルギーの捕捉粒子の閉じ込めに優れていることが明らかになった。これはLHD実験で得られた顕著な成果である。つまり、NBIの入射方向が接線方向であるという制約は排除して考えてよいと判断されるに至った。

さらに、接線入射NBIは加速電圧が高いため、その加熱パワーの大部分がターゲットプラズマの電子に吸収される。核融合条件では核融合で生じたアルファ粒子による加熱が同様に電子に対してもっぱら起こることに対応してはいるが、イオンの閉じ込め物理を研究するため現段階の実験にあっては必ずしも望ましい状況とは言えない。加速電圧を電子温度の15倍程度までに抑えれば、NBIの加熱パワーをターゲットプラズマのイオンに付与することができる。これは現在のLHDでは40-80keV程度に対応し、もし接線入射であれば、その長い経路長によって周辺部にしかビームは侵入できない。しかし、垂直方向へ入射することができれば、この程度の低いエネルギーでも、プラズマ中心を加熱することが可能である。

また閉じ込め改善の観点から、プラズマ中心部への高エネルギーの粒子補給を取り入れるべきであり、電流の大きなNBIを採用することが望まれる。

垂直入射ビームの加速電圧は接線入射に比べて低く設定することになり、正イオン源を採用することになる。この場合、重水素化によってイオンビームから中性粒子ビームへの変換効率が改善し、加熱パワーを向上させることが容易となる。負イオン源の場合はこの変換

効率は水素と重水素で変わらない。

これらの検討結果により、NBIの加熱パワーの増強は垂直入射NBIを進めることとし、実際、平成17年度の第9サイクル実験から正イオン加速による40keVの垂直入射NBI(3MW)を稼働させている。

以上の状況を総合して、重水素実験への対応として以下の方針を採用する。

NBIの重水素化および加速電圧の増強は垂直入射NBIについて行う。

そのエネルギーは60-80keVに最適値があると考えられる。現有の40keV入射NBIを用いた実験の結果に基づき、対費用効果を含めた判断をする必要があるが、80keVを主案として検討する。重水素実験前の垂直NBI2ビームラインで入射加熱(ポート通過)パワーを12MW(40keV)から18MWへの増強を図るものとする。

接線入射NBIはすでに高エネルギーであり、重水素化に際してエネルギーを増大させるには、垂直入射NBIに比べて技術的な困難さおよび設備投資が大きくなる。このため、加熱パワーの増強は、有利な点が多い垂直入射NBIに因るものとし、接線入射NBIの加速電圧の増強は行わない。一方、これらの接線入射NBIの重水素化については、高エネルギー粒子に伴う特有の物理現象の研究や荷電交換反応の増大により低密度での加熱パワーを促進させ高いプラズマ温度を指向した実験には適切な手法足りえる。また、低密度時の加熱パワー吸収を改善し、高い温度を得る手段として重水素を用いることは有効である。したがって、既存の3ビームラインいずれも軽水素-重水素運転の切り替えを容易にできる設備の準備を行う。エネルギーおよび入射加熱パワーは軽水素、重水素のいずれの場合もそれぞれ、180keV、14MWとする。ただし、重水素運転時は電流の引き出し特性の劣化が予想されるため、これに対する措置の検討が必要である。

NBIの総加熱パワーは最大で32MWとなる。

重水素ビーム入射実験は主として高加熱パワー時での研究に当て、必要な実験機会を確保し、機器の高負荷運転の繰り返し再現性を優先するため、放電時間は3秒を基本とする(従来計画は10秒)。長時間運転については目的を絞り、見込みが十分ある場合については、全体計画での整合性を考慮し、合理的にそのショット数を定める。

以上の方針に基づいて、代表的な放電条件を以下にあげる。

まず、最大の性能を引き出すことができる条件として以下を仮定する。

- ・磁場強度：3T
- ・NBI加熱：180keV：14MW(重水素) (ポート通過パワー)  
80keV：18MW(重水素) (ポート通過パワー)

図3.3-1にある突き抜け損失を考慮し、軌道損失は垂直の場合18%、接線の場合はないとする。

- ・ICH加熱とECH加熱：合わせて3MW
- ・閉じ込め時間 ISS95則の2倍

- ・電子とイオンの温度は等しいとする。
- ・密度は平坦な分布 $(1-\rho^8)^2$ 、温度はパラボラ分布 $(1-\rho^2)^2$ 、NBI 加熱吸収分布は  $1-\rho^2$  とする。

この条件では、密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、中心温度は10.3keVとなり、LHD計画の所期の温度目標条件にかなう放電が期待される。また、密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において、蓄積エネルギーは3.8MJとなり、3Tの強磁場においても 値が3%を越え、かつ高温(体積平均温度で2keV以上)のプラズマを実現できることが予想される。

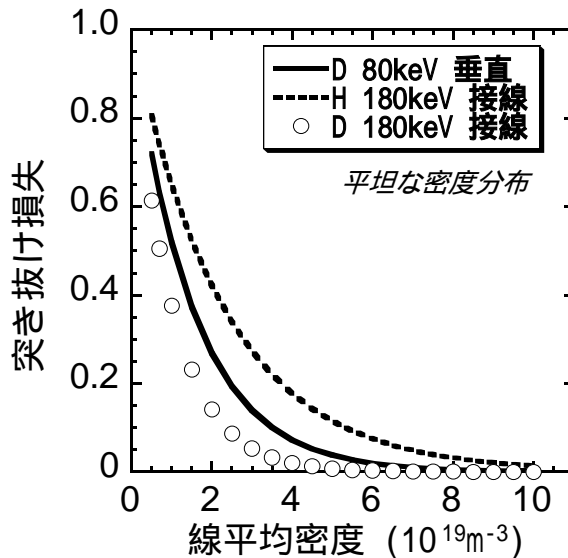


図 3.3-1 線平均密度に対する NBI 入射電力の突き抜け損失の比率。

### (2) ICRF の増強と運転形態

重水素を利用することにより、水素マイナリティの標準的なICRF加熱実験が可能となる。加熱パワーを重水素実験期間中に現状の2MWから3MWへ増強する。

例として、LHD実験目標に挙げられている3MW での1時間放電については、 $\langle n_e \rangle = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e = T_i$ とし、重水素の利用による閉じ込め改善によって $\tau_E = 2\tau_E^{\text{ISS95}}$ が得られたと仮定すると、温度は2.7keV、蓄積エネルギーは1MJとなる。

### (3) 閉ダイバータ構造の導入による粒子制御性能の向上

これまでの重水素を用いた実験から、その同位体効果は大型装置もしくは小型装置であってもダイバータおよび壁コンディショニングによって良好な粒子制御を実現できた場合により顕著に現れることが示唆されている。また、その差異の同位体効果は周辺プラズマのみならず、コアプラズマへ影響を及ぼしている。LHDはコアプラズマが原子過程の影響を直接には受けないだけの大きさを持っているが、良好な粒子制御によって、周辺プラズマでの原子過程による放射や運動量損失を抑制することが、重水素実験にとって重要となる。したがって、閉ダイバータの導入による粒子制御性能の向上を合わせて考えることが求められる。

### 3.4 実験スケジュール案

重水素プラズマ放電の回数は DD 反応生成物の積分量を以下に決める値を上限として管理する。

(i) 開始初年度から6年間

年間最大中性子発生量  $2.1 \times 10^{19}$  個

年間最大トリチウム発生量 37 GBq (1 Ci)

(ii) 開始から7年目から3年間

年間最大中性子発生量  $3.2 \times 10^{19}$  個

年間最大トリチウム発生量 56 GBq (1.5 Ci)

実験計画の策定に当たって、年間総中性子発生量の制限の観点から放電回数の大略を推定する上で、この標準放電条件が多種多様な実験の平均として適切であると考え。これによると、後述する標準放電に換算して、初期6年間では年間6400秒、後期3年間では年間9600秒が許容範囲となる。1ショット3秒とすると、それぞれ、約2100ショットと3200ショットとなる。

年間4ヶ月のプラズマ実験期間中の約4分の1から3分の1が重水素実験当てられる。NBIのコンディショニングの最適化時期は通常、この期間中に2回設けられ、各々の時期に合わせて重水素実験を効率的に実施することになる。

重水素準備期間および重水素実験は以下のように段階的に進める。総表を表3.4-1に示す。実験機会は3.5に記載された標準放電換算のショット数で表す。

表 3.4-1 LHD における重水素実験スケジュール案



(1) 準備期間

前節にあげた項目について適切な準備を行う。特に垂直入射 NBI 2 ビームラインの 80keV・重水素化の整備、総中性子発生量計測、トリチウム処理装置は必須項目であり、か

つクリティカルパスとなる可能性が高いため、重点的に配慮されるべきである。

## (2)初年度

中性子・トリチウムの扱い、計測・加熱機器の重水素実験対応についてのコミッショニングを行うための予備実験を実施する。法令に基づく規制課の許認可を受ける検査のための運転を行う。

許認可検査を含めて標準条件で 1000 ショット程度の重水素実験を行う。そこでは

- 1)トリチウムおよび中性子の発生を把握、制御するために必要な排気、計測機器の動作確認
- 2)NBI を中心とした、重水素プラズマ加熱機器の基盤整備
- 3)輸送に対する同位体効果を検証するための閉じ込めデータベースの作成に着手を目的とする。

実験終了前の 2 ヶ月は軽水素放電を行い、重水素の置換履歴および重・軽水素運転の比較のためのデータを収集する。

## (3)2年度目～6年度目

80keV 垂直重水素 NBI の加熱パワー増強のための調整、および 180keV 接線 NBI の重水素化を進める。平行して特に、中性子およびガンマ線計測機器の充実および既存計測の耐中性子化を図り、同位体効果の物理に取り組むとともに、閉じ込め障壁の形成などの閉じ込め改善に注目した実験を進める。

### 1)閉じ込めデータベースの構築

磁場配位、加熱、密度、ダイバータ、燃料補給の条件などを精査し、重水素化以前の軽水素のデータベースと比較可能なデータベースを整備する。このために初期 600 ショットから 5 年度目 200 ショット程度まで漸減させながら重水素実験を充てる。

### 2)ダイバータ運転の最適化および閉じ込め改善と輸送障壁の形成

この目的に年間 400-800 ショット程度の重水素実験を充てる。従来にない閉じ込め改善モードが発見された場合は、この実験を1)、3)に優先させる。ダイバータにおいては長時間運転を見込んだ最適化も行う。ダイバータ運転と同位体効果による閉じ込め改善の協調効果を目指す。

### 3)ICRF/ECH 加熱

軽水素と重水素の混合ガスを用いた、ICRF のマイノリティオン加熱の最適化を年間最大中性子発生量の 10 分の 1 未満の範囲で進める。アンテナ系を 5 ペアに増強するとともに、高速イオンテール形成に注目して、その物理モデルを構築し、中性子発生量の推定の精度を高める。ECH 加熱では局所加熱電力の増大によるプラズマポテンシャルの制御による閉じ込め改善実験を進める。

### 4)高速イオンの閉じ込め・粒子シミュレーション・MHD

NBI や ICRF によって生成される高速イオンの閉じ込め性能の評価を進め、将来の核融合炉における粒子閉じ込めの評価に資す。MHD については、高速イオン励起の MHD 不安定性がもたらす損失に注目した研究を進める。この目的のために年間 400-600 ショット程

度の重水素実験を充てる。

#### 5)新しい概念の実験

LHD で有効なプラズマ、およびその環境を利用して、核融合の分野に留まらない、分野間の連携を目指した学際的研究を広く受け入れ、7年度目以降の本格化を目指して全体計画の1割程度までの範囲において予備実験を行う。

#### (4)7年度目～9年度目

年間の中性子発生量の管理値を1.5倍とする。この重水素実験計画のまとめの時期において、特記すべきことは以下の3事項である。

- 1) 重水素実験開始後6年間で得られた知見を体系的に総合して、総合機能への統合を図る。もって、ヘリカル系核融合炉の展望を明らかなものとする。
- 2) ICRF を中軸とし、ダイバータ機能の応用と合わせて高性能プラズマの長時間保持を実証する。
- 3) 重水素実験終了後のLHDの再利用までを考慮しつつ、学術的な応用実験をとりあげ、以後の展開を図る。

#### (5)10年度目

実験終了後の管理および新しい目的でのLHDの活用が容易となるようトリチウム除去、放射化物低減のための後処理を行う。

### 3.5 中性子・トリチウム発生量評価

以下に運転回数を制限する要素となる中性子およびトリチウム発生量について考察する。

(1) NBI 加熱によるもの

(A) 想定最大中性子発生率

中性子が最も多く発生する条件は3.3.2(1)で述べたNBIを中心として加熱能力が最大となる場合から得られる。これらを元にしたプラズマパラメータと中性子発生率の計算結果を図3.5-1に示す。

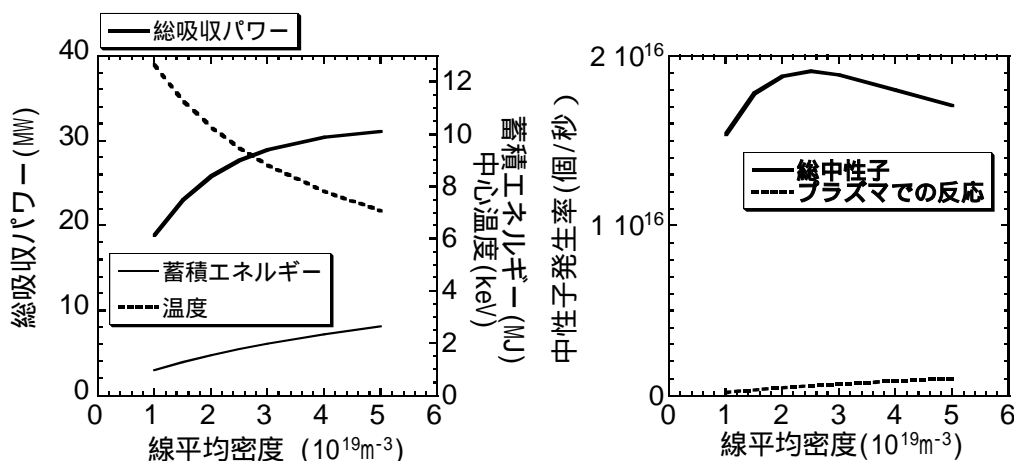


図 3.5-1 最大加熱条件時の線平均密度に対する総吸収加熱パワーとその時のプラズマパラメータ(左図)および中性子発生率(右図)

最大中性子発生率は密度が  $2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  で見られる。これらの結果より、最大中性子発生率が想定される運転条件は上記加熱条件に加えて、下記のようなになる。

|          |   |
|----------|---|
| 線平均密度    | $2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$                                |
| 総加熱吸収パワー | 27.7 MW   |
| 中心温度     | 9.46 keV  |
| 蓄積エネルギー  | 1.77 MJ   |
| 中性子発生率   | $1.91 \times 10^{16}$ 個/秒 (このうち熱中性子反応は $5.98 \times 10^{14}$ 個/秒) |

となる。また、3秒間の放電1回で生じるトリチウム量は  $0.10 \text{GBq}$  ( $2.7 \times 10^{-3} \text{Ci}$ ) となる。

(B) 標準放電

中性子発生の最大想定条件は加熱入力最適化された理想的な状態であり、平均的に見て、この6割程度の加熱入力が多いの実験に供せられると考えられる。180keV 接線入射については1機のみを重水素運転とする。すなわち、入射加熱パワーとして、80keV 垂直入射 10.8MW、180keV 接線入射は軽水素ビームが5.4MW、重水素ビームが3MWとする。さらに、ICH、ECH については複数の加熱を組み合わせる複合加熱にも特殊な有効条件と研究開発要素があるため、ここでは用いないものとする。

さらに、閉じ込め磁場配位などを調べるために変化させるので、平均的にはISS95則に対



する改善度は 1.5 を仮定する。

磁場は 3T とする。

密度を変化させた時のプラズマパラメータと中性子発生率の計算結果を図 3.5-2 に示す。

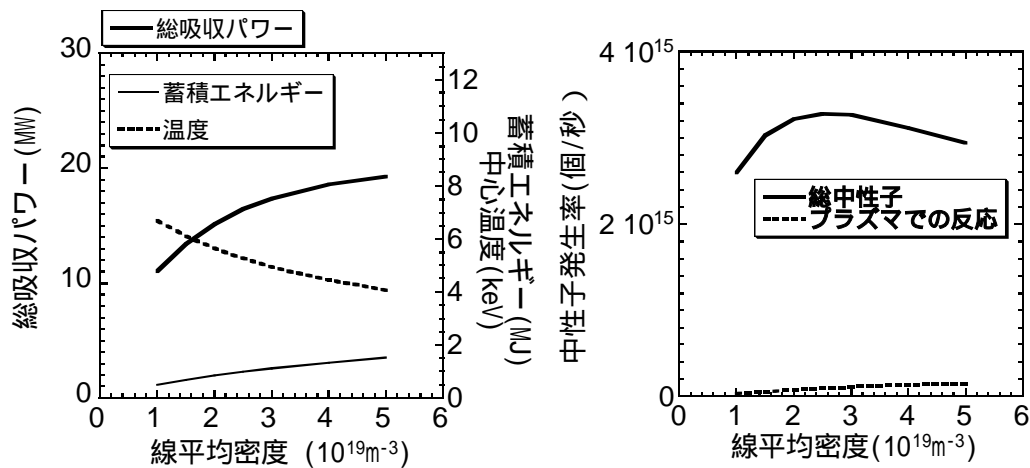


図 3.5-2 標準放電時の線平均密度に対する総吸収加熱パワーとその時のプラズマパラメータ(左図)および中性子発生率(右図)。

これらの条件での、中性子発生は密度に対して比較的变化は小さく、最大値は(A)と同じく  $2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  の密度で生じ、その値は(A)の想定最大値約6分の1となる。

|          |   |
|----------|---|
| 線平均密度    | $2.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$                                |
| 総加熱吸収パワー | 13.5 MW   |
| 中心温度     | 5.28 keV  |
| 蓄積エネルギー  | 0.99 MJ   |
| 中性子発生率   | $3.28 \times 10^{15}$ 個/秒 (このうち熱中性子反応は $9.69 \times 10^{13}$ 個/秒) |

となる。

3秒間の放電1回で生じるトリチウム量は  $0.017 \text{GBq}$  ( $4.7 \times 10^{-4} \text{Ci}$ ) となる。

許認可申請に当たっては最大中性子発生率の3分の1程度となる条件を検査用放電とすることが求められるとすれば、この放電条件では中性子発生率が不足しており、もう1機の180keV接線ビームの重水素化が求められる可能性があるため、許認可条件とNBI整備計画との合理的な合致を、今後詳細に詰める必要がある。

この検討においては、加熱吸収分布を固定した計算を行っているため、閉じ込め改善などを見込んだ、特に中程度の密度領域における加熱吸収分布の影響と効果を今後の実験において明らかにし、実験機会回数の考え方とのバランスにおいて判断していくことが必要である。

また、垂直入射NBIのエネルギーを60keVとした場合は、ビームとプラズマとの核融合反応が軽減され、80keVの場合と比べて、中性子発生率はおよそ1割減る。

## (2) ICRF 加熱による定常実験

水素マイナリティの標準的な ICRF 加熱実験では、重水素はバルクプラズマであって、高エネルギーに加速されないと考えられるため、バルクプラズマでの DD 反応を考慮すればよいと考えられる。しかしながら、加熱モードによっては高エネルギーの重水素が発生することは否定できないため、特に放電時間を 10 秒までに限った条件から研究を進め、加熱機構を明らかにしつつ、全体計画に支障をきたさない範囲で長時間化を図る。上述の 3MW での 1 時間放電 ( $n_e = 5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e = T_i = 2.7 \text{keV}$ ) について、バルクプラズマ中での DD 熱核反応を考えると中性子発生率は  $2.9 \times 10^{13}$  個/秒であり、1 時間で、 $1.0 \times 10^{17}$  となる。この仮定が正しければ、長時間 ICRF 運転も実現可能と考えられるが、イオン温度に敏感な領域であり、実験データの蓄積による判断が必要である。

## (3) 中性子発生量についてのまとめ

以上の中性子発生量の予測をトリチウムの発生量および実効線量当量と合わせて表 3.5-1 にまとめた。ICRF 加熱による定常放電(1 時間)では、中性子およびトリチウムの発生量は最大中性子発生率が想定される実験のほぼ 2 回分に相当する。

表 3.5-1 各種放電条件における実験放電 1 回当たりに発生する中性子とトリチウム量

| 運転条件   | 放電時間   | 中性子発生量                 | トリチウム量   |
|--|--------|------------------------|--|
| 従前の標準放電<br>NBI 250keV, 20MW                                | 10 秒   | $2.4 \times 10^{17}$ 個 | 0.41GBq<br>( $1.1 \times 10^{-2} \text{Ci}$ )  |
| 今回検討の中性子最大発生率を伴う放電<br>NBI 80 keV, 18MW<br>180 keV, 14MW など | 3 秒    | $5.7 \times 10^{16}$ 個 | 0.10GBq<br>( $2.7 \times 10^{-3} \text{Ci}$ )  |
| 今回検討の平均放電<br>NBI 80 keV, 10.8MW<br>180 keV, 8.4MW など       | 3 秒    | $9.8 \times 10^{15}$ 個 | 0.017GBq<br>( $4.7 \times 10^{-4} \text{Ci}$ ) |
| ICRF 定常放電  | 3600 秒 | $1.0 \times 10^{17}$ 個 | 0.17GBq<br>( $4.6 \times 10^{-3} \text{Ci}$ )  |

### 3.6 機器整備計画

#### 3.6.1 大型ヘリカル装置本体の整備

##### 3.6.1.1 コイル電源

コイル電源は全ての機器が遮蔽壁の外側に設置されているため、重水素実験のための対策は特には不要であるが、高性能プラズマ実験のために次の整備が必要である。

##### (1) 磁気軸可変実験のためにポロイダルコイル電源電圧を増強

現状の33～45Vを100～200Vに増強することによって、電流掃引速度が8倍となり、1 Tでの実験であれば5 s間の放電時間の間に磁気軸中心を0.1 m程度変化させることが可能となる。この増強によってプラズマ電流による磁気軸シフトの抑制等の実験が可能となる。図3.6.1-1に磁気軸可変モード運転の一例を示す。

##### (2) コイル電源制御システムの更新

プラズマ電流や構造物に流れる渦電流の影響を考慮したコイル電流制御を行うためには、高速の演算能力が必要である。既存のコイル電源制御システムでは能力が不足するため機種の更新が必要である。

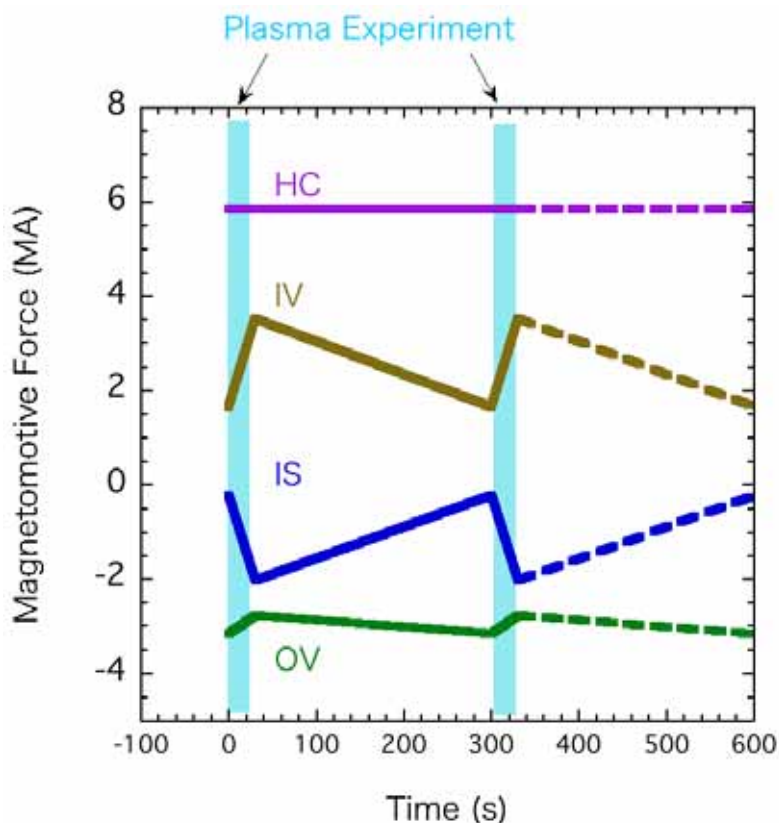


図 3.6.1-1 磁気軸可変モード運転の一例

##### 3.6.1.2 LHD 本体の重水素実験対応

超伝導コイルおよびベルジャー内部のケーブル類は、重水素実験による放射線が設

計条件として規定されており，例えば，超伝導コイルの絶縁物にはガラスクロスとエポキシ絶縁，ベルジャー内のケーブル被覆には耐放射線性に優れたテフロンであるFEPが採用されている。よって，これらの機器においては改造は不要であるが，重水素実験による放射線対策のために遮蔽の強化等が必要である。必要な改造項目を以下に挙げる。

- (1) 本体室内の計器については許容線量の調査が必要。必要に応じて設置位置の変更や遮蔽追加等の処置を実施
- (2) 多層断熱材に採用されているポリエステルは強度低下が懸念されるため，断熱性能の監視とテストピースによる強度試験が必要
- (3) ベルジャー内の計測子の特性変化や冷却配管の表面のアルミ粘着テープの剥離については監視が必要
- (4) 本体室への入室制限に対する遠隔操作等の強化
- (5) ヘリウム冷却系については完成後 10 年以上を経過しており，低温弁や電子部品については計画的な更新が必要

### 3.6.1.3 電源 / 冷却系の年次計画

重水素実験の開始に向けて，LHD本体関連の機器増強および改造のスケジュール案を表3.6.1-1に示す。

表 3.6.1-1 LHD 本体関連の機器増強および改造のスケジュール案

| FY | 準備<br>1年度                       | 準備<br>2年度 | 準備<br>3年度 | 準備<br>4年度 | 初年度 | 2年度                 | 3年度 | 4年度 | 5年度 |
|----|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|---------------------|-----|-----|-----|
|    | 通電試験と高性能化研究<br>(過冷却運転における安定性実証) |           |           |           |     |                     |     |     |     |
|    | 磁気軸可変<br>実験対応<br>(電源電圧<br>増強)   |           |           |           |     |                     |     |     |     |
|    |                                 |           | DD実験対応    |           |     | DD実験における<br>機器健全性確認 |     |     |     |
|    | システムの長期信頼性実証とデータベース蓄積           |           |           |           |     |                     |     |     |     |
|    | 低温・電源システムの高性能化・高信頼化             |           |           |           |     |                     |     |     |     |

### 3.6.2 ダイバータ

#### 3.6.2.1 LHD のヘリカルダイバータ (HD) - 設備の現状 -

LHD では、設計当初の標準的な運転磁場配位であった磁気軸 3.75m 配位を基準に、磁力線追跡計算結果を基に、ダイバータ板を配置している。図 3.6.2-1(a)に LHD におけるヘリカルダイバータ板の配置を示す (トラス半周分)。特に、赤と青で色をつけたダイバータ板列を同図(b)に示している。ダイバータ板の総数は 1700 枚程度であり、その材料には等方性黒鉛 (東洋炭素 IG-430U) を用いている。

図 3.6.2-2 に、ダイバータ板構造を示す。ステンレス製 (SUS316L) の水冷配管に、銅製のヒートシンクをボルトで機械的に接合し、そのヒートシンクに等方性黒鉛製のダイバータ板をボルトで機械的に接合している。ダイバータ板構造の開発は、核融合科学研究所の電子ビーム照射装置 ACT において行われた。特に、LHD の実験目標である加熱入力 3 MW の 1 時間放電に耐え得るダイバータ構造を開発することを目標とした。ACT における実験では、LHD 定常実験の加熱入力の半分は放射損失で壁へ失われ、残りの 1.5 MW がダイバータへ流入すると仮定し、さらにダイバータ板の熱負荷は、HD の 3 次元構造によるピーキングファクターを 2 として、 $0.75\text{MW}/\text{m}^2$  の

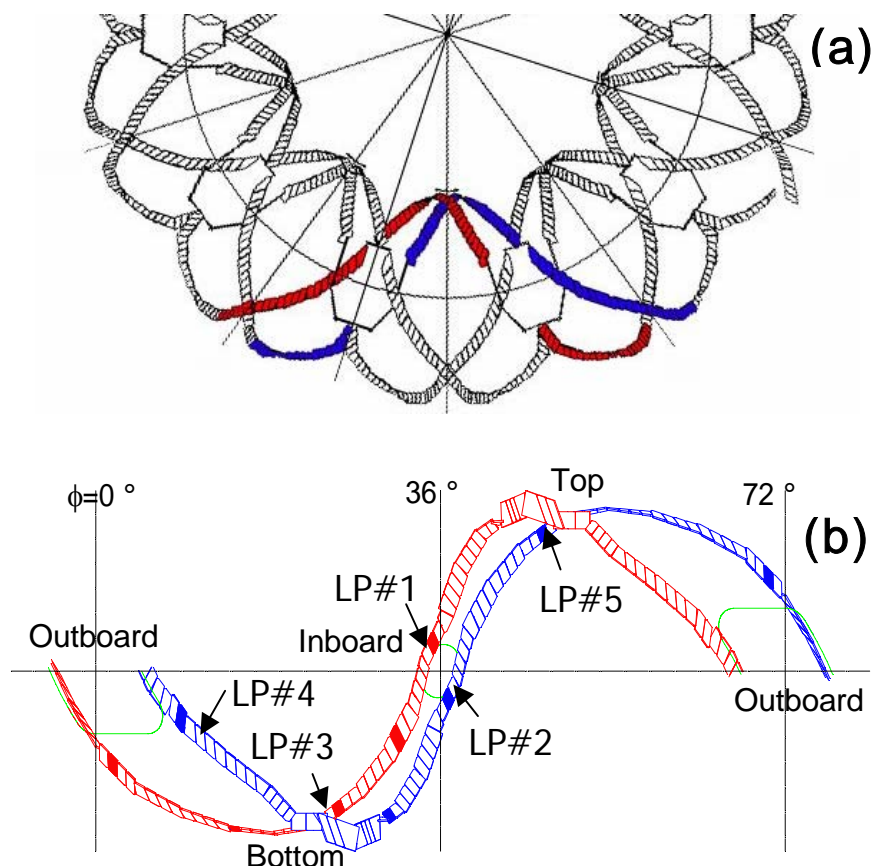


図 3.6.2-1 (a) LHD におけるダイバータ板列、(b) ダイバータ板列拡大図。(b)において、赤、青でハッチングしたダイバータ板には熱電対を、LP#1-5 と示したダイバータ板には静電プローブアレイをそれぞれ埋め込んでいる。

熱負荷を仮定した。図 3.6.2-3 に ACT におけるダイバータ板構造への熱負荷印加実験結果を示す。現在 LHD に設置しているダイバータ板構造は、熱流束が  $0.4\text{MW}/\text{m}^2$  を超えると、熱負荷と温度の関係が線形からずれることが分かる。これは銅ヒートシンクが、温度が  $200$  を超えると変形し、ダイバータ板との熱接触が劣化するためである。ヒートシンクは変形すると元に戻ることはないため、以後の実験に支障を来す可

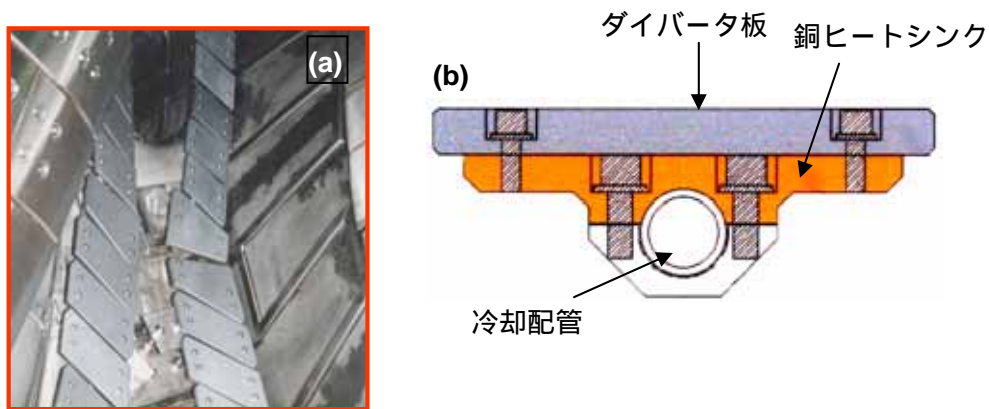


図 3.6.2-2 (a) LHD 真空容器内のダイバータ板列、(b) ダイバータ板構造

能性がある。

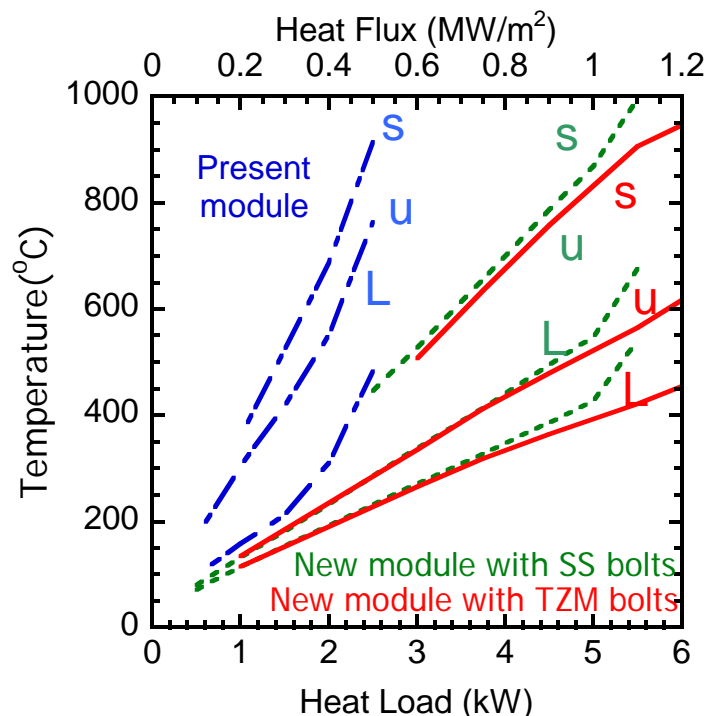


図 3.6.2-3 ダイバータ板構造熱負荷試験結果。各熱負荷条件における定常状態での温度を示す。青線は現在設置されているダイバータ板、緑及び赤線は新型機械接合型ダイバータ板。図中s, u, Lは、それぞれダイバータ板表面、ヒートシンク上部、ヒートシンク下部を示す。

LHD では、1998年の実験開始から現在まで、ダイバータ板で発生した不純物やリサイクリング粒子を積極的に制御するような設備（例えば排気装置）は設置してい



ない、いわゆる「開いた」HD 配位において実験を行い、HD プラズマ特性の研究を進めてきた。

### 3.6.2.2 LHD におけるヘリカルダイバータの閉構造化・高性能化検討

重水素を用いた実験で、主プラズマの閉じ込め性能の向上及び高性能プラズマの長時間保持を目的とする計画の1つとして、HD の閉構造化・高性能化を行う。

バッフル構造を設置してダイバータ室を形成し、ダイバータ板上で再結合した粒子や発生した不純物がダイバータ部から流出することを防ぐことを閉構造化という。図 3.6.2-4 に閉構造 HD の概要図を示す。閉構造化とともにダイバータ部に排気装置を設置することにより、効率的なりサイクリング及び不純物制御、及び長時間放電における粒子制御が可能となる。図 3.6.2-5 に中性粒子輸送コード DEGAS で計算された、水素分子密度分布を示す。初期的な設計であるが、バッフル構造を設置することによりダイバータ部の水素分子密度を3倍程度上げることができると予測されている。一方、リサイクリング粒子をダイバータ部に閉じ込めることにより、主プラズマ周辺部の中性粒子密度は低下する。これにより、ローカルアイランドダイバータ配位で得られている超高密度プラズマを、HD 配位でも再現性よく得ることができ、また、ダイバータ部の中性粒子圧力が上がることで現在は得られていないダイバータデタッチメントの安定維持を実現できる可能性がある。ダイバータ排気系は排気速度の観点からは、ダイバータ室内にクライオパネルあるいはクライオパイプ型のポンプを設置することが望ましい。この場合、液体ヘリウムの流路は上下ポートを通して設置する。クライオポンプの設置位置は、トーラス部、あるいはヘリカルコイル容器側板部(2箇所)を検討している。いずれの場合も、例えばトーラス内側のみにポンプを設置した場合、長手方向に約4mのクライオパネルあるいはパイプを設置することになる。クライオポンプはシェブロン及び80Kシールドで放射熱から遮蔽する。ダイバータ排気系で必要な排気速度について、単位時間当たりペレットで供給する粒子数を基準として考えてみる。定常運転が可能な現有の連続入射ペレット(10Hz、ペレット1個当たり $1 \times 10^{21}$ atoms)では、 $1 \times 10^{22}$ atoms/s が単位時間当たりの入射粒子数であり、したがって必要な排気粒子束としては約  $20 \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  となる。ダイバータ室内の中性粒子圧力を

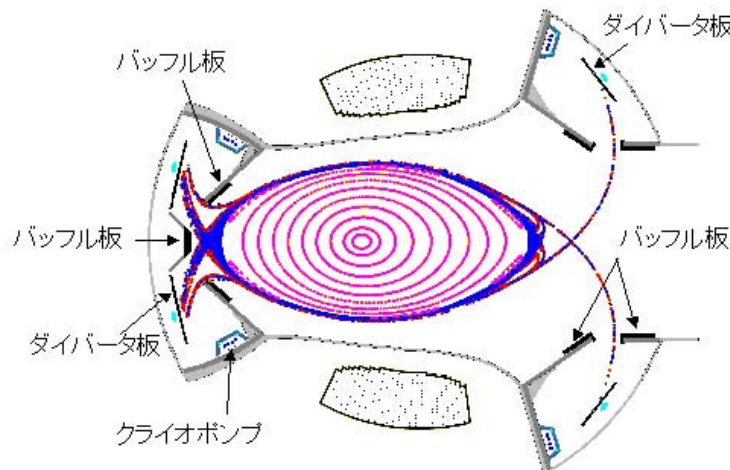


図 3.6.2-4 ヘリカルダイバータの閉構造化



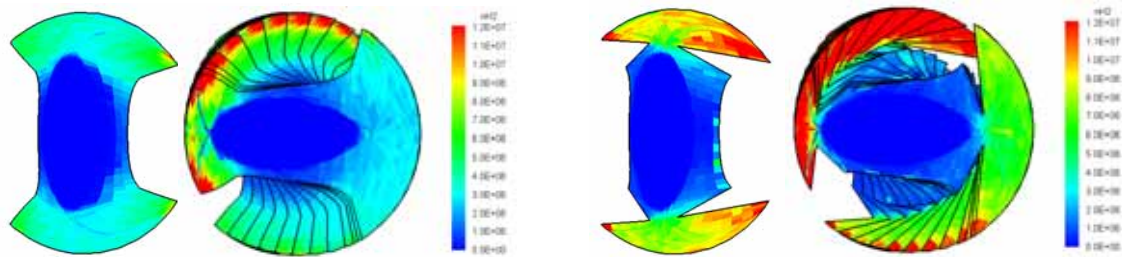
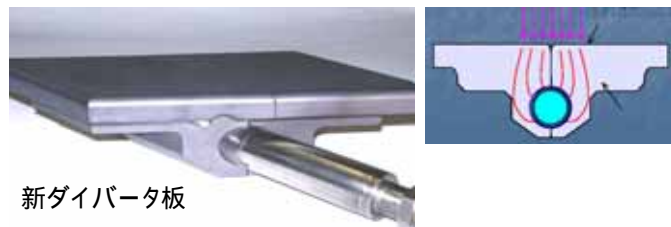


図 3.6.2-5 DEGAS コードによる中性粒子輸送計算で得られた水素分子密度分布。(左) 現行の開いた HD 配位。(右) バッフル構造を設置した、閉構造化 HD 配位。



新ダイバータ板

図 3.6.2-6 新型機械接合型ダイバータ板構造。(右) 冷却配管への熱の流れ。


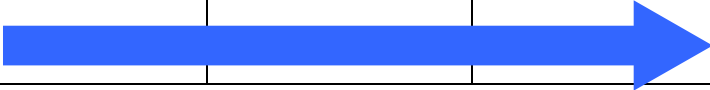
$10^{-1}\text{Pa}$  のオーダーまで上げることができれば、排気系の必要排気速度は  $100\text{ m}^3/\text{s}$  のオーダーになる。

3.6.2.1 節で述べたように、高性能定常プラズマ保持実験時に熱負荷が高い部位では、現在設置しているダイバータ板の熱特性が劣化する可能性がある。そこでダイバータ板構造を、より高熱負荷に耐え得る構造に交換する。これを高性能化という。黒鉛 - 銅のロウ付け材を用いることが理想的である。ITER のダイバータ板開発などで、LHD 設計時に比べて技術的には進んでいるが、高コストが問題ではある。また、ボルトを用いた機械接合タイプでも、最近核融合科学研究所で開発した新型機械接合型ダイバータ板構造(図 3.6.2-6)は、図 3.6.2-3 に示すように(図中、“new module”)現在のダイバータ板構造に比べて熱除去性能は大きく向上している。現在のダイバータ板の場合、ダイバータ板からヒートシンクへの熱流束は主として、これらを接合するボルトを通して流れていたが、新型機械接合型ダイバータ板構造ではダイバータ板とヒートシンクが等方性黒鉛で一体構造となっているため、図 3.6.2-6 右図に示すようにダイバータ表面から冷却管までの熱流路長が短く、熱抵抗が小さいと考えられる。さらに新型機械接合型ダイバータ板構造では、これまでプラズマ対向部に露出していた金属製ボルトがなくなるため、金属不純物発生の抑制という観点からも有利である。ダイバータ板構造の交換・改造としては、ロウ付け型あるいは新型機械接合型ダイバータ板構造を用いることにより、より加熱入力の高い長時間放電実験に対応することができる。

以上を踏まえ、ヘリカルダイバータ閉構造化・高性能化のスケジュールを以下のよう  
に計画している。

表 3.2.6-1 ヘリカルダイバータ閉構造化・高性能化計画案

| FY | 準備1年度  | 準備2年度  | 準備3年度  | 重水素実験初年度                                    |
|----|--|--|--|---|
| 内容 | <ul style="list-style-type: none"> <li>トロイダル1セクション(全体の10%)への試験バップル構造の設置</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>前年度の結果からバップル構造の最適化を行う。</li> <li>全体の50%にバップル構造を設置。</li> <li>ダイバータ排気系を全体の50%に設置。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>バップル構造及びダイバータ排気系をトロイダル全周に設置。</li> </ul> | リサイクリング粒子及び不純物制御による、閉じ込め改善実験及び高性能プラズマ定常保持実験 |

### 3.6.3 中性粒子入射加熱装置整備計画案

中性粒子入射加熱装置(NBI)は、LHDにおける主加熱装置であり、現在、3台の負イオン源NBIシステムを用いた高エネルギー(180keV)軽水素ビームの接線入射を行っており、合計で13MWを超える入射電力を達成している。重水素実験では、3.3節の実験シナリオで述べられているように、低エネルギー(60-80keV)の垂直入射の正イオン源NBIシステム2台による重水素ビーム入射を主とした実験シナリオが策定されている。また、現状の接線入射NBIにおいては、入射エネルギーを変更することなく、軽水素ビームおよび重水素ビームのいずれも入射可能とする計画である。図3.6.3-1にNBIシステムの配置計画を示す。既存の3台の接線入射NBIシステム(BL1, BL2, BL3)と垂直入射NBIシステム(BL4, BL5)の配置が示されている。以下では、重水素ビーム入射システムの構成およびその整備計画案について述べる。

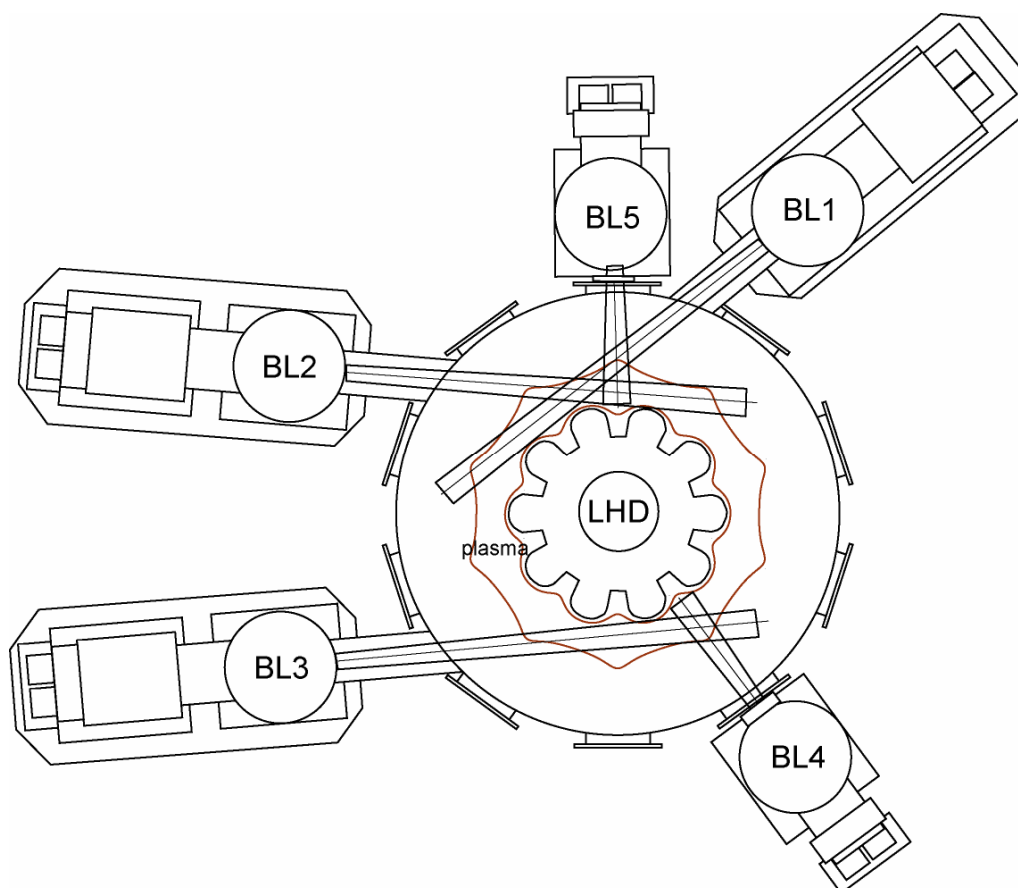


図 3.6.3-1 重水素実験における NBI システムの配置計画。BL1、BL2、BL3 は既存の負イオン源を用いた接線入射 NBI システムであり、BL4 は既存の正イオン源を用いた垂直入射の計測用ビームシステムである。重水素実験に向けて垂直入射 NBI システム BL5 を新たに設置し、BL4 を重水素入射が可能ないように改造整備する計画である。

#### ( 1 ) 正イオン源 NBI システム

低エネルギー垂直入射 NBI システムは正イオン源を用いたシステムとし、重水素ビーム入射に最適化されたインジェクターを2台設置する。入射エネルギーは、荷電交換分光計測に適した80keVで検討されており、新規に設置する計画のBL5の仕様は、80keV-9MWの重水素ビーム入射システムとする。一方、既に計測ビーム用として40keV-6MWの軽水素ビーム入射システム (BL4) が設置されているが、それを重水素ビーム入射用に改造・増強する。重水素ビーム化するに際して、入射エネルギーを80keVに上げるためには、耐電圧構造の大幅な改造が必要であり、高額な増強コストがかかる。そのため、改造を最小に抑えてコストを下げるべく、入射エネルギーを1.5倍の60keVとし、それに対応して、入射電力を9MWに増強する。合わせて、80keV-9MWと60keV-9MWの正イオン源による重水素NBIシステムを整備することにより、合計18MWの低エネルギー重水素ビーム入射を可能とする。

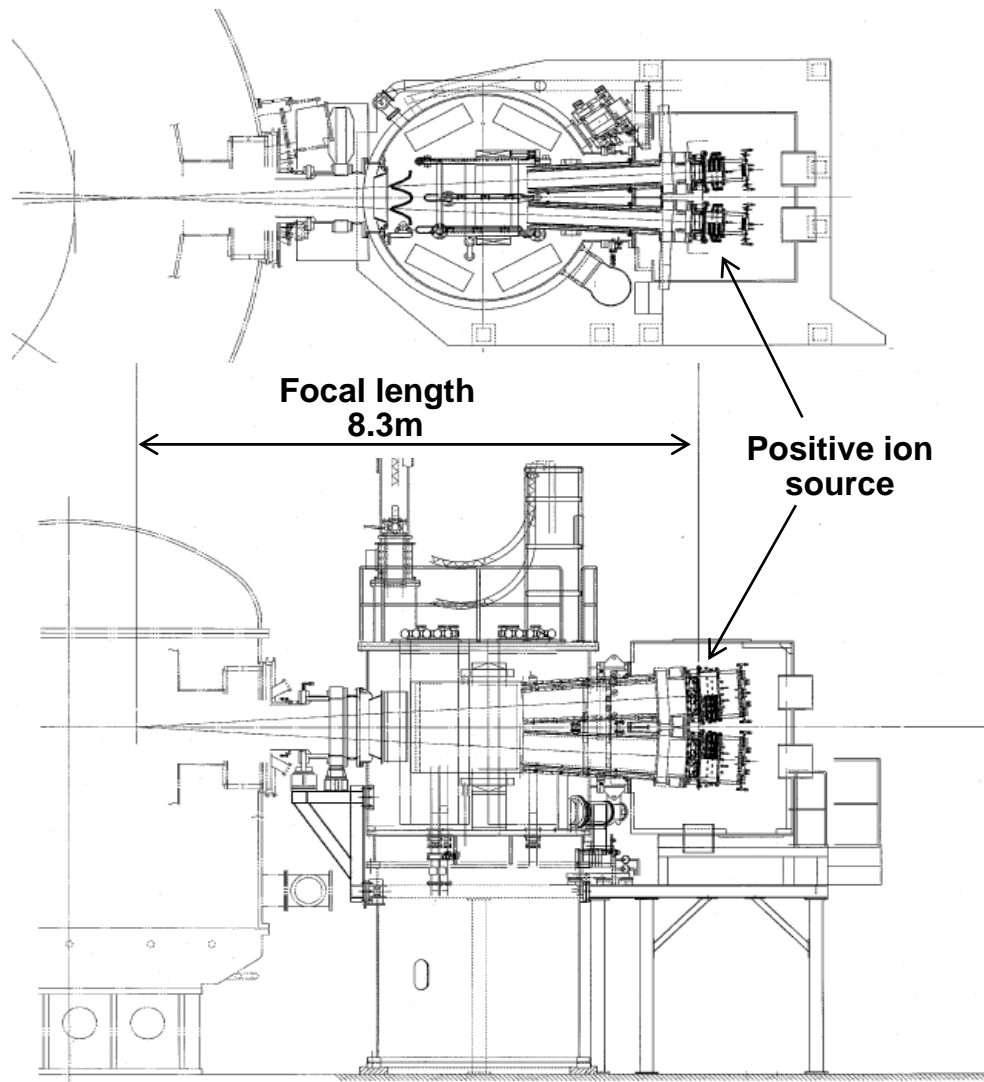


図3.6.3-2 計測用の垂直入射ビームシステムBL4の平面図と立面図。  
正イオン源を用いたシステムで、5 - Oポートに設置されている。

図3.6.3-2に、5 - Oポートに設置されている計測用軽水素ビーム入射システム（BL4）を示す。大型の正イオン源4台が上下左右に設置されており、入射エネルギー40keV、入射電力6MWである。重水素入射のためにBL4の入射エネルギーを60keVに増加するに際し、20kVの電源を追加すると共に、高電圧機器の耐電圧を60kVに対応させる必要がある。入射電力を9MWに増加させるためには、正イオン源におけるイオン電流を低下させることなくビームエネルギーを60keVに増加させる必要があり、イオン源改造に向けたR&Dが必要となる。ビームダンプ等の受熱機器の熱負荷も1.5倍に増加するため、設計値の見直し、機器の改造等が必要となる。これらの改造・増強に関しては、R&Dも含めて、今後詳細に検討する。

一方、新規に1 - Oポートに設置する予定のBL5は、80keV-9MW入射システムとしての機器設計を行う。BL4と同様に4台の大型イオン源を上下左右に配置する基本構造とする。入射エネルギーが80keVと高いので、イオン源からのビーム電流はBL4に

比べて少なくすることができるが、ビームを2段加速する必要があるため加速器が大きくなり、イオン源の大きさを小さくすることはできない。1段加速で80keVまでビームを加速する方法は、電源も含めてコストダウンにつながるが、R&Dによるイオン源の開発が必要となる。BL5の具体的な構造・設計については、R&Dも含めて、今後詳細に検討する。

## (2) 負イオン源 NBI システム

既存の接線入射の負イオン源NBIシステムを図3.6.3-3に示す。負イオン源NBIシステムに対しては、入射エネルギー等の装置基本設計を変更することなく、使用ガスを軽水素から重水素に変えることにより、3台のインジェクター全ての重水素ビーム化を行う。ただし、イオンの質量が異なるため、電極間隔等のイオン源加速器の構造は軽水素イオン源と重水素イオン源で異なる。また実験に応じて、重水素ビーム入射と軽水素ビーム入射の選択の必要があることから、それらの切り替えを可能とするため、軽水素入射用負イオン源と重水素入射用負イオン源をそれぞれ用意する必要がある。また、ガス導入系、真空排気システム、クライオポンプシステム等、機器の一部は重水素化に伴う設計の見直し・改造が必要である。

負イオン生成量は軽水素に比べ重水素では60-70%に低下するという報告があるため、重水素負イオン源のR&Dを行う必要がある。また、重水素ビーム用の加速器に対する試験も必要である。こうしたR&Dおよび試験を事前に行うことにより、重水素化による負イオン電流の低下を引き起こすことなく、軽水素入射と同等な180keV-14MWの入射電力を確保する計画である。

以上の機器整備計画により、正イオンNBIシステムにより18MW、負イオンNBIシステムにより14MW、合計32MWの重水素ビーム入射が可能となる。

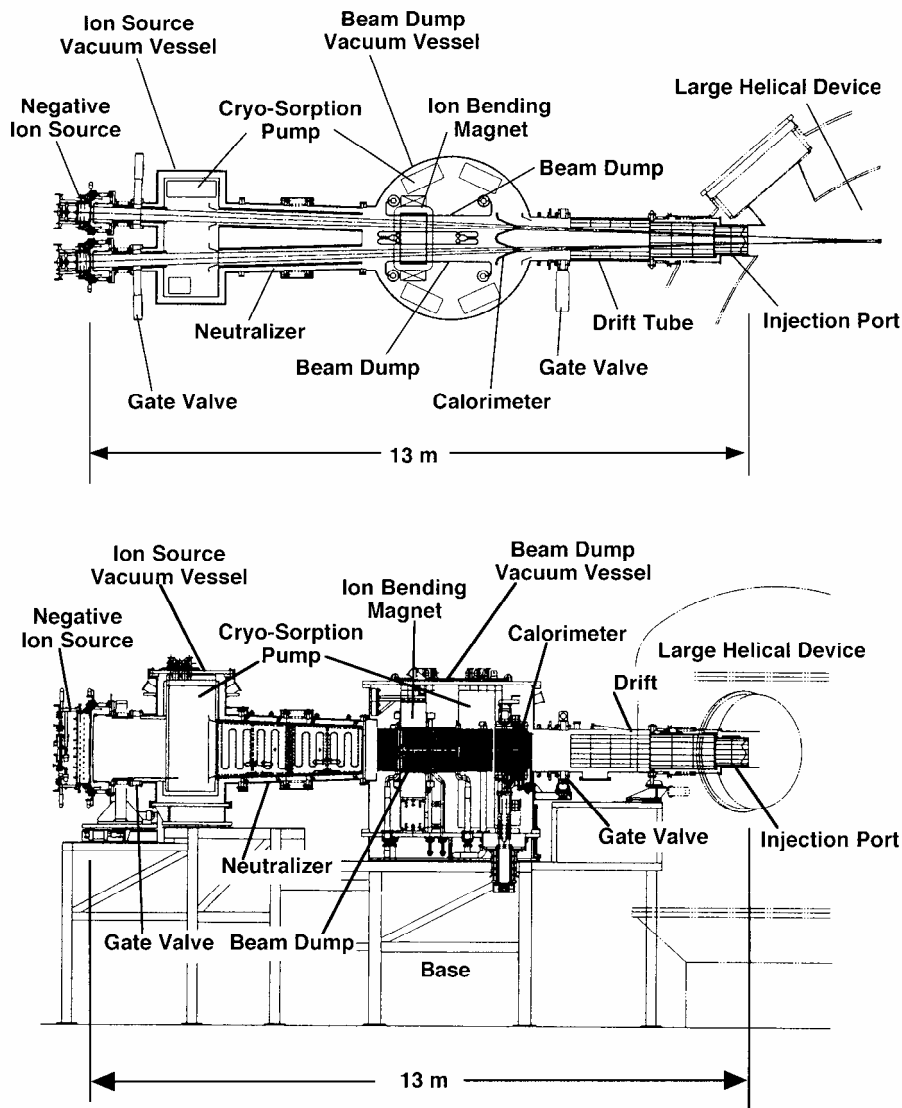


図 3.6.3-3 負イオン源を用いた接線入射 NBI システムの平面図と立面図。重水素ビームを入射する時も既存の軽水素ビームと同じ入射エネルギー（180keV）とする予定である。接線入射 NBI システムは合計 3 台あり、いずれも接線ポートに設置されている。

### 3.6.4 高周波加熱整備計画

#### (1) 電子サイクロトロン波共鳴加熱装置加熱

電子サイクロトロン波共鳴加熱装置（ECH）は、LHD においては、安定なプラズマ生成及び局所的な電子加熱が可能な、必要不可欠な加熱装置である。現在、発振源である 8 台のジャイロトロンを同時運転し、8 系統のコルゲート導波管伝送系を介して LHD に伝送しており、合計で 2MW を超える入射電力を達成している。重水素実験計画においては、これまでと同様安定なプラズマ生成と、電子の局所加熱特性を生かし

た高電子温度プラズマの生成と、電子温度分布・プラズマ電流分布の局所制御による閉じ込め改善および不安定性抑制の手段としてさらなる入射電力の増強が必要とされている。具体的には、現在稼働している 0.5MW 級ジャイロトロンを 1 MW 級へ順次置き換え、コルゲート導波管伝送系の真空化を進めることで、現有システムの増力をはかる。さらに第二段階として伝送系、ジャイロトロンを新規 2 系統増設して最終的には、全入射電力 5 MW (5 秒)、定常入射電力として 1 MW を目指す増強を行う。

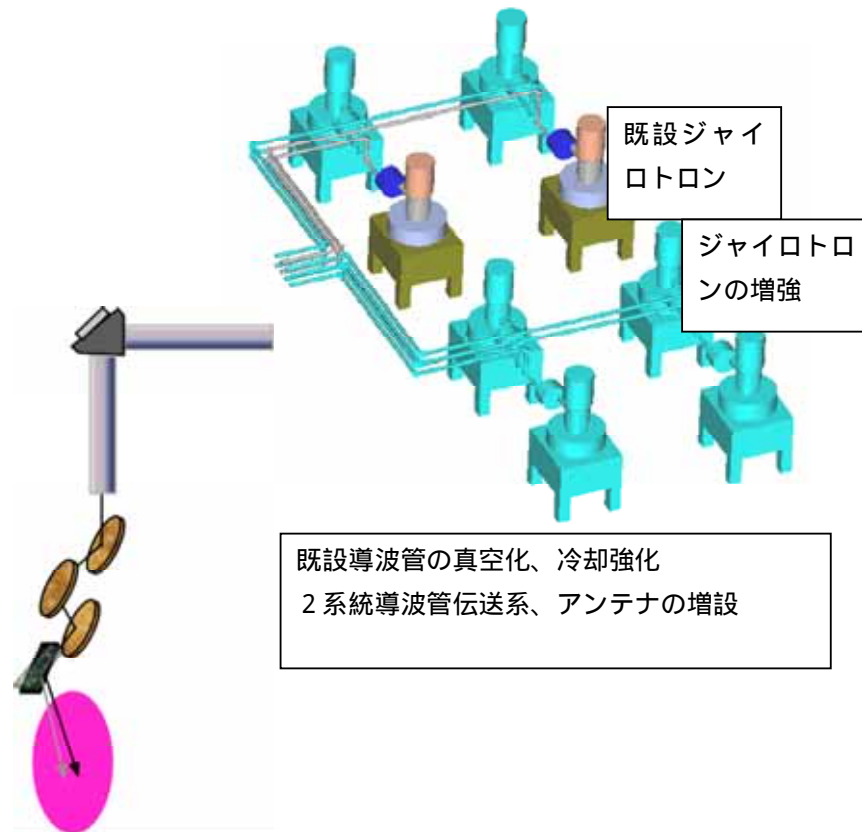


図 3.6.4-1 ECH 加熱の基本構成要素を示す。ジャイロトロンからのマイクロ波は約 100 本の真空化コルゲート導波管により LHD 装置まで伝送される。

(a) ジャイロトロン開発

重水素実験初年度までにプロトタイプ管の開発を進め 1MW 5 秒、0.3MW 定常のジャイロトロンを開発し、順次プロダクト管の製作を進める。第二次増強では、既存の 3 本のジャイロトロンを開発したジャイロトロンと置き換えて LHD の実験に用いる。重水素実験初年度には第二次プロダクト管の開発を開始し、第三次増強では第二次プロダクト管による実機入射を実現する。

(b) 伝送系の増強（真空化）と増設

重水素実験初年度までに現有コルゲート導波管伝送路 89mm 系 6 本はすべて真空化して、各系統で 1MW クラスの伝送・入射を可能とする。第二、三次増強では、新規真空伝送系及び入射アンテナを整備して全 10 系統の伝送・アンテナシステムを完成させる。



伝送系は既存伝送系の真空化を進め、各系 0.7 MW 入射を可能とする。また、定常実験への対応として、各系の冷却を強化して全定常入射電力として 1 MW を可能とする。

表 3.6.4-1 ECH 増強計画案（ジャイロトロン増強と伝送系増設を段階的に進め、最終的に全入射電力 5MW、5 秒 1MW 定常を目標とする）

|           |            | 第 1 次増強 | 第 2 次増強 | 第 3 次増強 | 第 4 次増強 | 第 5 次増強 |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ジャイロトロン増強 | プロトタイプ管    | 製作      |         |         |         |         |
|           | プロダクト管 1   |         | 製作      |         |         |         |
|           | プロダクト管 2   |         | 製作      |         |         |         |
|           | 二次プロダクト管 1 |         | 開発      | 製作      |         |         |
|           | 二次プロダクト管 2 |         |         | 製作      |         |         |

|       |                  |     |  |    |  |  |
|-------|------------------|-----|--|----|--|--|
| 伝送系増強 | 新規導波管、<br>アンテナ増設 |     |  | 新規 |  |  |
|       |                  |     |  | 新規 |  |  |
|       | 既設大気             | 真空化 |  |    |  |  |
|       | 真空化              |     |  |    |  |  |
|       | 既設真空             |     |  |    |  |  |
|       | 既設真空             |     |  |    |  |  |

|          |  |        |        |        |        |        |
|----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| LHD 入射電力 |  |        |        |        | 5MW 1秒 | 5MW 3秒 |
|          |  |        |        |        | 4MW 5秒 |        |
|          |  |        | 3MW 2秒 | 3MW 3秒 |        |        |
|          |  | 2MW 1秒 |        |        |        |        |
|          |  |        |        | 1MW 定常 |        |        |

## (2) イオンサイクロトロン加熱装置

イオンサイクロトロン (ICRF) 加熱装置は、FM 放送帯の大出力高周波電力を用いてプラズマ中のイオンを共鳴加熱するものである。プラズマ加熱に加えて、高エネルギーのイオンを生成し核反応生成物の模擬実験 (粒子シミュレーション) を行うことも可能である。また、長時間運転に適しており、プラズマ定常保持実験に用いられてきた。現在 3 ペア 6 本の加熱用アンテナが設置されており、その内 2 ペア 4 本のア

アンテナで同時に、3MW のパルス加熱及び 1MW の定常加熱が可能である。ICRF システムは図 3.6.4-2 に示すように、大きく分けて発振器、伝送路、アンテナから成り、各々に対して他のコンポーネントとバランスの取れた増強をする必要がある。

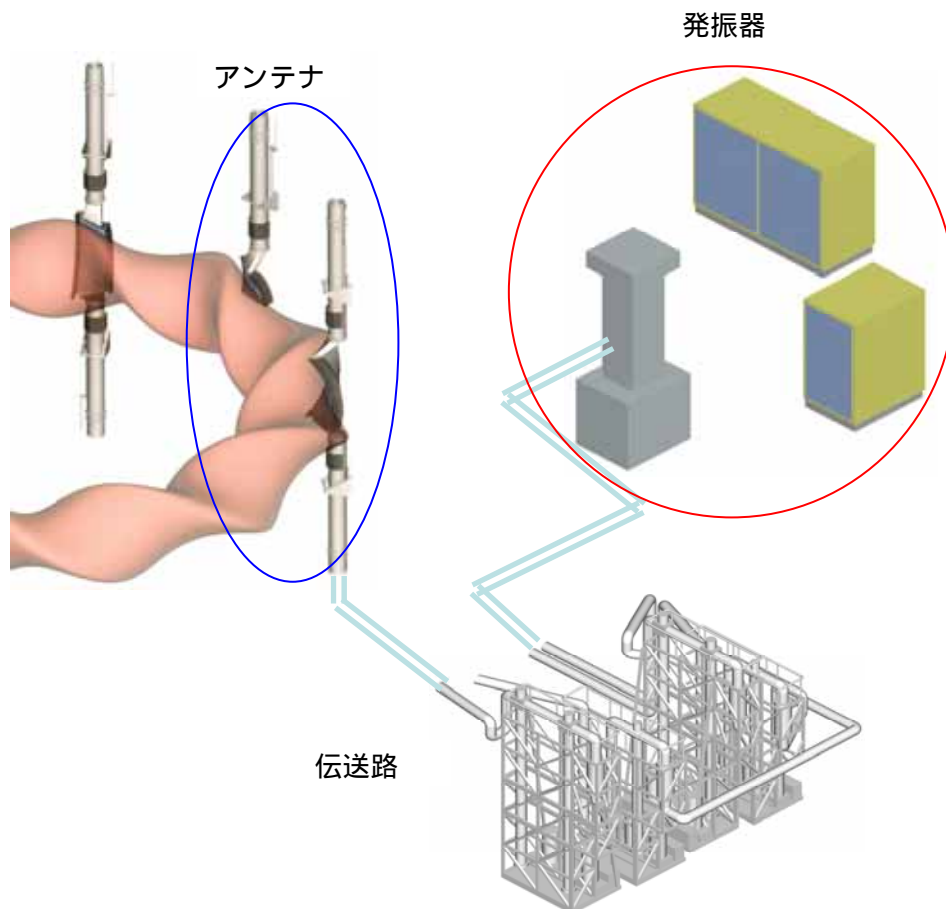


図 3.6.4-2 ICRF システムの構成の概略図

表 3.6.4-2 ICRF システム年次増強計画案

| 年度         | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7     | 8    | 9     | 10  |
|------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|-------|-----|
| パルス入射 (MW) | 3.2  | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8  | 4.8   | 6.4  | 6.4   | 8.0 |
| 定常入射 (MW)  | 1.2  | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8  | 1.8   | 2.4  | 2.4   | 3.0 |
| アンテナ本数     | 4    | 6   | 6   | 6   | 6   | 6    | 6     | 8    | 8     | 10  |
| 発振器整備      | 2台増強 |     |     |     |     | 2台増強 |       | 2台増強 |       |     |
| アンテナ・伝送路整備 |      |     |     |     |     |      | 1ペア増強 |      | 1ペア増強 |     |

機器整備は、既設アンテナ数に対して不足している大電力定常発振器 1 ペア分 2 本の増強から行う。これらの既設アンテナは、既存のパルス仕様の発振器を用いた実験用として、また予備の定常実験用アンテナとして LHD に導入していたものであるが、この機器整備計画を実行することにより、3 ペア 6 本のアンテナで同時に、大電力で定常プラズマ保持実験を行うことができるようになる。また、アンテナ 1 本当たりの入射電力の向上を図り、アンテナ 3 ペア 6 本の使用によりパルスで 4.8MW、定常で 1.8MW の入射が可能となるよう増力する。

その後更にアンテナ 2 ペア 4 本を増強し、それらに必要な発振器、伝送路を順次増強する。表に示すようにアンテナ 1 ペア分毎に発振器とアンテナ及び伝送路を隔年で追加し、増強する計画である。現在使用している ICRF システムは、細かな改良点は有るものの、大きな問題はなく、これらと同様なシステムを増設する予定である。但し、発振器を置くスペースやアンテナを導入するポート、伝送路の敷設ルート等については新たに確保する必要がある。

以上の機器整備計画により、発振器 10 台、アンテナ 5 ペア 10 本により、8MW のパルス入射、及び 3MW の定常入射が可能となる。

### 3.6.5 計測機器整備計画案

大型ヘリカル装置の計測計画では、計画の当初より LHD 実験計画の後半において重水素実験を実施するに当たって、計測システムの大幅な変更なく対応できるように配慮してきた。しかし、重水素実験の開始に当たって必要となる計測機器については、実験開始時から整備することは無駄な投資となること、実際の重水素実験時に必要となる計測装置がより明確となること、又、新しく高性能な計測装置が開発されることが予想されること、等を考慮して整備されなかった。今回、LHD の重水素実験計画を進めるに当たり、表 3.6.5- 1 に示す計測装置を新たに整備する計画である。各々の計測システムについては次頁以降に詳細に説明する。

表 3.6.5-1 LHD 重水素実験において必要な計測装置とその概要

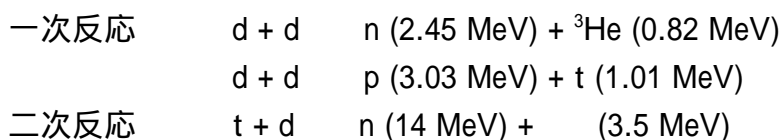
| 計測装置名                       | 計測システムの概要  |
|-----------------------------|--|
| 3.6.5.1<br>中性子計測システム        | 重水素プラズマ実験で発生する中性子を計測し、その発生分布を詳細に計測する。  |
| 3.6.5.2<br>高エネルギー粒子計測システム   | 重水素実験時に発生する高エネルギー粒子の発生場所とエネルギー分布を計測することにより、高エネルギー粒子の閉じ込め物理の解明を行う。  |
| 3.6.5.3<br>高精度輸送計測システム      | 高温プラズマの研究では、熱及び粒子の輸送が重要な計測課題となっている。特に、重水素実験では、高エネルギー粒子の挙動及びその影響を捕らえる事が重要であり、そのための 3 次元トモグラフィ計測システムを整備する。 |
| 3.6.5.4<br>ダイバータ計測システム      | プラズマ中心部の高温プラズマの保持の為に、周辺部における熱、粒子の制御が重要である。このために周辺プラズマパラメータ計測装置を整備する。                                     |
| 3.6.5.5<br>定常・高速データ収集処理システム | 重水素実験では実施可能な実験回数に制限があるため、より密度の高いデータ収集を行う必要がある。このため、定常実時間での運用および揺動計測に代表される空間的にも時間的にも大容量となるデータの高速収集を行う。    |

#### 3.6.5.1 中性子計測システム

##### 1) はじめに

重水素プラズマでは温度やエネルギーに応じた確率で重水素同士による核融合反応が起き、それに伴い中性子が放出される。重水素プラズマ中で起きる核融合反応に

ついて以下に記す。



重水素プラズマにおける中性子発生率は、プラズマの巨視的な性能を表す。大型ヘリカル装置（LHD）における重水素放電では、大型トカマク装置 JET や JT-60U における重水素実験時の中性子発生率と同等の 1 秒当たり  $10^{16}$  個程度の中性子発生率が予想されている。

重水素中性粒子ビーム入射加熱実験において、中性子は、1) 熱核融合反応（バルクイオン・バルクイオン）、2) ビーム成分・バルクイオン反応、3) ビーム成分・ビーム成分反応の 3 つの過程で発生する。通常、過程 2、所謂 TCT (two-energy-component torus) 反応により発生する中性子が支配的である。別の角度から見れば、発生する中性子は、中性粒子ビーム入射によりプラズマ中に生成される高エネルギーイオンの閉じ込めの情報を有していると言える。

以上述べたことを背景にして、LHD における重水素プラズマ実験時に必要な中性子計測システムをその目的毎に表 3.6.5-2 に示す。各々の詳細については、次の 2 . 実施計画の中に記す。

なお、発生中性子の絶対量はトリチウム発生量にほぼ等しく、精度よく中性子発生量を計測することは、トリチウム発生量の正確な把握、並びに放射線管理上の点でも必須である。

表 3.6.5-2 LHD 重水素実験において必要な中性子計測機器

| 測定対象           | 得られる物理情報  | 中性子検出器・計測手法   |
|----------------|---|---|
| 総中性子発生率・量      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・核融合出力、核融合利得</li> <li>・巨視的な高速イオンの閉じ込め</li> <li>・イオン温度<br/>(イオンの速度分布にテイル成分が無い場合)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・核分裂計数管</li> <li>・比例計数管</li> <li>・放射化箔 (イオン温度を除く)</li> </ul>       |
| プロファイル         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・中性粒子ビームの加熱分布</li> <li>・高速イオンの径方向輸送</li> <li>・シャフラノフシフト</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・スチルベン有機結晶<br/>シンチレータ</li> </ul>                                   |
| エネルギー<br>スペクトル | <ul style="list-style-type: none"> <li>・イオン温度<br/>(イオンの速度分布にテイル成分が無い場合)</li> <li>・高速イオンの速度分布<br/>(イオンの速度分布にテイル成分が有る場合)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>{}^3\text{He}</math> 電離箱</li> <li>・飛行時間型スペクトロメータ</li> </ul> |
| 14MeV 中性子発生率   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・MeV イオンの閉じ込め特性</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・シンチレーションファイバを利用</li> </ul>  |

## 2) 実施計画

### 2) - 1 総中性子発生率並びに発生量計測システム構成

#### 2) - 1 . 1 システム概要

重水素プラズマでは、中性子の発生に加えてガンマ線の放出を伴う。総中性子発生率を精度良く測定するために、中性子とガンマ線の弁別が容易、且つ長期間にわたって安定動作が望める計測システムを構築する必要がある。また、放電シナリオにより中性子発生率は、ビームイオンの減速時間程度のタイムスケールで  $10^6$  個/秒程度の変化が予測される。よって計測には、計数率に広いダイナミックレンジを有するシステムが必要となる。LHD では、上記の条件を満たし、大型トカマクにおける重水素プラズマ実験の標準検出器と言ってよい  $^{235}\text{U}$  核分裂計数管 (電離箱) を標準検出器として採用する。 $^{235}\text{U}$  核分裂計数管は、熱中性子に対して感度を持つ。D-D 反応により発生した中性子 (2.45 MeV) が十分に減速する厚さ (約 5 cm) のポリエチレンで計数管を覆い、LHD 装置本体周辺の対称性の良い位置に固定設置する。 $^{235}\text{U}$  の核分裂によって出力される計測信号は極めて大きいので、バックグラウンドとなるガンマ線の影響をほとんど受けず、正確な中性子計数を得ることができる。広いダイナミックレンジを確保する目的で、回路にはパルス計数回路と電流モードの一種であるキャンベルモード回路が連動する形のシステムを装備する。キャンベルモードは  $10^4$  -  $10^{10}$  cps という広い計数率範囲で動作し、パルス計数モードとあわせると更に広いダイナミックレンジを得ることが出来る。このシステムには、約 1 ms の時間分解能が期待できる。また、高速中性子 (約 1 MeV 以上) のみに感度を持つ  $^{238}\text{U}$  核分裂計数管を併せて使用する。 $^{238}\text{U}$  核分裂計数管は  $^{235}\text{U}$  核分裂計数管に比して感度が低い。今後の LHD 研究の進展により、LHD プラズマが従来よりも更に高いイオン温度を達成した際に得られる高い中性子発生率に対応することが主たる目的である。加えて、電子サイクロトロン加熱 (ECH) プラズマ等の中性子発生率のごく低い放電を想定し、 $^{235}\text{U}$  核分裂計数管に比して中性子感度が数桁高い  $^3\text{He}$  比例計数管 (パルス計数モード) も併せて採用する。 $^3\text{He}$  比例計数管も  $^{235}\text{U}$  核分裂計数管同様、熱中性子に感度が有るため、ポリエチレンで覆った形で使用する。 $^3\text{He}$  比例計数管と  $^{235}\text{U}$  核分裂計数管のパルス計数モードの間、 $^{235}\text{U}$  核分裂計数管のパルス計数モードとキャンベルモードの間には、重複領域があるので相互較正を行えるという点で大変都合がよい。LHD の重水素プラズマ実験では、これらの感度の異なる 3 種類の計数管を 1 組みとして計 3 セット用意し、このシステムを標準型中性子束モニターとする。

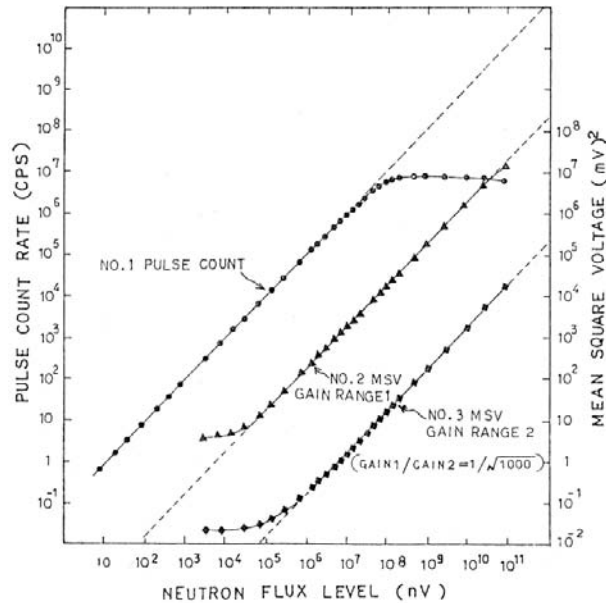


図 3.6.5-1 核分裂計数管出力のパルス計数モードとキャンベルモードの比較。パルス計数モードの場合、中性子束が増えてくると出力パルスが重なり合い直線性が失われる。(参考文献 1 より引用)

上記に加えて、総中性子発生量決定のための補助的な方法として、 $^{115}\text{In}$  などを利用した放射化箔システムを導入する。この場合、測定される中性子束は放電中の積算値であるので、中性子発生率の時間変化が分からないという欠点があるが、ガンマ線に対して不感であり、放射化箔を設置した位置での中性子の絶対量測定が可能であることから、核分裂計数管出力のクロスチェックに極めて有効である。放射化箔は、計測のダイナミックレンジが広いこと、つまり、中性子束が非常に大きい場合であっても、実際の中性子束と測定結果の間の直線性が広い範囲で確保できるという利点もある。また、中性子エネルギー閾値が D-D 中性子エネルギーよりも高い金属箔を選択することにより、トリチウムの反応により二次的に発生する 14 MeV 中性子のみを検出することができ、トリチウムの反応率の絶対測定も可能となる。放射化箔は、LHD 計測機器室から LHD 本体室の標準型中性子束モニタ近傍に気送管にて送られる。放電終了後、次の放電までの間に、中性子束を受けた金属箔は再び気送管にて計測機器室に送り返され、そこで箔より放出されるガンマ線束を Ge 半導体検出器により測定する。この手続きは全て、自動化を図るものとする。これにより、放射化箔位置での中性子の絶対束が評価される。

以上に述べた中性子計数管と放射化箔システムを組み合わせることにより、信頼性の高い中性子束モニターを構築する。

## 2) - 1 . 2 絶対較正実験

重水素プラズマにおける中性子発生量を得るためには、LHD の真空容器近傍に設置した中性子検出器の出力とトーラス全体の総中性子発生量との関係を予め較正して



おく必要がある。中性子発生率  $S_n$  と検出器の計数率  $C_{rate}$  の関係は次のように書ける。

$$S_n \text{ (n/s)} = \alpha \times C_{rate} \text{ (cps)}$$

ここで言う較正実験とは、係数  $\alpha$  を求める作業を指す。中性子源となるプラズマがトーラス状であること、またプラズマと計数管の間には、真空容器、磁場生成コイル、超伝導コイル冷却用の液体ヘリウム、冷却水配管、加熱・計測機器、並びに周辺構造物等が存在し、これらは中性子の散乱・減速材として働くため、両者の間の関係は単純には決まらない。よって、中性子検出器の絶対較正のために、中性子発生率が既知で、且つ重水素プラズマから放出される D-D 中性子のエネルギー (2.45 MeV) に近いエネルギーの中性子を放出する中性子源を予め準備しておく必要がある。較正実験では、トーラス状の中性子源を模擬するために真空容器中心にて容器内を周回させるシステムが必要である。そのために、容器中心にレールを敷設し、そのレール上を中性子源が遠隔操作にて容器中心に沿って移動できるシステムを整備する。TFTR、JT-60U などの大型トカマク装置ではこの手法により較正が行われている。図 3.6.5-2 に、LHD 真空容器内におけるレールシステムの概念図を示す。この較正作業は、中性子発生量を正確に把握する上で欠かせない。参考までに、以前に小型のヘリカル装置 CHS (名古屋大学内東山サイト時代) において、BF<sub>3</sub> 比例計数管 (トーラス中心設置)、<sup>3</sup>He 比例計数管 (大半径方向外側設置) の較正を行った際の様子、並びに得られた較正データについて図 3.6.5-3 に示す。この時、真空容器中心に沿ってプラスチック管を設置し、その中をタコ糸に結ばれた自発核分裂中性子源 <sup>252</sup>Cf を入れ、糸を引っ張ることにより線源を移動させるという方式であった。ただし、LHD で使用する線源強度 (CHS よりも約 3 桁強い線源が必要) や位置精度等の問題から、この方法は LHD には適さない。

磁場閉じ込め核融合装置における中性子計数管の較正方法を標準化することを目的に、1989年に米国・プリンストンで中性子計測の専門家が集まり、中性子計測較正ワークショップが開かれた。この時、1) <sup>252</sup>Cf を真空容器内で回した後に中性子輸送シミュレーション計算で補正する方法、2) 放射化箔を用いてガンマ線測定を行う方法、が推奨されることとなった。LHD では、この2項目に従った形での較正実験を行うことに加えて、D-D 中性子を発生する小型加速器を利用した中性子発生器を用いた較正も行う。その理由については以下に述べる。<sup>252</sup>Cf から放出される中性子の平均エネルギー (2.14 MeV) は、D-D 中性子のそれ (2.45 MeV) に近い値であるが、核分裂に伴い放射される中性子であるが故に、そのエネルギーに大きな広がりを持つ。このことが較正係数に誤差を与える可能性がある。エネルギー分布の違いが較正係数に与える影響を調べるために、MCNP コード等による中性子輸送シミュレーションを行うことはこの問題に対する一つの対処法である。しかしながら計数管周辺にある構造物全てを計算に取り込むのは困難で、また計算に使用する核断面積データの精度の議論もあり、実際には <sup>252</sup>Cf のエネルギー分布を考慮した計算をしても、通常計算値と実測値は精度よく一致しない。較正に、重水素ターゲットに高速重水素ビームを衝突させる小型中性子発生加速管を用いれば、中性子のエネルギー分布の違いから来る影響を取り除くことが出来る。ただしこの場合には、ターゲットから放出される中性

子の発生空間分布が等方的でないという問題を併せ持つ。これらの較正に関わる問題に対して、LHD では出来るだけ高い精度で実験的に較正值が得られるよう2種類の中性子源、 $^{252}\text{Cf}$  と D-D 中性子発生小型加速管を用いて中性子計数管の較正を行う。核融合装置における中性子計測においては先駆的存在と言って良い米国・プリンストン大学プラズマ物理学研究所の TFTR トカマクでは、実際に2つの中性子源で得られた結果を基に較正係数の値が決定されている。真空容器内に設置したレールや加速管自身の存在による中性子の散乱の影響については、中性子輸送シミュレーションにより調べ、必要があれば実験で得た較正係数に補正を加えることとする。中性子計数管較正に必要な中性子源について、表 3.6.5-2 に纏める。

小型加速管を利用した D-D 中性子源は、LHD の中性子束モニターの絶対較正に使用するのみならず、これ以降に述べる中性子計測系の開発を進めるにあたり必要不可欠である。そして、同時にこの中性子発生器を動作させ、中性子計測開発を行うためのテストエリアの確保も必要となることを付記する。

表 3.6.5-2 LHD 中性子計数管の較正に使用する中性子源

|                             | 中性子発生率                  | a)平均エネルギー<br>b)エネルギー分布             | 空間発生分布 |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------|
| 自発核分裂中性子源 $^{252}\text{Cf}$ | 約 $1 \times 10^8$ (n/s) | a) 約 2.14 MeV<br>b) ブロード(< 10 MeV) | 等方     |
| D-D 中性子発生加速管                | 約 $1 \times 10^8$ (n/s) | a) 約 2.45 MeV<br>b) ほぼ単一           | 非等方    |

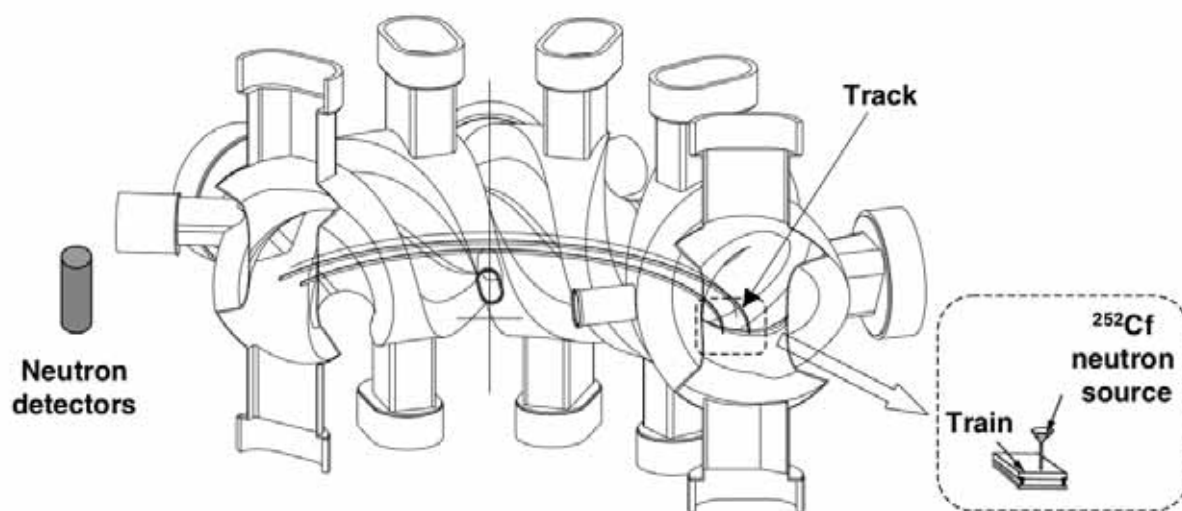


図 3.6.5-2 LHD における中性子束モニターの絶対較正実験の概要図。真空容器内にレールを敷設し、その上を  $^{252}\text{Cf}$  中性子源（もしくは小型中性子発生加速管）を搭載したトロックを周回させる。

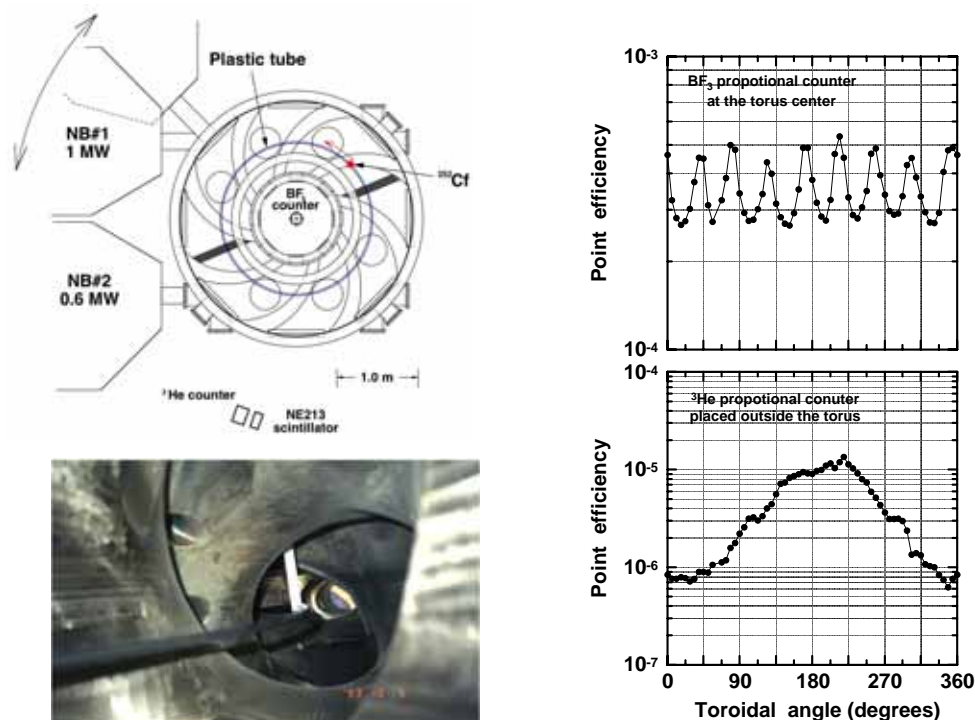


図 3.6.5-3 CHS で行われた中性子計数管較正実験の様子（左図）及びトーラス中心に設置された  $\text{BF}_3$  比例計数管と大半径方向外側に設置された  $^3\text{He}$  比例計数管の効率曲線（右図）（詳細は、参考文献 3 を参照）。

## 2) - 2 中性子プロファイル測定

### 2) - 2 . 1 マルチチャンネルコリメータ

プラズマから放出される中性子のプロファイル計測を行う際、プラズマを見込むように検出器を並べるのみでは正しい計測にはならない。なぜならば、真空容器、周辺構造物、床や壁で散乱された中性子が様々な角度から検出器に飛び込み信号を作るためである。プラズマから検出器に真っ直ぐに飛来する中性子のみを検出するためには、散乱中性子が検出器に届かないよう、遮蔽、吸収材を上手く組み合わせたコリメータを使用する必要がある。LHD では実験開始当初より、将来の重水素実験における中性子プロファイル測定を想定して、縦長断面下側の計測ポート（4.5L）に大半径方向内側から外側に向けて小ポート（ICF70）列が設けてある。プロファイル測定には、これを利用したマルチチャンネルコリメータ方式を採用する。中性子コリメータの具体的設計については、平成 10 年度から 12 年度にかけて実施された LHD 計画共同研究「高指向性中性子検出器を用いた中性子発生プロファイル測定の研究」にて、名古屋大学工学研究科の井口哲夫教授のグループとともに予備的な検討を行った。ここでは、この共同研究において得られた最重要な結果についてのみ記す。

LHD マルチチャンネルコリメータの設計は、中性子・ガンマ線輸送計算コード MCNP を用いて行った。この時、プロファイルモニタの設置位置は、4.5L ポート下の床空間とした。ここに、コリメータと中性子検出器群を設置する。中性子検出器の選

扱については後で述べる。床空間に設置できる架台強度の問題から、中性子コリメータの物質にはポリエチレンを想定した。コリメータ長を 10 cm から 150 cm の範囲で変化させて MCNP 計算を行い、プラズマから検出器へ直接飛来する中性子束と散乱等の相互作用を経て到達する中性子束の比を調べた結果、約 3 cm × 150 cm 長の直円筒コリメータを採用することが最適であるとの結論を得た。図 3.6.5-4 に、コリメータ設計計算に用いた中性子輸送体系、並びに中性子検出器の設置予定位置についての概略図を示す。

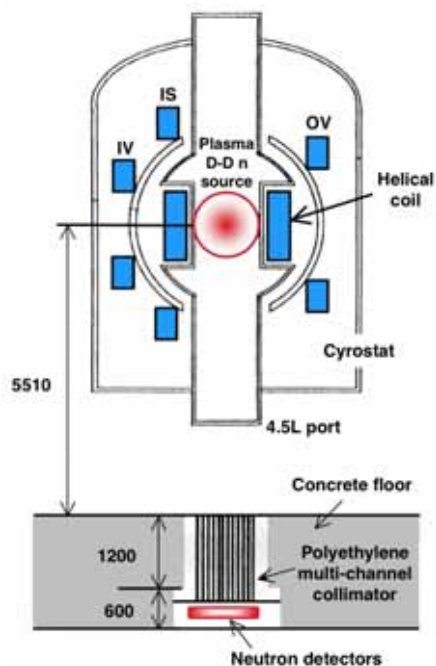


図 3.6.5-4 LHD の中性子プロファイル測定のためのコリメータを設計する際に用いた中性子輸送体系図(ポロイダ断面)。モデルは、実際よりも簡略化されている。ポリエチレンコリメータと検出器群は、床穴空間に設置する予定。

## 2) - 2 . 2 中性子検出器

測定位置は中性子線とガンマ線が混在した場になるので、中性子の検出には、中性子とガンマ線の弁別が可能なシステムが必要となる。具体的には、パルス波形弁別 (pulse shape discrimination : PSD) 回路を検出器に一体に組み込んだ形のスチルベン有機結晶シンチレータを第一候補として考える。このシステムは、JT-60U と JET で使用実績があり信頼性の高いものと判断できる。中性子のエネルギー付与によるシンチレーション光のパルスと、ガンマ線が作るそれは波形が異なる。PSD により、光電子増倍管出力波形をある一定時間積分することにより、即ち電荷の比較を行うことにより、中性子成分の判別が行われ、中性子に起因する信号のみを計数することができる。スチルベン有機結晶シンチレータは、NE213 等他のシンチレータに比して、所謂 n- 弁別性能に優れている。光電子増倍管には対磁気特性に優れたものを使用する。

以前に東京大学・原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」において、高速中性子ビーム照射によりスチルベン有機結晶シンチレータ (31.5 mm × t 25 mm) の指向性 (検出効率の中性子入射角依存性) を実験的に評価した。この時、入射角度が 30 度以下の小さい場合、ほとんど入射角度に依存しない測定結果を得ている。マルチチャンネル中性子コリメータを用いた中性子プロファイルモニタでは、中性子が十分にコリメートされて検出器に到達する。スチルベン有機結晶シンチレータが、この入射

角度領域でほぼ平坦な応答を示したことで、マルチチャンネル型中性子プロファイルモニタ用検出器として適当であると言える。図 3.6.5-5 に、この試験の際に使用した中性子検出器：スチルベン有機結晶シンチレータの全体写真と検出器内部の概略図を示す。

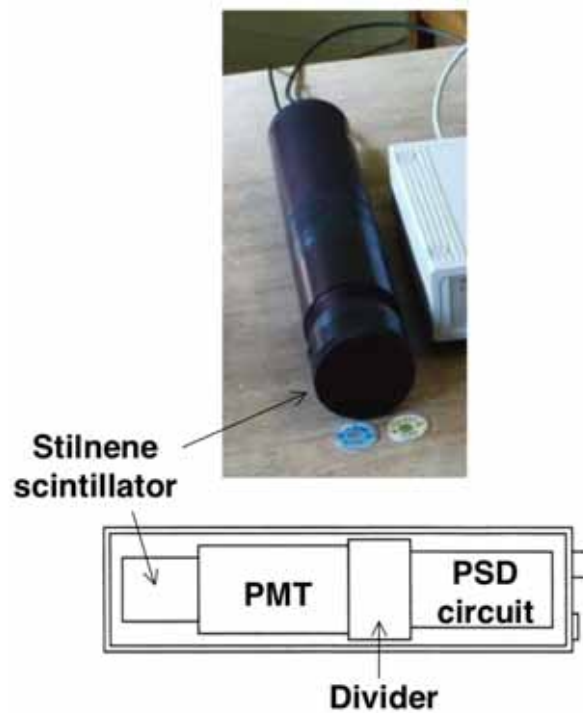


図 3.6.5-5 スチルベン有機結晶シンチレーション中性子検出器の全体写真と検出器内部の概略図

## 2) - 3 中性子エネルギースペクトル測定

ECH プラズマや、重水素プラズマに軽水素 ( $H^0$ ) 中性粒子ビームを入射した場合など重水素イオンがマックスウェル分布をしていると考えてよい場合、D-D 中性子スペクトルのドップラー広がりを測定することにより燃料イオンである重水素のイオン温度を得ることができる。この時、中性子エネルギースペクトルは 2.45 MeV を中心にして、その半値幅はイオン温度  $T_i$  の関数で、近似的に以下のように表される。

$$E \text{ (keV)} = 82.5 \cdot T_i \text{ (keV)}^{1/2} \text{ (D-D 中性子)}$$

プラズマ中にビームイオン等のテイル成分が存在する場合には、その存在を反映した形のエネルギースペクトルとなり、逆にそのスペクトル形状からビームイオンの速度分布関数の情報を得ることができる。

計測対象となるプラズマのイオン温度にも依るが、スペクトロメータの性能には、できるだけ高いエネルギー分解能を求めたい。LHD の重水素実験における D-D 中性子スペクトロメータには、市販の  $^3\text{He}$  ガスグリッド付き円筒電離箱を第一に考える。 $^3\text{He}$  ガス電離箱は、高エネルギー分解能 (D-D 中性子に対して 1-2 %) と高検出効率を兼ね備えており、また使用方法も比較的簡便なため、従来より中性子断面積測定な

どの核物理実験やトカマクのオーミック加熱重水素プラズマにおける中性子スペクトロメトリに使用されている。中性子スペクトロメータは、LHD 装置近傍にコリメートした形で1基設置する。この場合、速中性子を検出するため減速材は用いない。なお、中性子プロファイルモニタでの使用を考えているスチルベンシンチレータにより中性子スペクトルの取得は原理的に可能ではあるが、エネルギー分解能(4-5%)の問題から有益な物理量を得るのは困難である。

## 2) - 4 14 MeV 中性子測定

一次反応の結果生成されたトリトン(1.01 MeV)がプラズマ中での減速過程において背景プラズマの重水素イオンとの間で核融合反応を起こし、微量ではあるが D-T 中性子(14 MeV)が発生する。LHD では、これまで述べてきた中性子計測システムに加えて、14MeV 中性子のみを選択的に検出する測定システムも整備する。

一放電あたりの D-T 反応の割合を調べるのであれば、放射化箔を用いるのが簡便であるが、これは先に述べたように時間積分した情報しか提供しない。核融合プラズマ実験においては、やはり放電中の時間変化に興味を持たれる。そこで、検出器には多数のプラスチックシンチレーションファイバを利用した指向性中性子検出器を考える。束のように並べた多数のシンチレーションファイバの軸方向を、プラズマに向けて設置する。ファイバコア材中でのトリトン燃焼中性子による反跳陽子の最大飛程(約2.2 mm程度)よりもファイバの直径を小さくすることで、14MeV 中性子に対して指向性を持たせることができる。ガンマ線やトリトン燃焼中性子よりも約2桁多いと予想される D-D 中性子が存在する場合において、大きなパルスのみを波高弁別することでファイバの軸方向に沿って入射したエネルギーの高いトリトン燃焼中性子に起因する信号のみを取り出すことができる。従来、大型トカマクでこの目的のため用いられてきた Si 半導体検出器は、耐放射線性が非常に悪く、真空容器近傍に設置した場合数ヶ月程度しか性能を維持できないという問題を抱えていた。この検出方式を採用することにより、長期間にわたって検出器の安定動作が期待できる。LHD の重水素実験ではこのタイプの検出器を、プラズマ全体を見込む形で1基、プロファイル測定を意図してコリメートした形で3基、計4基装備する。

## 3.6.5.2 高エネルギー粒子計測システム

### 1) はじめに

重水素プラズマでは、D-D 核融合反応の結果、トリトン(1.01 MeV)、<sup>3</sup>He イオン(0.82 MeV)、プロトン(3.03 MeV)といった高エネルギーの核反応生成物が生成される。これらは、生成時に速度空間において等方的な形で放出される。

LHD の重水素実験では、核反応生成物の挙動を精査するために、損失核反応生成物を真空容器内で直接検出するシステム、損失高エネルギーイオンの衝突に起因する真空容器壁上の局所熱負荷を測定する赤外線カメラ、及び、MeV 領域の高速中性粒子の



エネルギー分布測定が可能なダイヤモンド検出器アレイの導入を計画している。損失核反応生成物の損失位置、並びにそのエネルギーやピッチ角 ( $v_{\parallel}/v$ ) を詳細に調べることにより、それらの軌道損失過程を明らかにし、高エネルギー核反応生成物の軌道損失を抑えることのできる磁場配位の探求に役立つ。

また、協同トムソン散乱はプラズマ中に閉じ込められた高エネルギーイオンの速度分布関数を計測するのに適しており、そのイオンの減速過程を追跡することが出来る。高温・高密度プラズマに必要な高出力・単一モードかつ高繰り返し周期の炭酸ガスレーザーをプラズマ中に入射し、その散乱光を測定する。これにより、重水素実験では核融合反応で発生する MeV トリトン等の核反応生成物の速度分布関数を得ることが可能となる。

## 2) 実施計画

### 2) - 1 ヘリカルアレイ損失高エネルギーイオンプローブ

耐熱シンチレータを用いて、高エネルギー核反応生成物のエネルギー分布とピッチ角を同時計測する多チャンネルシステムを導入する。高速荷電粒子のセンサとなるシンチレータを金属ボックスの中に設置し、その一つの面に二段の入射口を設ける。核反応生成物の衝突によりシンチレータ上に現れるシンチレーション光の二次元分布は、イメージファイバにより真空容器外へ伝送される。この光の二次元分布を C-MOS イメージセンサ、もしくは CCD カメラにより測定することで、損失高エネルギーイオンのエネルギー分布とピッチ角を同時に測定することが出来る。この方式は、TFTR、CHS 等の装置で実績があり、通常損失高速イオンプローブと呼ばれている。また、軌道損失に加えて、トロイダルアルヴェン固有モード (TAE) に代表される高速イオン励起 MHD 不安定性により、高エネルギーイオンが異常損失する可能性がある。この場合、損失高速イオン束は、1 ミリ秒以下の短い時間スケールで変化する。高速イオン励起 MHD 不安定性に起因する速い現象を追跡するためにイメージファイバにより伝送されたシンチレーション光の二次元イメージをビームスプリッターで二系統に分け、一系統を高速測定が可能な光電子増倍管にて計測する。仮に核反応生成物が軌道損失するとすれば、その軌道に応じて、基本的には大半径方向の外側 (co-通過粒子) と内側 (counter-通過粒子)、また二本のヘリカルコイルの谷間の沿った位置 (ヘリカルリップル捕捉粒子) に損失してくると考えられる。本研究では、これらの位置に損失高速イオンプローブを並べてアレイ化し、損失核反応生成物の多地点検出を行う。核反応生成物の損失位置、即ち損失高速イオンプローブの設置位置については、今後詳細な軌道計算による検討を行った後に決定する。ZnS(Ag) に代表される荷電粒子用シンチレータに基づく損失高速イオンプローブは、ある一定量以上の粒子束を受けると性能が劣化することが知られている。よって、シンチレータの代わりとなる可能性を持つファラデーカップ型損失高速イオンプローブも二番目の選択肢として考える。この場合、シンチレータ型に比して耐放射線性には優れているが、エネルギー、ピッチ角分解能が幾分犠牲になる。図 3.6.5-6 に、ヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブの概略図を示す。



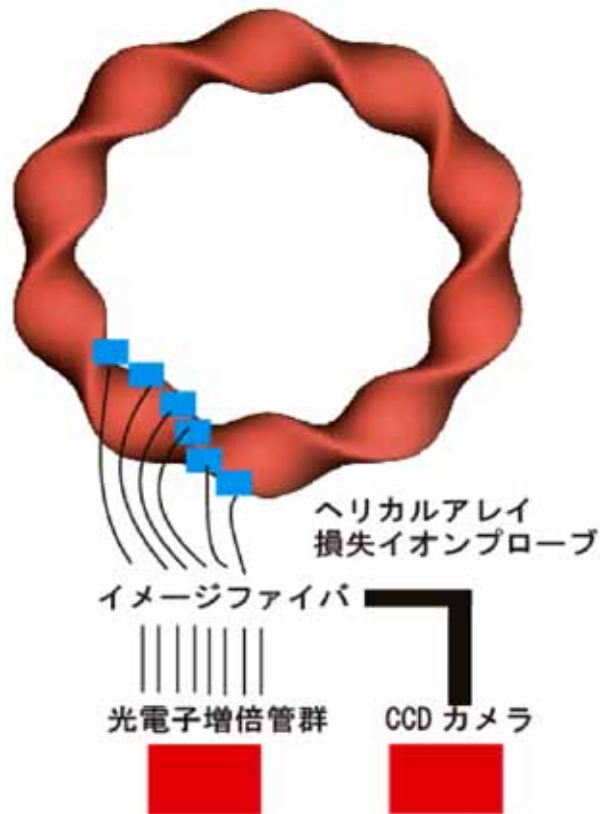


図 3.6.5-6 ヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブの概念図。

## 2) - 2 高速赤外線カメラを利用した損失高速イオン計測

軌道損失高エネルギーイオンは、最終的に真空容器壁に衝突する。LHD の重水素実験では、高エネルギーイオンが衝突すると見込まれる位置を見込む形で高速赤外線カメラを設置し、真空容器壁上の温度変化を観測する。これにより、高エネルギーイオンの損失位置、並びに損失量を定量評価できる可能性がある。本計測器の特長は、設置が比較的簡便で、真空容器内を広い領域にわたって計測できる点にある。一方で、本計測のみでは真に高エネルギー粒子損失に起因した熱負荷か否かを断定することができないため、先に述べたヘリカルアレイ型損失高速イオンプローブと併用した形での使用が望ましい。

JT-60U では、高エネルギーバナナイオンの損失、並びに離散的トロイダルコイルが作る所謂 TF リップルに捕捉された高エネルギーイオンの損失によると考えられる局所熱負荷を赤外線カメラにより測定した後、粒子軌道計算コードとの比較が行われた。その結果、両者の間に良い一致が得られている。

## 2) - 3 高速中性粒子分析器

プラズマ中に閉じ込められた MeV 領域高エネルギーイオンのエネルギー分布は、

高エネルギーイオンの挙動を理解する上で重要な情報となる。そのために、MeV イオンがプラズマ中で不純物と荷電交換反応を起こした結果、閉じ込め領域から逃げてくる高速中性粒子を検出し、そのエネルギー分析を行う測定システムを用意する。高エネルギーイオンの径方向輸送を調べる観点から多チャンネル測定とする。具体的には、1) 検出器が小型であることから多チャンネル化が容易、2) MeV 領域の粒子測定が可能、3) 耐放射線性に優れている、等の特長を持つダイヤモンド検出器を選択する。ダイヤモンド検出器は、トカマク実験において MeV プロトンが荷電交換した後の高エネルギー水素原子の検出に成功しており、LHD の重水素実験においてもその性能を十分に発揮することが期待される。LHD では、重水素実験にむけて4個のダイヤモンド検出器を用意し、高エネルギー核反応生成物の閉じ込め研究を行う。図 3.6.5-7 に、検出器全体写真を示す。



図 3.6.5-7 小型高速中性粒子分析器：ダイヤモンド検出器の全体写真。

#### 2) - 4 協同トムソン散乱計測

光源はポートサイズが小さいことやプラズマからの大きな背景光がないなどの利点から炭酸ガスレーザーを用いる。電子の協同的運動を観測することから、そのレーザーの散乱角は微小散乱角約1度程度となる。LHD の大半径方向外側の横長断面から入射した炭酸ガスレーザーは、トーラス中心部で入射周波数成分のみビームダンプで吸収される。ドップラーシフトされた散乱光は反射され、受信システムによりヘテロダイン検波される。

炭酸ガスレーザー、伝送システム、受信システムの設置と光軸調整を行う。その後、取得した計測データを処理するための収集システムを整備する。開発要素としては、高出力・単一モードかつ高繰り返し炭酸ガスレーザーとその受信システムを新たに開発する必要がある。炭酸ガスレーザーの単一モード化と高出力・高繰り返し化を徐々に進める。参考として JT-60U で使われた炭酸ガスレーザーの仕様を表 3.6.5-3 に記す。また、LHD における協同トムソン散乱計測の概要図を図 3.6.5-8 に示す。

表 3.6.5-3 炭酸ガスレーザーの仕様

|             |                        |
|-------------|------------------------|
| Wavelength  | 10.6 $\mu\text{m}$     |
| Laser power | 15 J                   |
| Pulse width | 10 $\mu\text{s}$       |
| Repetition  | $\sim 0.1 \text{ sec}$ |
| Divergence  | 0.5 mRad               |
| Diameter    | 4 cm                   |

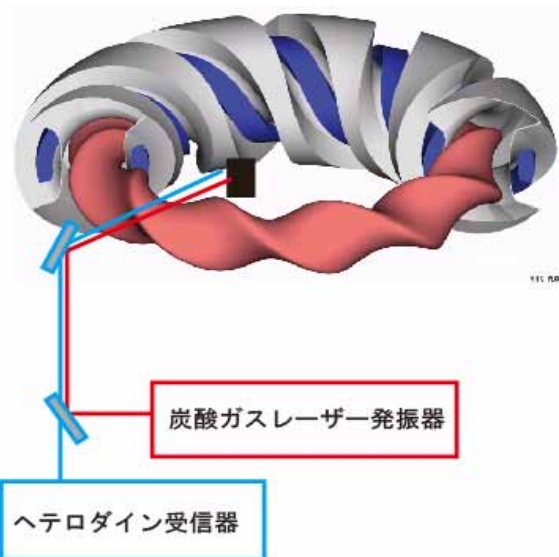


図 3.6.5- 8 LHD における協同トムソン散乱計測の概要図

### 3.6.5.3 高精度輸送計測システムの整備

#### 1) はじめに

##### 1) - 1 必要理由

重水素プラズマ中では熱や粒子の輸送障壁の生成により高閉じ込めが得られることが期待されている。輸送障壁とは熱・粒子の移動が遮断される領域のことで、要するに断熱層である。輸送障壁がなければプラズマをいくら加熱しても1億度にするには至難である。逆に、輸送障壁の圧力勾配を適切に制御できれば、ヘリカルに比べて定常維持が困難なトカマクにおいてさえ、自発的に発生するプラズマ電流の安定な維持ができるので、定常トカマク炉を作ることができると考えられている。すなわち、輸送障壁の生成と安定な維持が核融合実現の鍵である。

現在、トカマクやヘリカルでは輸送障壁の生成に成功しているが、その物理機構は未だ解明されていない。例えば、トカマクにおいては軽水素プラズマでは輸送障壁の

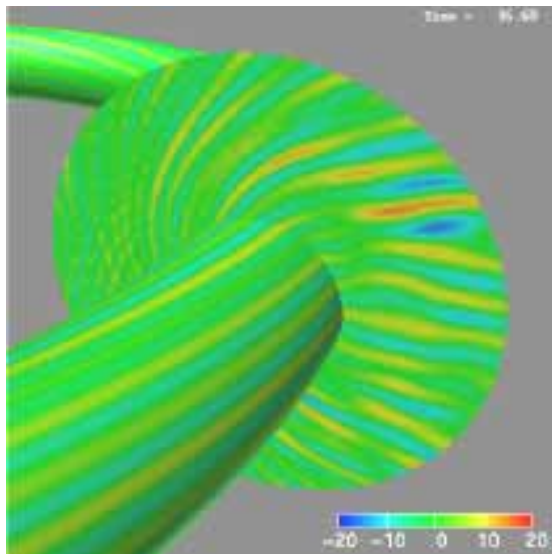
生成は困難であるが、重水素プラズマ中では容易に輸送障壁が生成される。しかし、その理由は全く分かっていない。物理機構が不明のままでは輸送障壁の制御は困難である。そのため、輸送障壁の物理機構解明は重要な課題となっている。実際、各国は、輸送障壁の物理機構解明の激しい競争を行っている。

## 1) - 2 目的

本計測システムの究極の目的は輸送障壁の物理機構解明である。

輸送障壁の物理機構の有力な理論は、「激しい熱伝導を引き起すのは乱流であり、

(a) 帯状流発生前



(b) 帯状流発生後

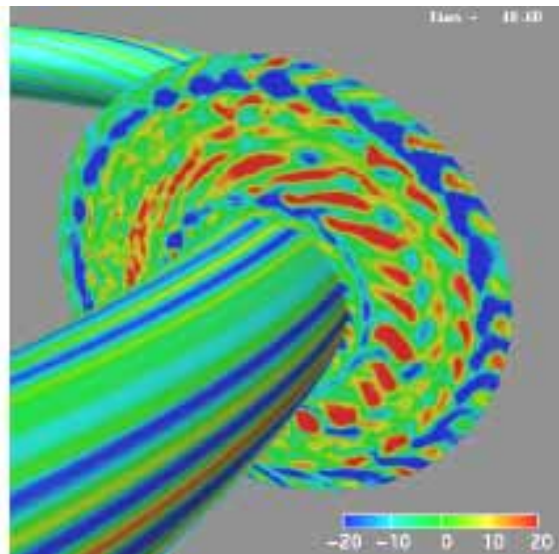


図 3.6.5-9 帯状流の発生前と発生後の乱流構造の変化。(T.-H. Watanabe, H. Sugama, and S. Ferrando | Marger, Proc. Joint Varenna-Lausanne International Workshop on Theory of Fusion Plasmas, AIP, 2006.)

帯状流が乱流構造を遮断すると輸送障壁が生成する」というものである。例えば昔のガス風呂のように水を上から加熱しても風呂の表面の水は熱くなっても底は冷たいままとなる。そこで水をかき混ぜると均一の温度になる。流体は静かであれば熱伝導は良くないが、かき混ぜる(乱流をつくる)ことで非常に大きな熱伝導を引き起こす。

理論では、図 3.6.5- 9 (a)に示すように、プラズマには内と外をかき混ぜる大きな乱流構造がありそれが粒子を拡散し大きな熱伝導を引き起す。ところが、帯状流が現れると、図 3.6.5- 9 (b)に示すように、大きな乱流構造を引きちぎってしまう。(帯状流とは互いに逆向きの流れである。木星の縞模様も帯状流である。)乱流構造間では粒子が混ざらないために熱・粒子の移動が遮断される、というのである。

本計測システムの目的は、輸送障壁の物理機構解明のために乱流構造の可視化を目指すものである。

### 1) - 3 概要

乱流がなければ静かな水面のようにでこぼこは見られないはずだが、乱流構造は電子密度や電子温度の高い部分あるいは低い部分のかたまりとなり、それが運動するように見えるはずである。したがって、電子密度と電子温度の画像計測を行うことで、乱流を観測できるはずである。

しかし、乱流が磁気面上を動いても熱や粒子は逃げない。なぜならプラズマは磁気面が何層も重なって閉じ込めるものであり、もともと磁気面上では粒子も熱も自由に動けるからである。図 3.6.5- 9 (a)に見えるような磁気面を横切る乱流構造が粒子や熱の移動を引き起す。すなわち、深さ方向の運動が重要となる。そこで、平面画像だけでなく深さ方向も含めた、電子密度と電子温度の 3 次元高分解能計測が重要となる。

プラズマはほとんどの光では透明だがマイクロ波では不透明であり、色が付いていると言っても良い。プラズマから放射される電子サイクロトロン波はマイクロ波である。これは強度が電子温度に比例し、周波数が磁場に比例するため、局所的電子温度の時間変化測定のための標準的計測法としてよく使用されている。また、プラズマは短波長の可視光では透明だが長波長の電波を反射する。透明と反射の境界がマイクロ波領域である。この境界層でマイクロ波が反射されるが、その波長は境界での電子密度の自乗根に反比例するので、反射波の波長から電子密度がわかる。すなわち、境界層の揺動が反射マイクロ波の揺動となるので、大変鋭敏な計測が可能である。

マイクロ波の波長は長く、LHD プラズマの電子サイクロトロン放射 (ECE) の波長はおよそ 2 mm 前後であり、反射光の波長はおよそ 5 mm 前後である。分解能は波長の 5 倍前後であるので、反射マイクロ波イメージングの分解能はおよそ 25 mm 前後となる。空間分解能 25 mm でも大変有用だが、望ましい空間分解能はイオンが磁力線のまわりを回転する半径 (イオン・ラーマー半径、およそ 3 mm 前後) である。究極の空間分解能は電子のラーマー半径 (およそ 0.1 mm 前後) である。究極の空間分解能を得るためには可視光で測定すればよい。

中性粒子ビーム発光分光イメージングは可視光で電子密度揺動の空間分布の時間変化を測定できる。そのため、究極の空間分解能を得ることが可能である。ただし、発光強度が小さいため、低感度である。

これらのイメージング計測法では、マイクロ波イメージングは高感度だが低空間分解能、中性粒子ビーム発光分光イメージングは高空間分解能だが低感度である。電子サイクロトロン放射イメージングでは電子温度計測器であり、反射マイクロ波イメージングは電子密度の計測器である。したがって、これらをうまく組み合わせることが重要である。

特に、トロイダル方向に異なる複数の場所に設置することが重要である。主な理由は 2 点である。第一に、バルーニングモード等の局所的 MHD 不安定性を同定する場合、トロイダル方向の 1 ヶ所だけで存在し、他所では存在しないことを証明しなければならない。第二に、帯状流を同定する場合、トロイダル方向に一様に流れていることを証明しなければならない。



## 1) - 4 予想される成果

本計測システムでは乱流構造を可視化するために電子密度と電子温度の3次元高分解能計測を行う。「乱流構造の可視化を行う」ことは容易ではないが、本計測システムの完成により、少なくとも短波長のMHD不安定性と静電不安定性を可視化することが可能である。現在の理論では、これらの不安定性が乱流の主体と考えられているため、乱流の物理に大きく寄与可能である。

MHD不安定性とは磁気面の運動を伴う不安定性であり、磁気面が破壊すると急速な熱や粒子の損失が発生するので非常に危険な不安定性である。従来の計測器では短波長のMHD不安定性の観測ができなかった。しかし、研究の進展により、バルーニングモードとよばれる、まるで磁気面が風船のように膨らんで破裂するかのような短波長の局所的な不安定性がトカマクプラズマの性能の上限を決めていることが分かった。磁気面上では電子が自由にほぼ光速で走り回っているため、等電子温度面と磁気面は同一視できる。本計測システムの電子サイクロトロン放射イメージング(ECEI)では電子温度の3次元分布の時間変化が計測できるため、ヘリカルでもバルーニングモードのような短波長の観測が可能となり、ヘリカルプラズマの性能を決める物理機構が明らかになる。

反射するマイクロ波の周波数は電子密度で決まるため、反射マイクロ波は電子密度変動に大変敏感である。磁気面上では電子密度は一定であるため、反射マイクロ波イメージングによって電子サイクロトロン放射イメージングと同様、短波長のMHD不安定性の観測が可能となる。また、プラズマ中には電子温度が変化しなくても電子密度が変動する不安定性がありこれを静電不安定性と呼ぶ。現在の理論では、乱流は静電不安定性によって生成されると考えられている。また、静電不安定性は波長が短い。したがって、本計測システムの反射マイクロ波イメージング(MIR)が完成すると、従来未知だった短波長静電不安定性の物理研究が飛躍的に進歩すると思われる。

中性粒子ビーム発光分光イメージングが完成すると、振幅の大きな電子密度揺動を究極の空間分解能で観測可能である。とくに帯状流の幅は大変狭いので中性粒子ビーム発光分光イメージングが大いに期待される。

## 2) 実施計画

### 2) - 1 マイクロ波イメージングシステム

#### 2) - 1 - 1 原理

図 3.6.5-10 に示すように電子は磁力線のまわりをマイクロ波の周波数で回転運動しているため、マイクロ波を放射・吸収する。高電子温度のプラズマからは強力なマイクロ波が放射される。これを電子サイクロトロン放射(ECE)とよぶ。ECEの周波数は磁場に比例し、場所によって異なる。したがって、異なる周波数のECEを同時測定することで深さ方向の電子温度を測定できる。このように周波数分解をするマイクロ波カメラを用いることで、電子サイクロトロン放射の3次元イメージング計測ができる。

また、プラズマは電波を反射する性質を持つ。反射周波数より高い周波数のマイク

口波は透過し、低い周波数は反射する。反射周波数は高密度では高く、低密度では低い。したがって周波数分解をするマイクロ波カメラを用いることで、反射マイクロ波の3次元イメージング計測ができる。

図 3.6.5-11 に典型的な LHD プラズマでの電子サイクロトロン放射の周波数と反射マイクロ波の周波数を示す。電子サイクロトロン放射の周波数は反射マイクロ波の周波数よりかなり高いので、ダイクロイックフィルタを用いて分離できる。マイクロ波領域のダイクロイックフィルタとは、アルミ厚板に円孔を開けたものである。遮断波長は孔の直径に比例する。核融合科学研究所ではダイクロイックフィルタをビームスプリッタとして用いるために、角度 45 度の円孔を開けたダイクロイックフィルタを開発した。

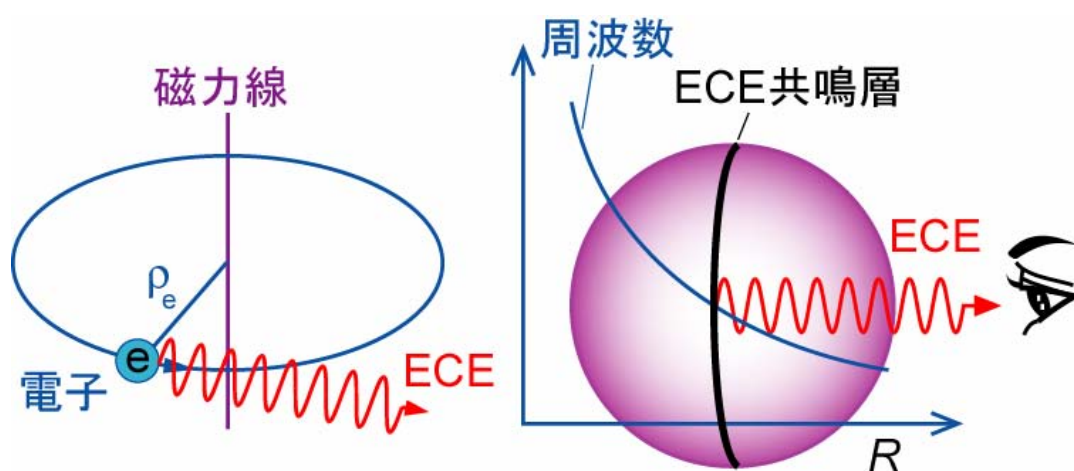


図 3.6.5-10 電子サイクロトロン放射 (ECE) の原理。



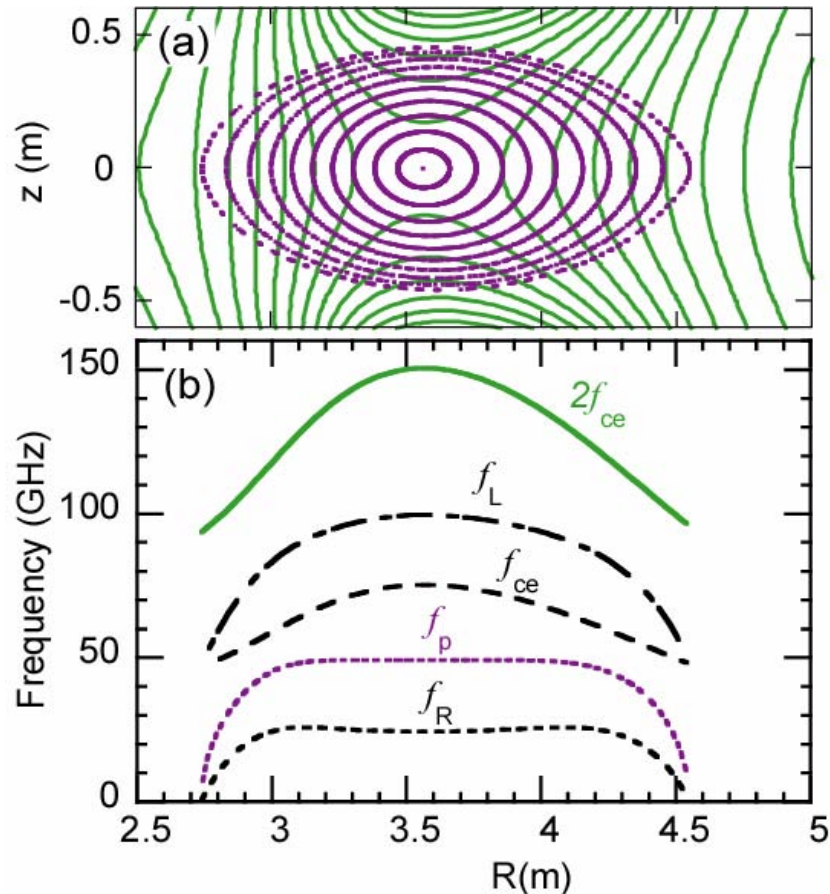


図 3.6.5-11 典型的な LHD プラズマでの電子サイクロトロン放射の周波数 ( $2f_{ce}$ ) と反射マイクロ波の周波数 ( $f_p$ )

## 2) - 1 - 2 光学系と受信機

図 3.6.5-12 に電子サイクロトロン放射イメージングシステムと反射マイクロ波イメージングシステムの模式的な光学系と受信機のブロックダイアグラムを示す。電子サイクロトロン放射と反射マイクロ波はダイクロイックフィルタを用いて分離することで、イメージング光学系を共用する。また、同じプラズマを電子サイクロトロン放射と反射マイクロ波の両方で観測することで、電子温度と電子密度の変動の時間差を計測でき、プラズマのダイナミクス観測の強力な武器とすることができる。

電子サイクロトロン放射イメージングシステムと反射マイクロ波イメージングシステムの受信機はほとんど同じである。その差は、検出器用発振器 (LO) の周波数とフィルタが異なるだけと言って良いほどである。これらはほとんど高周波プリント基板上に、マイクロストリップライン回路として作り込まれる。

両者とも 2 次元マイクロ波検出器でプラズマからのマイクロ波に LO のマイクロ波を混合し、中間周波数 (IF) に変換する。一度増幅後、もう一度、異なる周波数の高周波 (第二 LO) と混合し、第二中間周波数に変換する。第二中間周波数は全て同じ周波数であり、同じ周波数のフィルタを通した後、中間周波増幅後、検波し直流信号とする。

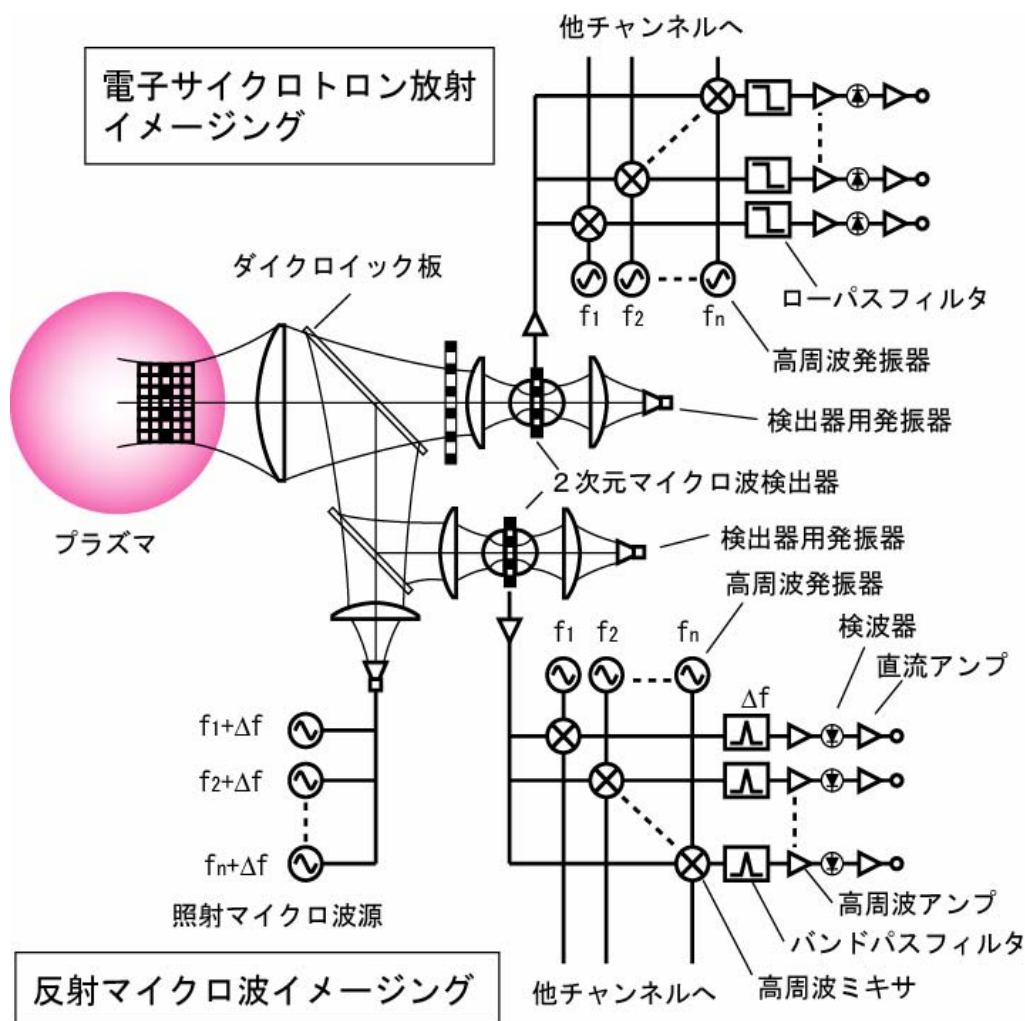


図 3.6.5-12 マイクロイメージングシステム。一つのイメージング光学系を共有し、ダイクロイック板で周波数分離をして、電子サイクロトロン放射イメージングと反射マイクロ波イメージングに分離する

### 2) - 1 - 3 電子サイクロトロン放射イメージングシステム

電子サイクロトロン放射イメージングシステムでは第二中間周波数についてローパスフィルタを用いる。その理由は第二中間周波数には、第二 LO の周波数を中心とした帯域のみを選択するためである。

また、フィルタの帯域は 300MHz ~ 500MHz と広い。これは、広い帯域の電子サイクロトロン放射周波数を検波することで大きな信号を得るためである。

### 2) - 1 - 4 反射マイクロ波イメージングシステム

反射マイクロ波イメージングでは複数の周波数のマイクロ波を混合して、プラズマに照射し、その反射を受信する。各周波数が、各電子密度に対応するので、広い周波数帯域を用いるとプラズマの半径方向の測定範囲が広がる。各照射マイクロ波源は検出器用発振器を元として、アップコンバータとマイクロ波増幅によって、差周波数と

位相まで検出器用発振器にロックした精密なマイクロ波である。これを用いることにより、第二中間周波数フィルタとして、中心周波数 110MHz、帯域 1MHz の狭帯域フィルタを用いることができる。そのため、高感度受信が可能となり、セルが小さいためホーンアンテナと比べて感度の低い 2 次元マイクロ波検出器であっても、高感度受信が可能となる。

## 2) - 2 中性粒子ビーム発光分光イメージングシステム

LHD プラズマは高温すぎてイオンが完全電離しており可視光を発光しない。そこで、中性粒子ビーム(NBI)を入射すると、完全電離イオンに NBI が持ち込む電子が結合して特定の波長の可視光を発光する。これを利用することで究極の空間分解能で乱流の可視化が可能である。これを「中性粒子ビーム発光分光イメージング」と呼ぶ。

中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムの概念図を図 3.6.5-13 に示す。中性粒子ビームからの発光を分光フィルタで特定の波長のみを取り出し、高速度カメラで受光する。光量が少ないのでいかに集光するか、背景光をいかに取り除くかが重要である。

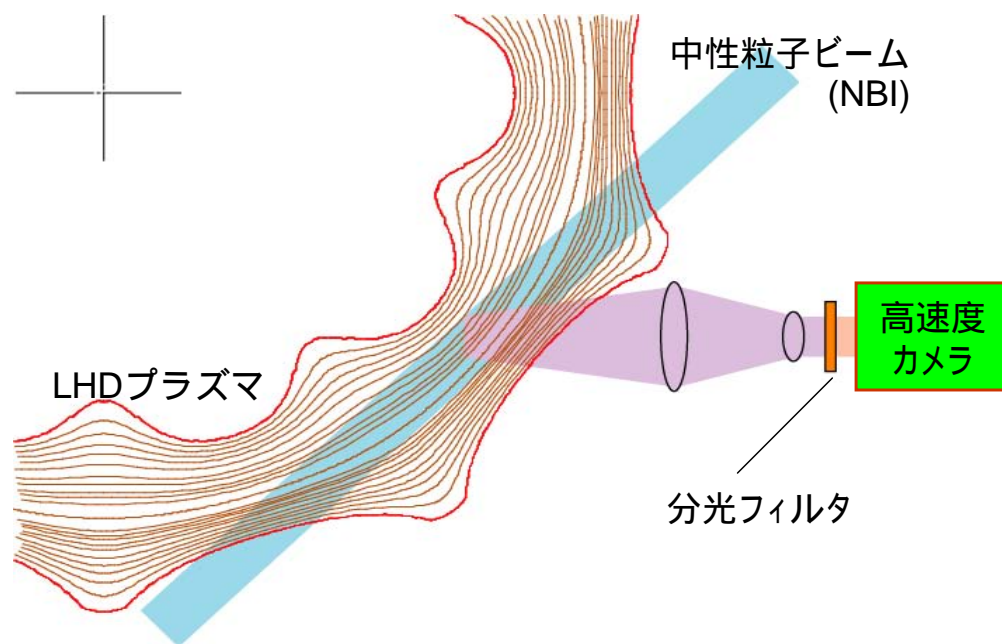


図 3.6.5-13 中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムの概念図

## 2) - 3 3次元トモグラフィー計測ステーション

直流信号には大きな直流オフセット成分があるので、直流オフセットを除いた部分を直流増幅し、デジタイザとコンピュータでデータ収集する。この直流オフセット除去回路は核融合科学研究所で開発し、現在使用中である。2次元マイクロ波検出器は空間的に多チャンネルのセルを持ち、周波数としても多チャンネル測定するので、1つのマイクロ波検出器当たり、大変多くのチャンネルの高速デジタイザが必要である。

また、トロイダル方向に2ヶ所、各所で電子サイクロトロン放射イメージングと反射マイクロ波イメージングをすればその4倍の、高速デジタイザで収集する。また、中性粒子ビーム発光分光イメージングシステムでは高速2次元カメラでデータ収集を行う。1つのコンピュータで80チャンネルの高速デジタイザを持つことができるので、多くのコンピュータとデータ保存システムが必要である。データ保存システムとしては青色レーザーを用いたディスク型データ保存システムを想定している。

上記、3種類のイメージングシステムをトロイダル方向に複数ヶ所設置して得られるデータは、計算処理によって、不安定性の同定、乱流構造の物理的性質を求めることができる。計算処理としては局所計測である電子サイクロトロン放射イメージングが最も容易であり、電子温度の3次元分布およびMHD不安定性の3次元的可視化が可能である。

しかし、反射マイクロ波は視線方向の密度により位相変化を受けるため、トモグラフィ計算が必要である。また、どのイメージングシステムのデータであっても、乱流の波長や進行方向を求めるには、相関計算が必要となる。

すなわち、データ処理には、ハード的にもソフト的にもかなりの分量となる。しかし、これまでのLHDのデータ処理では毎ショット100MBもの膨大なデータを収集しており、十分な実績がある。

### 3.6.5.4 ダイバータ計測システム

主プラズマ閉じ込めの高性能化を目的とした重水素実験の一環として、ヘリカルダイバータの閉構造化を行う。閉構造化により、ダイバータで発生した不純物やリサイクリング粒子がプラズマ周辺部へ侵入することを妨げる。ペレット入射による主プラズマへの直接燃料補給と組み合わせ、主プラズマ閉じ込め性能の向上を目指している。

表 3.6.5.4-1 ダイバータ計測システムの計測対象と計測手法。

| 計測対象   | 計測手法                           |
|--------|--------------------------------|
| 電子密度   | 分光、干渉計、トムソン散乱、粒子ビームプローブ、静電プローブ |
| 電子温度   | 分光、トムソン散乱、粒子ビームプローブ、静電プローブ     |
| イオン温度  | 分光、静電プローブ(イオンセンシティブプローブ)       |
| 不純物    | 分光、フィルタ付き CCD カメラ              |
| プラズマ流  | 分光、静電プローブ(マッハプローブ)             |
| 放射パワー  | ボロメータ                          |
| 中性粒子圧力 | 高速イオンゲージ                       |

バッフル構造内側のダイバータ室内には、排気設備を設けてリサイクリング粒子の排気を行う。これにより、高性能プラズマの長時間保持が可能となる。

最外殻磁気面近傍からダイバータへ至る輸送過程、ダイバータ室内におけるダイバータプラズマ特性を明らかにすることが本システム構築の目的となる。そのために必要な計測項目と計測手法を表 3.6.5-4-1 に示す。

周辺プラズマ領域の計測については、現行の計測システムが適用可能であるが、時間及び空間分解の、より高い計測が必要である。従来、高い空間分解能をもった周辺プラズマ分布計測を目的として高速駆動型静電プローブ計測が行われてきたが、高加熱入力及び長時間計測への対応は難しい。そこで、より優れた計測手法で、周辺プラズマ領域のパラメータ分布を高い時間分解能で、長時間計測できる計測システムを構築する必要がある。電子密度・温度計測については、周辺プラズマ計測に特化したトムソン散乱計測及びLiやHeを用いた粒子ビームプローブ計測システムを新たに構築する。

イオン温度については分光的手法を主として、高速駆動型静電プローブ(イオンセンシティブプローブ)による空間分解の良い計測も行う。

周辺プラズマ中のプラズマ流の計測については、現在まで行われていないが、静電プローブ計測手法の一つであるマッハプローブが適用可能であり準備を進めている。しかし上で述べたように高加熱入力への対応は難しく、やはり分光的手法による計測も立ち上げる必要がある。

LHDの場合、ベルジャーの中にプラズマ真空容器があるため、ポートからプラズマまでの距離が遠く、計測上問題になることがある。そこで、観測窓及びシャッターを備え、分光、ボロメータ、CCDカメラ等の計測機器を納めて、プライベート領域からこれら計測器を真空容器内へ挿入できる駆動型計測ステーションを設置する。これにより、周辺プラズマ及びダイバータ室外のダイバータレグプラズマ計測を詳しく行うことが可能となる。計測ステーションは、プラズマからの放射パワーによって温度が上昇しないよう、水冷を施す必要がある。

ダイバータ室内のプラズマは、ポートや上記計測ステーションからの計測は困難であり、ダイバータ室内に計測器を設置する必要がある。電子密度・温度計測用の静電プローブは、現行のダイバータ板埋め込み型が使用可能である。ダイバータプラズマ密度の高時間分解計測のため、干渉計をダイバータ室内に設置する。ダイバータ室を形成することにより、ダイバータ部の中性粒子圧力が従来の「開いた」ヘリカルダイバータ配位時に比べて増大し、プラズマと原子・分子の相互作用が促進されると考えられる。そのため分光計測による原子・分子過程計測は必須である。ダイバータ室内に光ファイバアレイを設置して分光計測を行う。放射パワー計測も分光計測と同様に、ダイバータ室内にボロメータ、例えばAXUVDアレイを設置してダイバータレグに沿った放射パワー分布計測を行う。ダイバータ室内の中性粒子圧力は、ASDEX型の高速度イオンゲージをダイバータ室内に設置して行う。図3.6.5-14に、ダイバータ部プラズマ計測の概要を示す。

### 3.6.5.5 定常・高速データ収集処理システム

#### 1) はじめに

重水素実験では、通常の軽水素( $H_2$ )を用いる実験に較べて大幅に実験回数が減ることから、1回の実験でより内容の濃い計測データ集録を行う必要がある。このため、



基本的に全プラズマ計測の定常実時間での運用と、揺動計測などに代表される空間的・時間的に大容量データを生む計測の超高速データ収集を行うことが求められる。同時に、実験遂行中あるいは次回実験が開始されるまでの短い時間内で、詳細なデータ解析をおこない、その結果をできる限り速やかに次回に反映させることができるよう、高速かつ実時間処理が可能なデータ解析計算機クラスタも稼働させる。

他方、重水素実験の間中は LHD 本体室への入室が制限されることから、計測器をすべて遠隔から自動制御および保守・監視できる環境を実現する必要がある。

現在、これらデータ収集および計測器制御で使用する LHD 実験用ネットワーク網は、通常の一般通信用のものが用いられている。重水素実験下の、より高い放射線環境化においても、上述のような超高速データ伝送が十分確保されるためには、これを通信エラー障害や性能劣化などが少ない耐放射線性の高い高速実験ネットワークに換えて敷設する。

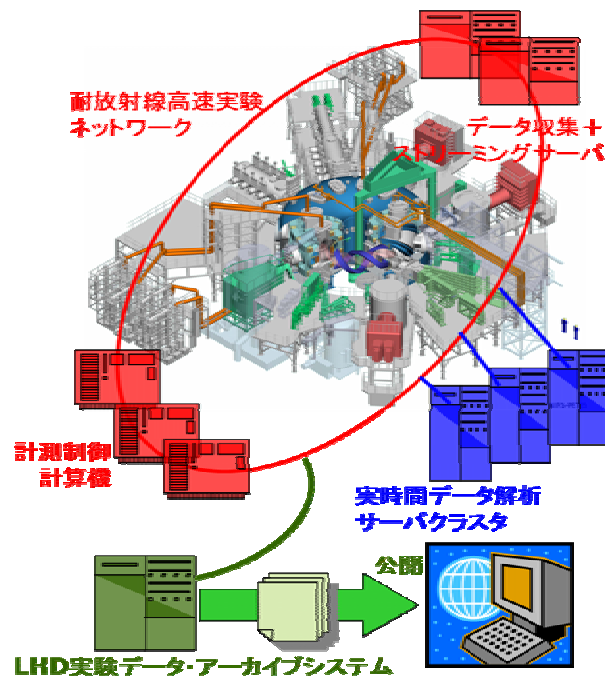


図 3.6.5-15 システム整備の概要

これら必要システム群について、以下のとおり、順を追って説明する。

1. データ収集+ストリーミングサーバ
2. 実時間データ解析サーバクラスタ
3. 計測制御計算機システム
4. 耐放射線高速実験ネットワーク
5. LHD 実験データ・アーカイブシステム
6. 上記の整備計画スケジュールと必要予算（概算）

## 2) データ収集+ストリーミングサーバ・システム概要

本システムは、高速サンプリング速度で多チャンネルのプラズマ物理計測データの生

成，収集，転送，格納，演算処理，表示(可視化)を連続無停止の実時間で実施するデータ集録装置である。本システムは，大別して以下に挙げる各機能を持つものとする。

- 多チャンネルデジタイザによるデータ生成
- コンピュータからのデジタイザおよび同集合体の(遠隔)制御と電氣的絶縁
- 生成データのコンピュータへの実時間転送
- データの実時間格納
- データの実時間可視化・遠隔での表示
- データの実時間解析演算      実時間データ解析サーバクラスタ
- データの高度解析処理による実時間機器制御信号の出力      計測制御計算機

最後の2項目については，「実時間データ解析サーバクラスタ」および「計測制御計算機」の各システムと関連しており，詳細は各節にて述べる。

以下に各機能の要求仕様の詳細を述べるが，基本的に可能な限りオープンスタンダードに準拠した仕様で実現するものとする。

## 2) - 1 デジタイザによるデータ生成仕様

核融合プラズマ実験において，アナログ信号をデジタル化するのに最も一般的に使用されるのが，トランジェントレコーダ型 ADC といわれる時系列波形を配列データ化するデジタイザである。ここでもこの方式の高速 ADC モジュールを主ターゲットとして，以下の通り，デジタイザに対する要求仕様をまとめた。

### 概略仕様

ADC モジュールは，標準 1 MHz のサンプリングレートで，8 チャンネル同時サンプリングが可能な A/D 変換機能を持つ。各チャンネルはそれぞれに独立したプリアンプ，16 ビット ADC，およびワンショット動作のための 4M ワード以上の波形バッファメモリを持ち，プリアンプ増幅率は 0.1～100 倍で，入力レンジは  $\pm 2.5V$ ， $\pm 5V$ ， $\pm 10V$ ， $+2.5V$ ， $+5V$ ， $+10V$  に設定可能とする。サンプリングクロックは 8ch 共通で，ローカルクロック(の分周)か外部クロック入力を選択できる。

動作モードには大別して，ワンショット(バッチ処理)モードと，リアルタイム・ストリーム処理モードとを持ち，前者では従来どおりの短パルス実験と互換の収集動作を行う。後者では 1 筐体内に収納される 100ch 以上のアナログ信号を同時に無停止連続でデータ収集・転送できる能力を持たせる。

### 論理的仕様

- ADC 分解能      16 ビット
- サンプリングレート      標準 1 MHz，最低 0.1 MHz / 最高 10 MHz  
全チャンネル同時サンプリング



- クロック 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHz, ..., 500kHz, 1MHz ,  
および DC ~ 1MHz の任意外部クロックが選択可能  
デューティ 50%
- デジタル入力 外部クロック , スタート/ストップトリガーをもち  
デジタイザチェーンで同期可能  
TTL レベルで動作すること
- アナログ入力レンジ  $\pm 2.5V$  ,  $\pm 5V$  ,  $\pm 10V$  ,  $+2.5V$  ,  $+5V$  ,  $+10V$   
チャンネル毎に設定可能
- 入力インピーダンス 100k 以上
- デジタイザ精度 0.1%以下 (フルスケール比)
- プリアンプ 0.1 ~ 100 でゲイン値が ch 毎に設定可能  
DC ~ 1MHz のアナログ信号帯域で歪率が 0.1%以下  
チャンネル間の入力絶縁のため平衡入力を推奨
- 割込み処理 収集制御コンピュータに割込み出力ができること

#### 物理的仕様

- コネクタ形状 プッシュ・プル式かプッシュロック(バヨネット)式  
ねじ込み式は不可  
アース絶縁のため 2 極 LEMO コネクタを推奨
- チャンネル(コネクタ)数 1 筐体に約 100ch のアナログ信号が収容できること
- モジュール構造 デジタイザはモジュール単位で着脱増減可能なこと

#### 機械的仕様

- 筐体形状 ユーロカード 6U サイズ程度とする  
19inch ラックに収容可能である事

#### 電気的仕様

- アナログ絶縁性 チャンネル間でアナログ部は絶縁されていること
- 耐環境性 高い耐静電(ESD)・電磁ノイズ(EMS)・耐放射線  
性をもち , 強磁場 , X 線を含む強電磁ノイズ , 中性  
子束  
の存在する核融合実験室環境で安定動作すること
- CMRR コモンモード除去比 70dB 以上
- ch 間クロストーク -60dB 以下

2 ) - 2 コンピュータからのデジタイザおよび同集合体の(遠隔)制御と光絶縁  
以下 , デジタイザモジュールの集合体とそれを格納し動作させるシャーシ , バック  
プレーン , コントローラなど全体一式をデジタイザ・フロントエンド(DFE)という。

- ホストから DFE の制御は，関数コマンドをベースとする。デジタイザ制御コマンドを発行してその結果を受け取ったり，あるいは DFE 側から割込み処理要求を受ける API ライブラリとして提供される。
- DFE はホストの周辺機器として DFE1 台ごとにドライバ経由で認識・制御される。
- 各モジュールはホスト(アプリケーション)にスロット順に静的に認識が可能である事。
- DFE-ホスト間の接続メディアおよび I/F には，数 100 Mbps 以上の帯域を持つ通信規格を使用し，DFE-ホストは一對一あるいは多対一で接続が可能である事。  
但し，転送レート上問題がある場合は，一對多接続も検討する。
- 接続メディアは DFE-ホスト間の電氣的絶縁のため，光ファイバによるデジタル通信リンクが可能である事。

## 2) - 3 生成データのコンピュータへの実時間転送

- DFE-ホスト間の通信は，500kHz100ch(1MHz50ch)の全 ADC 出力である約 100MB/s 以上を，有限の遅れ(30ms)内でホストの主メモリー上まで無停止連続転送できること。
- 生データ転送前後での実時間圧縮・展開技法の導入は，詳細仕様の調査協議事項とする。
- 生データの実時間削減あるいはイベント駆動型データ収集法の導入は，将来の改良時の課題とする。

## 2) - 4 データの実時間格納と解析演算

- 約 100MB/s の実時間生データストリームをそのまま格納できる能力があること。
- 解析演算の結果得られたリアルタイム処理済データも実時間で格納できること。
- 複数台の PC で解析演算と格納の並行分散処理が進められる PC クラスタとし，計算機負荷によってその分散度合(台数，構成)を増減・調整できる構成にする。
- 実時間解析演算の開発ターゲットとして最重要なのは，空間的・時間的にデータ量が多い各種の揺動計測である。演算ルーチン・出力情報などについては詳細仕様の策定段階で別途定める。<Appendix A 参照>
- PC クラスタのハードウェア上で動作する OS は，Linux/UNIX あるいは MS Windows とする。

## 2) - 5 データの実時間可視化・音声化と遠隔表示

- 実時間データ可視化・表示機構実現のターゲットとして重要なのは，空間的時

間的にデータ量が多い各種の揺動計測である。グラフ画像やデータ更新など出力情報、クライアント動作の可視化プログラムとデータ収集ホストとの演算処理分担などについては、別途、詳細仕様の策定段階で、計測毎に調査の上、定める。<Appendix A 参照>

- Linux/UNIX 上で Xwindow ベースの表示プログラムを提供し、設定やユーザの簡単なコンフィグ・スクリプト記述により、多様なデータ表示ができるよう可能な限り汎用性を持たせる。
- MS Windows 上の場合、遠隔表示はターミナルサーバ機能の利用が望ましい。
- 処理後、音声波形化されたデータの音声出力もおこなえるようにする。
- リアルタイム表示画面は対話的にユーザが切替えられるようにする。

## 2) - 6 データの高度解析処理による実時間機器制御信号の出力

磁場揺動により磁気島が生成する場合を例にとり考えると、揺動成分の波形位相に同期させて CD 波を入射することで磁気島を抑制するなど、アクチュエータの準備により制御が可能になる。現在のところ LHD 磁場揺動計測では、磁気島（成長）の検出と制御信号の出力が、フィードバック制御出力の一つに考えられている。<Appendix A 参照>

この場合、磁気島注意報・警報システムなどの簡易出力（光 or 音）は、次節「実時間データ解析サーバクラスタ」のみで実現が可能であるが、アクチュエータ出力制御や計測器の運転を制御する場合には、「計測制御計算機」との連動が必須となる。

## 3) 実時間データ解析サーバクラスタ

大容量データを高密度に収集する重水素実験や定常実験では、実験遂行中にできる限り詳細なデータ解析を同時進行でおこない、同じ実験の運転維持や次の実験を策定するためのより高度な解析結果を得ることが、実験の質を決めるといっても過言ではない。LHD の定常・高速データ収集系により実時間で集録された計測データをこうした解析にかけるためには、当然、実時間で大規模解析計算が可能な高性能計算機が必要である。

高速かつ大規模なデータ解析を実行する環境としては、メインフレームと呼ばれるベクトル・プロセッサ型スーパーコンピュータがあるが、計算ジョブを投入するバッチ処理方式での利用が一般的であり、実時間処理の面では必ずしも有効な手段とはならない。計測データが多数サーバ PC から並行して同時生成されることを考慮すると、データ伝送のボトルネックを回避する意味からも、1 コンピュータにデータを集中させて解析処理を行う構成では、実効的な処理速度が上がらない恐れがある。そのため、実時間データ解析は、収集系と同じ PC サーバクラスタをとって、並列計算により高速処理を実現する構成が望ましい。図 3.6.5-16 にその概要を示す。

同サーバクラスタの規模としては、データ伝送のボトルネック回避には、最低、データ生成ノード数と同数以上の計算ノードによる構成が望ましいため、100 計測の場合、最低 100 ノード（200CPU コア）が基本構成として必要である。より高度なプラ

ズマ挙動を理解，あるいはプラズマのフィードバック制御をするため，プラズマ平衡解析，各種安定性解析，密度・温度プロファイル計算，粒子・熱輸送解析などを並行しておこなうには，更にその数倍のノード数が必要となる。

プラズマ計測データの詳細解析コードは，そのほとんどがメインフレームなどを用いるバッチ計算用として作られてきている。実時間データ解析のためには，それらをすべてリアルタイム処理コードとして改造し，PC クラスタ上の並列計算環境に最適化する作業も必須である。

#### 4) 計測制御計算機

計測制御計算機の役割としては，前節の「実時間データ解析サーバクラスタ」で得られた解析情報を，加熱・プラズマ保持・計測機器など各種アクチュエータのフィードバック制御に用いるための制御ロジックを運用するほか，機器の対話的遠隔制御と常時状態モニター，実時間制御・制御インターロックも含まれる。特に，最後の項目では，より高い安定性が求められるため，コンピュータ上のソフトウェアによる柔軟かつ複雑なプログラム制御よりも，PLC (Programmable Logic Comtroller) によるソリッドステート・リレー制御盤（シーケンサ）を用いる。そのため，利用機器としては大別して，

1. 遠隔制御用コンピュータ
2. 機器制御ロジック・コントローラ (PLC)

の2種類の制御機器を併用し，1はプログラム修正により柔軟な制御ロジックの変更に対応，2はより安全に機器等の保護シーケンス動作を保証するものである。1. 2.の装置自身も耐放射線性，中性子束環境下での安定動作が求められると同時に，保守機会をできるだけ提言するメンテナンス・フリーのハードウェアを，全100計測の約半数にあたる50セット導入する。

重水素実験に伴い，計測器やその周辺装置の多くは遠隔自動運転を余儀なくされ，しかも，保守機会も大幅に制限されることになる。殊に障害発生時など，各装置の状況を正確かつ迅速に把握するには，通常の制御・状態信号線の他に，より精緻かつ多面的な遠隔状態監視機能が必要となる。入室が制限され困難になる現場視認には，1計測器につき10個以上の機器監視カメラを設置し，多角的な状態監視ができる状況を整える。

#### 5) 耐放射線高速実験ネットワーク

実験ネットワークは用途別に，以下の4つに分類される。

1. データ収集用高速ネットワーク
2. 計測制御コンピュータ用ネットワーク
3. 制御信号 (PLC) 用ネットワーク
4. 保安 (保護インターロック) 用ネットワーク

これら全ての線材を更新する必要はないが，より高速伝送が求められる上位2項目と，現状で安価なプラスチックファイバーが使用されている3.については，耐放射線性

の良い高性能光ファイバに置換する必要がある。

既設の通信用光ファイバに関しては，Appendix C．にあるとおり，LHD 本体室 CAMAC 室（中継）320 芯，CAMAC 室 計測機器室(1)(2)(3) 360 芯，CAMAC 室 データ処理計算機室 240 芯と，既に約千本弱が実験に供されている。また，シールドされたケーブルダクトを通して，約二千本の計測信号用同軸ケーブルが LHD 本体室 CAMAC 室間に設置されている。しかし，完全遠隔化が必要な重水素実験においては，更にこの 2～3 倍の芯数が必要となる。

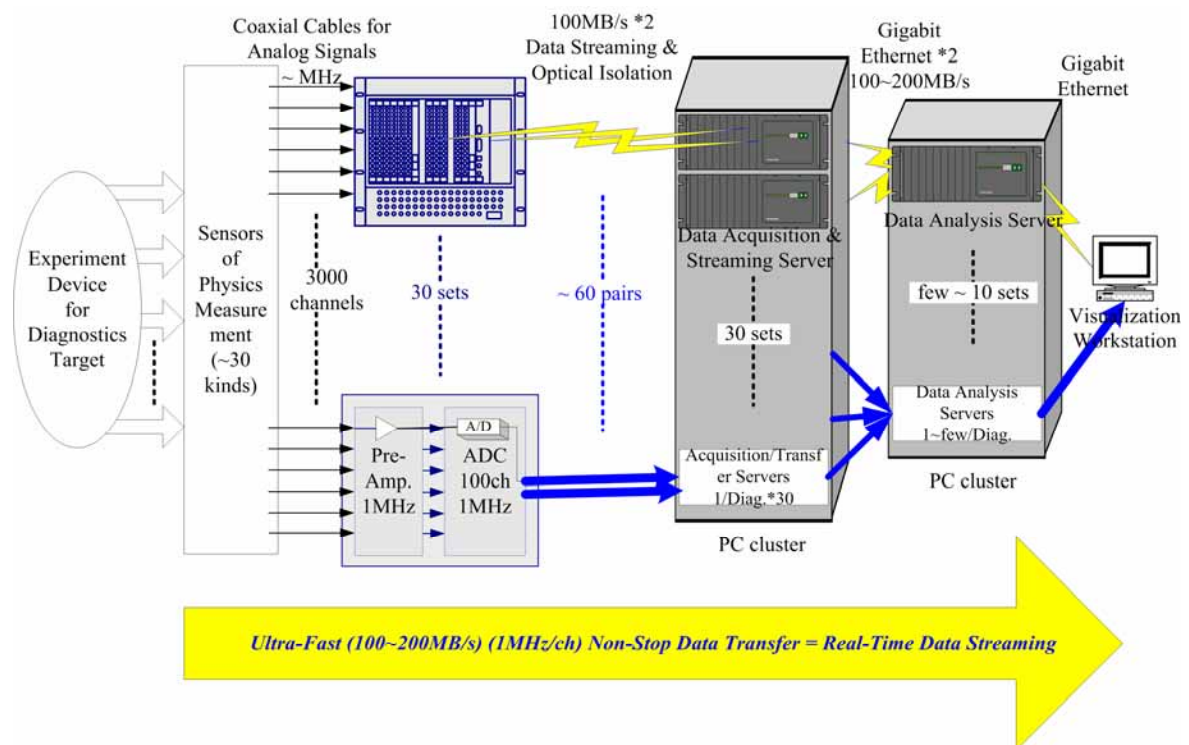


図 3.6.5-16 データ収集 + ストリーミングサーバと実時間データ解析サーバクラスタとの関連の様子

## 6) LHD 実験データ・アーカイブシステム

LHD 計測データ・システムでは，稼動当初より「データ爆発」を予期しており，高圧縮率が得られる可逆（ロスレス）な各種圧縮法を比較調査し，その結果を元に選定したアルゴリズムをシステムに組み込み利用してきた。そのため，実験開始当初より，常時，収集生データの 1/3～1/4 に縮められたデータ保管・ネットワーク伝送サイズを実現しており，見た目上のデータ取出し速度の向上にも大きく寄与してきた。（図 3.6.5-17）

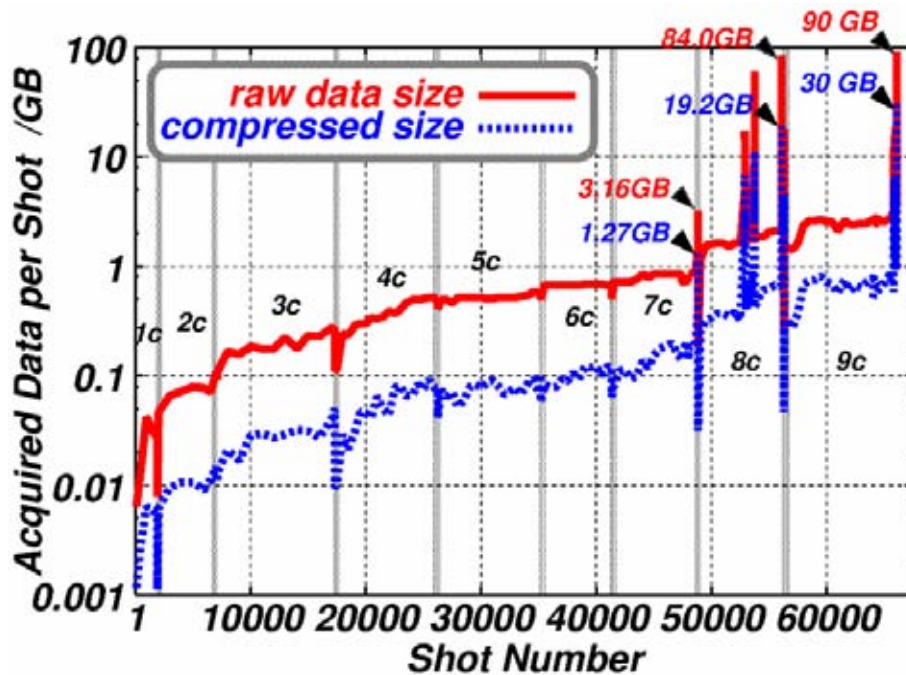


図3.6.5-17 LHDにおける1回の実験あたりに収集された計測データ量の推移。横軸は実験回数を示し、1c ~ 9cは実験期間(サイクル)をさす。黒三角( )は平成 15,16,17 年度の世界記録更新値。

しかし、こうした保管サイズ低減の努力にも関わらず、実験データ爆発の勢いは強く、1 実験あたりの収集データ量はこの 10 年間で約 2 桁の伸びを見せた。LHD データ・システムは大規模分散形態をとっており(図 3.6.5-18)、災害・障害発生時のデータ防護に優れた多重化がなされているが、データの複製が二箇所(以上)に存在するため、保管装置の容量はその分必要になる。平成 18 年度現在、総容量は既にサブペタバイト(0.1 PB)レベルを超えており、重水素実験開始時には、1 PB 程度に到達する見込みであり、公開用データアーカイブには 10 PB クラスの容量が求められる。

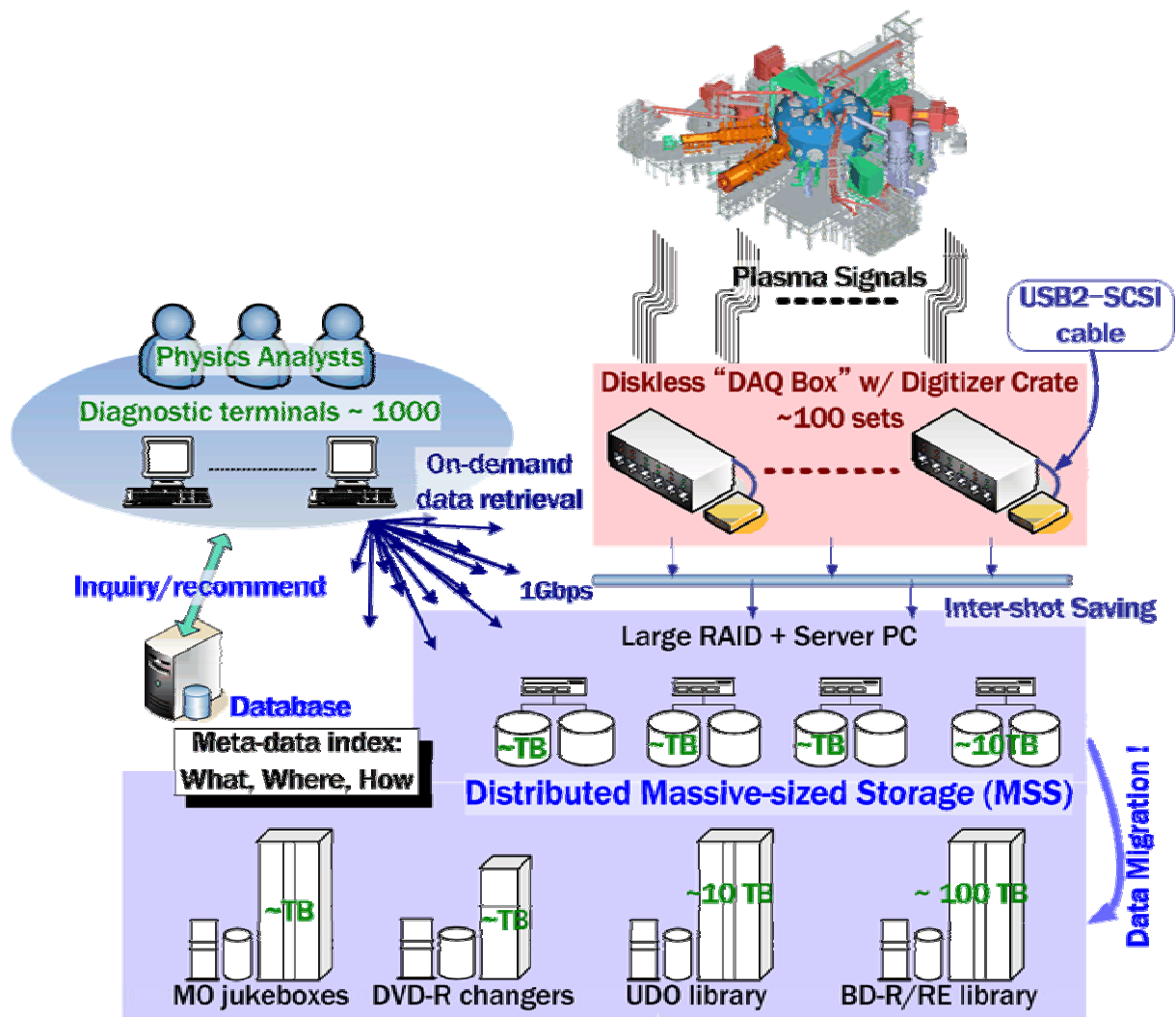


図 3.6.5-18 LHD データ収集系（右上部）と大規模分散データ保存システム（下部）の関連の様子。

こうした大容量のマルチメディア・データの中から，必要とする計測データをユーザがスムーズに取り出すには，実験データの附帯情報ばかりでなく，データそのものの類似性によって，実験波形や画像データを直接取り出す，波形・画像データ高速検索用データベース・システムの構築が不可欠であり，大容量メディア・アーカイブとの連携運用をおこなう。

データの大容量化が急速に進んでいる昨今，肥大化した計測データをすべて遠隔ネットワーク伝送して解析を行うのは，いかに通信速度が向上しても効率的解析環境とは言いがたい。そのため，遠隔からアーカイブシステムに直結された解析サーバ・コンピュータにリモートログインして，データは遠距離伝送をせず，代わりに操作・可視化データを遠方に飛ばす遠隔解析環境を整備する。



## Appendix A . 【詳細仕様例】リアルタイム磁場揺動計測の解析演算と可視化仕様

現在，磁場平衡計測システムで処理されている Wp, Ip, Mp, サドルループ信号など約 20ch ( 入力 10ch ) に関しては，本システムでほぼ同等以上の機能をリアルタイム化実装する。諸値は時間変化の一次元データなので，リアルタイムで横スクロールする x-t プロットを信号の数だけ実装する。

磁場揺動計測用の約 200 チャンネルのピックアップコイルアレイ信号については，新規に本システムによる実時間処理を実現する。仕様は以下の通り。

- Power Spectrum Density(PSD)の時間変化をカラー-contour プロット： 100kHz サンプリングの時系列データ 2048 サンプルで各チャンネル FFT をかけ周波数成分に変換。横軸：時間，縦軸：周波数のグラフで，周波数成分が強いところは赤く，弱いところは青くカラー表示し，どの周波数の揺動波が立っているか，またその時間変化を横スクロールで一目で判るように表示する。
- Coherence contour plot： PSD contour plot が周波数成分だったのに対し，空間のプラズマモード数(m,n)の各成分強度を全 196 チャンネル間の相互相関解析によって算出，縦軸：(m,n)，横軸：時間で同じく強度の強いところを赤，弱いところを青くするなどモード数成分の時間変化を表示する。
- モード数毎の成分強度変化： 縦軸：モード成分の強度，横軸：時間で (m,n)=(1,1),(2,1),(2,2),...のそれぞれの成分強度変化グラフを縦に幾つか並べて x-t プロット&横スクロール
- 磁気面表示： 縦長断面位置，横長断面位置での内部磁場構造を contour プロット。磁気島が生成しているなどがリアルタイムで見られると面白い。内部構造の演算モデルを埋め込む。

以上の表示画面が同時に複数表示できることが望ましい。一部は切替えで可。

Appendix B . LHD の計測データ収集サーバの現状 (平成 18 年度)

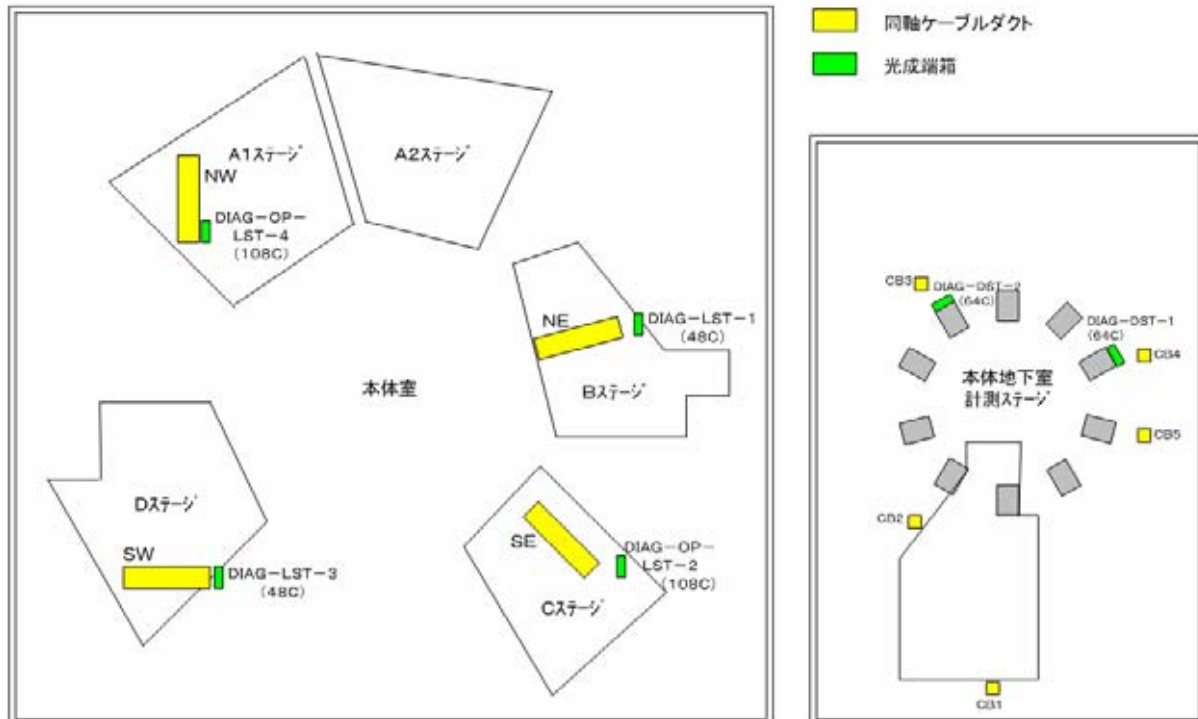
| 第10サイクル実験 収集サーバ割当表 |                |         |              |                 |        |        |               | [2006.10.5 改訂]           |
|--------------------|----------------|---------|--------------|-----------------|--------|--------|---------------|--------------------------|
| サーバ名               | 計測名            | 担当者     | 収集場所(ラック#)   | 使用モジュール         | チャンネル数 | OS     | 備考            | PC機種                     |
| DAS01              | SXfluc         | 大館      | CAMAC室(#11)  | SEG             | 81     | XP Pro |               | Dell Precision410 移行     |
| DAS02              | Reflectometry  | 田中      | CAMAC室(#18)  | Aurora14        | 6      |        |               |                          |
| DAS03              | PHA            | 武藤      | 計測機器室3(#24)  | PHA             | 6      |        |               |                          |
| DAS04              | ICHVOLT        | 関       | RF現場制御室(#25) | Aurora14        | 78     |        | 独自光経路, CC/NET |                          |
| DAS05              | SIFNA          | 斉藤      | CAMAC室(#09)  | PHA             | 6      | XP Pro | 10C増設         |                          |
| DAS06              | NBEL           | 長壁・駒田   | 制御棟 制御機器室    | Aurora14        |        | XP Pro | nbcurent生成    | Dell Precision410        |
| DAS07              | CNPA           | 尾崎      | 本体棟Bステージ下    | CTS308,A14      |        | XP Pro | CC/NET        | Dell Precision410        |
| DAS08              | Halphi         | 後藤(森田)  | 計測機器室3(#27)  | Aurora14        | 126    | XP Pro | 独自光経路         | Gateway6400 移行           |
| DAS09              | Brems          | 後藤(森田)  | 計測機器室3(#28)  | Aurora14        | 120    | XP Pro | 独自光経路         | Gateway6400 移行           |
| DAS10              | PHARD          | 武藤      | 計測機器室3(#24)  | PHA             | 16     |        |               |                          |
| DAS11              | HIBP           | 井戸      | 本体地下室        | Aurora14        | 36     | XP Pro | HIBPcpへ移行予定   |                          |
| DAS12              | Bolometer      | ピーターソン  | CAMAC室(#14)  | Aurora14        | 60     |        |               |                          |
| DAS13              | FIG            | 坂本      | 計測機器室2(#23)  | Aurora14        | 6      |        |               |                          |
| DAS14              | MWRM           | 徳沢      | 計測機器室2       | Aurora14        | 24     | XP Pro | CC/NET        | Dell Precision410        |
| DAS15              | SXmp           | 大館      | CAMAC室(#13)  | SEG             | 81     |        |               |                          |
| DAS16              | Fastion        | 磯部      | 計測機器室3(-)    | PHA             | 12     |        |               |                          |
| DAS17              | ECH            | 久保      | 加熱装置室(#26)   | Aurora14        | 30     |        | 独自光経路         |                          |
| DAS18              | ImpMon         | 後藤(森田)  | CAMAC室(#05)  | Aurora14        | 30     |        |               |                          |
| DAS19              | Magnetics      | 榊原      | CAMAC室(#06)  | Aurora14        | 78     |        |               |                          |
| DAS20              | Langmuir       | 増崎      | CAMAC室(#02)  | Aurora14        | 96     |        |               |                          |
| DAS21              | Langmuir2      | 増崎      | CAMAC室(#01)  | Aurora14        | 30     |        |               | Dell Precision410        |
| DAS22              | TESPEL         | 田村(須藤)  | 計測機器室3       | Aurora14        | 30     |        |               |                          |
| DAS23              | AXUVD          | 田村      | CAMAC室(#07)  | Aurora14        | 78     |        |               |                          |
| DAS24              | MMWINT         | 田中      | 計測機器室2       | Aurora14        | 6      |        |               |                          |
| DAS25              | SX8O           | 大館      | CAMAC室(#08)  | SEG             | 67     |        |               |                          |
| DAS26              | RADL           | 稲垣(長山)  | 計測機器室2       | Aurora14        | 72     |        |               |                          |
| DAS27              | GPCRADH        | 稲垣(長山)  | 計測機器室2       | Aurora14        | 96     |        |               |                          |
| DAS28              | MO_server1     | LABCOM  | データ処理計算機室    |                 |        |        | (DAS欠番)       |                          |
| DAS29              | MO_server2     | LABCOM  | データ処理計算機室    |                 |        |        | (DAS欠番)       |                          |
| DAS30              | MO_server3     | LABCOM  | データ処理計算機室    |                 |        |        | (DAS欠番)       |                          |
| DAS31              | DTS            | LABCOM  | データ処理計算機室    |                 | 176    |        | VME-DTS情報収集   |                          |
| DAS32              | MMimg          | 田中      | CAMAC室(#12)  | Aurora14        | 114    |        |               | Dell Precision410        |
| DAS33              | FIR1           | 徳沢      | 計測機器室1       | C-PS 412        | 13     |        | FIR-ana連携     |                          |
| DAS34              | FIR2           | 徳沢      | 計測機器室1       | Aurora14        | 42     | XP Pro | FIR-ana連携     | Gateway6400 移行           |
| DAS35              | Lostlon        | 磯部      | CAMAC室(#09)  | Aurora14        | 12     | XP Pro |               |                          |
| DAS36              | Magnetics2     | 榊原      | CAMAC室(#06)  | Aurora14        | 36     |        |               |                          |
| DAS37              | Fixloop        | 成嶋      | CAMAC室(#20)  | WE7272          | 12     | XP Pro |               | SS-5014C-MT移行            |
| DAS38              | FIR-WE7000     | 徳沢      | 計測機器室1       | WE7272          | 16     | XP Pro |               | SS-5014C-MT移行            |
| DAS39              | LiBP           | 森崎      | 本体室Cステージ下    | WE7272,7275     | 56     | XP Pro |               | SS-5014C-MT移行            |
| DAS40              | RADH           | 稲垣      | 計測機器室2       | WE7272          | 32     | XP Pro |               | SS-5014C-MT移行            |
| DAS41              | NB3arm         | 長壁      | 本体室(制御室経由)   | WE7251          | 50     | XP Pro | 独自光経路         | SS-5014C-MT移行            |
| DAS42              | FPellet        | 坂本      | 本体室Aステージ上    | WE7275          | 13     | XP Pro | 10C増設         | SS-5014C-MT移行            |
| DAS43              | Demodulator    | LABCOM  | CAMAC室(#20)  | DT8862          | 24     |        | CAMAC-DTS     |                          |
| DAS44              | IRcamera-edge  | 長壁      | CAMAC室(#10)  | PXI-1409        | 2      |        | MXI-3         | SS-4U/MB交換, MXI-3        |
| DAS45              | NB1arm         | 長壁      | 本体棟 加熱装置室    | WE7251          | 50     |        | 独自光経路         | SS-5013C-T               |
| DAS46              | NB2arm         | 長壁      | 本体棟 加熱装置室    | WE7251          | 50     |        | 独自光経路         | SS-5013C-T               |
| DAS47              | GASPUFF        | 舟場      | CAMAC室(#07)  | WE7251          | 20     | XP Pro |               | SS-5014C-MT移行            |
| DAS48              | LIP-ICCD       | 西浦      | CAMAC室(#09)  | PXI-1409        | 2      |        | MXI-4         | SS-5013C-MT, 4GB         |
| DAS49              | PCO2           | 田中      | CAMAC室(#12)  | PXI-6115        | 20     |        | MXI-3         | SS-4U/MB交換               |
| DAS50              | P2CO2          | 田中      | CAMAC室(#12)  | PXI-6115.6133   | 20     |        | 10C増設, MXI-3  | SS-4U/MB交換               |
| DAS51              | DivIR          | 小川(増崎)  | CAMAC室(#01)  | PXI-1409        | 2      |        | MXI-4         | SS-5013C-MT, 2GB         |
| DAS52              | MWRM-PXI       | 徳沢      | 計測機器室2       | PXI-6115.6133   | 20     |        | MXI-4         | SS-5013C-MT, 2GB         |
| DAS53              | SXCAMERA2      | 大館      | データ処理計算機室    |                 |        |        | (DAS欠番)       |                          |
| DAS54              | FIR-PXI        | 徳沢      | 計測機器室2       | PXI-6133        | 16     | XP Pro | MXI-4         | Trus P4-1U/7221          |
| DAS55              | CCDedge1       | 芦川      | CAMAC室(#15)  | PXI-1411        | 1      |        | MXI-4         | SS-5013C-MT              |
| DAS56              | HIBPcp         | 井戸      | RF現場制御室      | PXI-6133        | 48     | XP Pro | MXI-4         | Trus P4-1U/7221          |
| DAS57              | ICHPXI         | 関       | CAMAC室(#12)  | PXI-6133        | 24     | XP Pro | 10C増設, MXI-4  | Trus P4-1U/7221          |
| DAS58              | MIR            | 山口聡(長山) | 本体室          | PXI-6133        | 16     | XP Pro | MXI-4         | Trus P4-1U/7221          |
| DAS59              | RePellet       | 坂本      | CAMAC室(#05)  | PXI-6115.6133   | 24     | XP Pro | 10C増設, MXI-4  | Trus P4-1U/7221          |
| DAS60              | Magnetics3lab1 | 榊原      | 本体通信機器室      | WE7272          | 64     | XP Pro | Ethernet接続    | Trus P4-1U/7221          |
| DAS61              | Magnetics3lab2 | 榊原      | 本体通信機器室      | WE7272          | 28     | XP Pro | Ethernet接続    | Trus P4-1U/7221          |
| DAS62              | NB4arm         | 長壁・佐藤   | 本体室          | WE7251          | 50     | XP Pro | 独自光経路         | SS-5014C-MT              |
| DAS63              | Langmuir3      | 増崎      | 本体室          | WE7275,7273     | 28     | XP Pro | (再)           | SS-5013C-T               |
| DAS64              | SDNPA          | 尾崎      | 計測機器室3       | Toyo629, CTS504 | 7      |        | 10C新規, CC/NET | FMV 6333T7               |
| DAS65              | PelletAblation | 坂本      | CAMAC室(#05)  | PXI-6133        | 56     | XP Pro | 10C新規         | NEC Express5800/110GR-1c |
| DAS66              | AXUVD-PXI      | 田村      | CAMAC室(#7)   | PXI-6133(2M)    | 40     | XP Pro | 10C新規         | NEC Express5800/110GR-1c |
| DAS67              | TESPEL-CCD     | 田村      | 計測機器室3       | PXI-1411        | 1      | XP Pro | 10C新規         | NEC Express5800/110GR-1c |
| DAS68              | mwscat         | 稲垣      | 加熱装置室        | PXI-6115        | 4      | XP Pro | 10C新規         | NEC Express5800/110GR-1c |
| DAS69              | LIP-PMT        | 西浦(井戸)  | CAMAC室(#09)  | PXI-6133        | 8      | XP Pro | 10C新規         | NEC Express5800/110GR-1c |

OS未記入は Windows 2000 Server SP4, PC機種未記入は HP Vectra XU 6/200

Appendix C . 実験ネットワーク網の現状 (平成 18 年度)

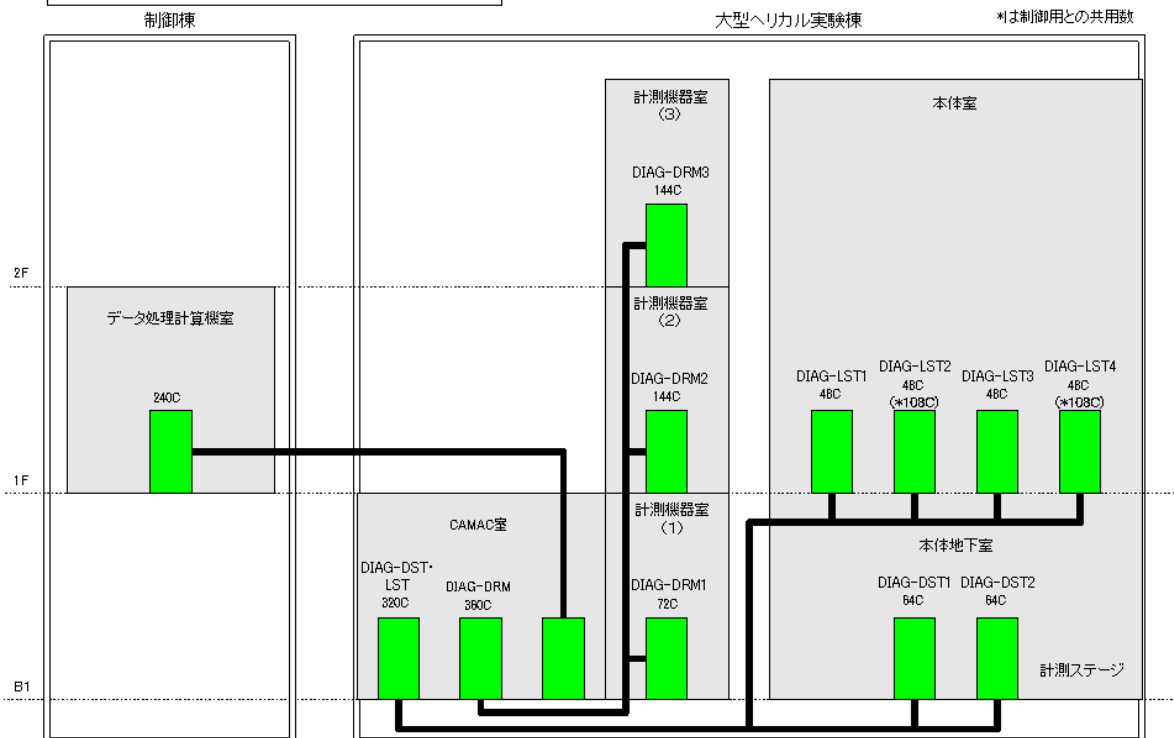
同軸ケーブルダクト・光成端箱配置図

2000/6/27作成



光ファイバーケーブル配置図

2000.5.8作成



### 3.6.6 放射線計測

#### 3.6.6.1 安全対策用測定機器の整備

##### (1) 放射線安全管理機器概要

放射線安全管理に係る放射線（能）測定の一般的な項目を、放射線施設内部と外部、監視（記録）特記の4つに分けて表3.6.6-1に示す。

表3.6.6-1 放射線安全管理に係る測定項目。

| 区分     | 測定項目  |
|--------|---|
| 施設内測定  | 個人被曝線量測定<br>個人汚染測定<br>物品および建屋表面汚染測定<br>空間線量測定<br>空気中および排気中放射能（ダストを含む）濃度測定 |
| 施設外測定  | 排水中放射能濃度測定<br>周辺環境放射能および線量測定  |
| 監視（記録） | 測定データの記録と測定監視   |
| 特記     | 真空容器開放時安全確認測定<br>放射性廃棄物（所内）運搬時測定  |

表3.6.6-1に示した測定のはほとんどは、市販の放射線安全管理汎用機器を用いて実施することが出来る。

##### (2) 放射線一般管理用機器

現在、一般の放射線安全管理に使用されている汎用機器の中から、核融合科学研究所の放射線安全管理に必要な機器を、測定対象別に、以下にまとめる。

###### 一般放射線（能）測定

- ・GMサーベイメーター
- ・電離箱サーベイメーター
- ・シンチレーションサーベイメーター
- ・低エネルギーシンチレーションサーベイメーター
- ・スペクトルサーベイメーター
- ・中性子サーベイメーター（レムカウンター）

###### 個人測定

- ・ルクセルバッジ（測定サービス専門機関に外注依頼）
- ・ハンドフットクロスモニター
- ・体表面モニター
- ・電子式ポケット線量計（ $\alpha$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線）

#### 空気およびダスト測定

- ・ダストサンプラー（移動型）
- ・ダストモニター（移動型、固定型）
- ・静電容量電位計および基準電離箱

#### 試料（スミヤ、排水等）採取測定

- ・液体シンチレーション測定装置
- ・（窓なし）ガスフローカウンター
- ・低バックグラウンド（窓なし）ガスフローカウンター
- ・低バックグラウンド半導体線スペクトロメーター
- ・低バックグラウンド半導体 X 線スペクトロメーター
- ・イメージングプレート

#### その他

- ・物品搬出モニター  
（物品搬出モニターは、管理区域から物品を搬出する際に汚染検査のため使用する装置である。）

### （3）トリチウム測定用機器

放射線安全管理におけるトリチウム測定の対象は、固体表面汚染、空気・排気中濃度、液体中濃度の3者に分けることができる。いずれの測定においても、通常の線測定装置では低エネルギー線に対する感度が足りないために、以下に示すようなトリチウム専用の測定装置を使用する。

#### 固体表面トリチウム汚染密度

- ・トリチウムサーベイメーター
- ・トリチウムフロアモニター
- ・窓なしガスフローカウンター
- ・液体シンチレーション測定装置（スミヤ液シン測定法）

#### 空気・排気中トリチウム濃度

- ・トリチウムガスモニター（半固定もしくは固定式高感度）
- ・トリチウムガスモニター（移動型普及版）
- ・気体中トリチウム捕集（濃縮）装置

#### 液体中トリチウム濃度

- ・液体シンチレーション測定装置（液体試料採取液シン測定法）
- ・トリチウム液体試料前処理（分離、濃縮等）装置
- ・T、C 自動測定装置（ $^3\text{T}$ 、 $^{14}\text{C}$  遠隔測定、排水設備で使用）

### （4）（X）線モニター（R M S A F E）

核融合科学研究所における大型ヘリカル装置(LHD)の高温プラズマ実験ではX、  
、中性子線等の放射線の発生を伴うことが予測される。本研究所は実験により発生する放射線の敷地境界における線量が年間  $50 \mu\text{Sv}$  を越えないことを管理目標としている。われわれはこの目標を数値で示すことを可能にするために核融合実験装置に適

応した放射線モニタリングシステム RMSAFE(Radiation Monitoring System Applicable to Fusion Experiment)を開発し、1992 年以来整備を進めてきた。このシステムでは、微弱なバーストX線を検知することができる。

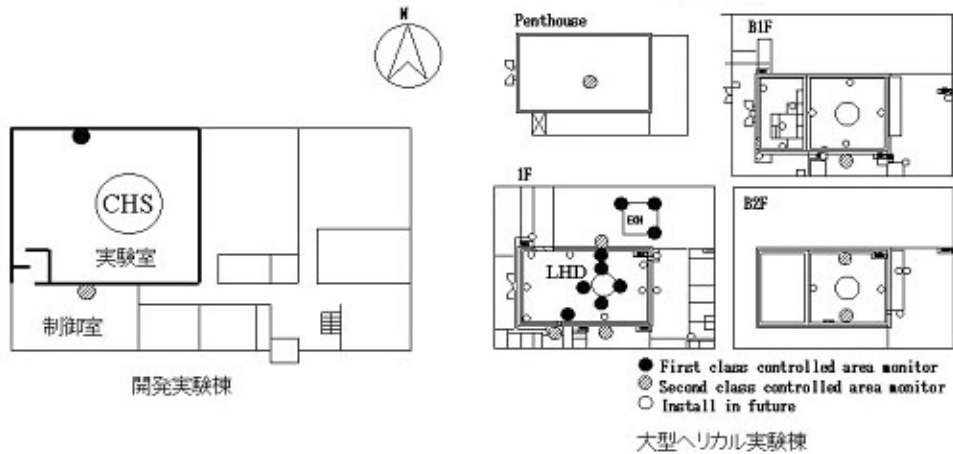


図 3.6.6-1 室内モニター配置図

図 3.6.6-1 と図 3.6.6-2 に室内と屋外の放射線モニターの配置を示す。屋外モニタリングポストは 1992 年に 7 台設置されたのを初めとして、1996 年に 5 台 (WF、WM、IC、IE、IF)、1998 年と 1999 年に各 1 台 (WH、WN) が増設された。

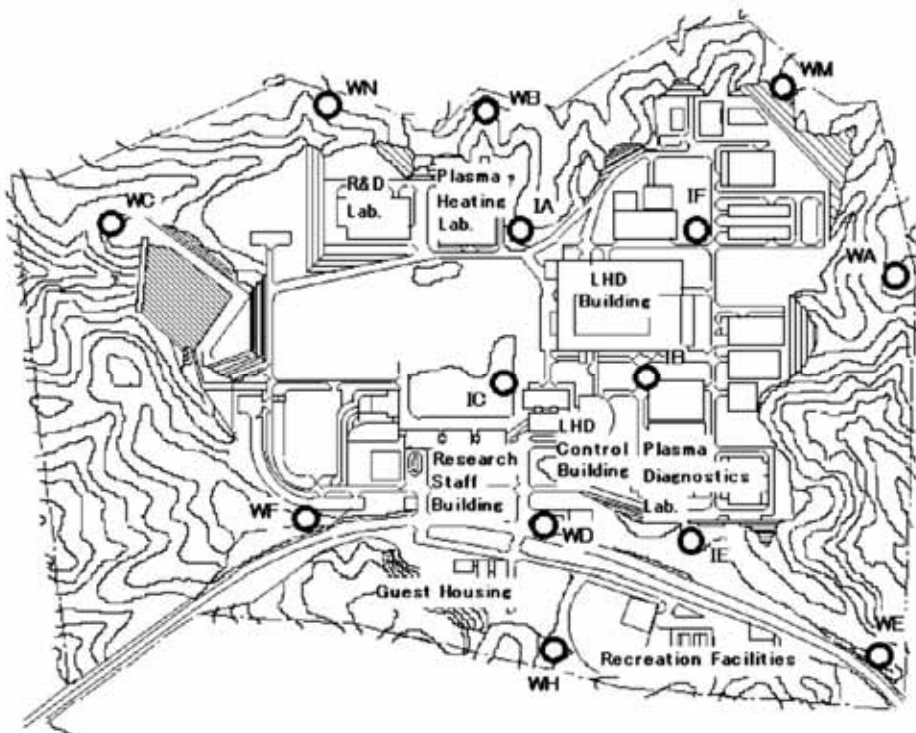


図 3.6.6-2 モニタリングポスト配置。

## ( 5 ) 中性子測定

### ( 5 - 1 ) 中性子束測定

DD 反応の量を評価することは、安全管理の立場から最重要課題である。放射線発生装置としての使用量には、DD 反応で発生した中性子量が用いられる。また、生成するトリチウムの量も、この測定値から算出される。重水素実験を開始する上で最重要不可欠の測定である。従って、中性子束測定器を、本体室に1箇所以上設置しなければならない。発生中性子量の測定結果に基づいて、実験量を制御する。値の信頼性を高くするために、放射化箔やプラスチック飛跡検出器を用いた測定も行う計画である。

DD 反応による中性子測定には通常用いられている核分裂計数管（フィッションチェンバー）を計画している。また、測定の信頼性を得るために、Cf-252 線源による校正を行う。線源の使用にあたっては、密封放射性同位元素の使用施設になる必要がある。

### ( 5 - 2 ) 作業環境における中性子線量評価

本体室、本体地下室に隣接したエリアで、重水素プラズマ放電中に作業する場所では、中性子線量を測定する。具体的には、コイル電源室、加熱装置室、計測機器室( 1 ) に線量測定器（レムカウンター）を設置する。より高感度のもの、エネルギー群別測定ができるものが開発されたならば、併設する。

### ( 5 - 3 ) 敷地境界における中性子線量評価

現在、中性子カウンタを設置しているのは、WA、WF、WM、WN、IA、IB、IC、IE、IF である。公道にもっとも近いWD にも設置する。

線量評価をより正確に行うために、ポリエチレンモデレータの厚い（例えば 10cm 厚）中性子カウンタを増設し（設置場所は、WA、WF、WM、WN、WD の敷地境界5 点を第1 候補とする）、2 本の中性子カウンタの計数を線量に変換する。

中性子線量計の標準的モデルであるレムカウンターも1～2 箇所併設し、値の信頼性を確認する。

上記のモニターからの計数を、放射線監視システム RMSAFE のもと常時測定する。

積算線量計をモニタリングポストの隣に設置して、値を比較できるようにして、信頼性を上げる。測定器としては、専用のリチウム電池によって3ヶ月間の連続測定が可能である中性子測定用の電子線量計を用いる。事前に、簡易百葉箱等に入れた状態で正確に線量を測定するための設置方法、校正方法を、検討しておく必要がある。

以上のような測定器について、実験開始の1年以上前に設置を完了して、1年間は、バックグラウンド測定期間とする。

## ( 6 ) 空気中および排気中放射能濃度モニター



空気中および排気中放射能濃度のリアルタイムモニターを、

- 1) スタック（建屋から放出される排気ガス中の放射能濃度監視）
- 2) LHD本体室内（本体室内での作業環境中の放射能濃度監視）
- 3) LHD真空容器内（真空容器内での作業中の放射能濃度監視）

の3箇所に設置して、空気中および排気中の放射能濃度を監視する。

監視対象として

- 1) トリチウム濃度
- 2) 放射性Ar（Ar-41）濃度

が不可欠であるが、トリチウム含有物及び放射化物がダスト状で存在する可能性も想定されることからダスト状放射能（ $\alpha$ 、 $\beta$ 核種）濃度のモニターも用意、適宜測定する。

設置機器リスト

- ・据え置き型ダストモニター
- ・据え置き型ガスモニター
- ・高感度トリチウムガスモニター
- ・フィルターバンク（プレ、ヘパ）

法定のトリチウム濃度管理（総量管理）には、液体シンチレーションを適用し、3ヶ月平均濃度での管理、および排出総量の管理を行う。そのため、スタック出口に排気トリチウム捕集装置、本体室内に室内トリチウム捕集装置を設置する。また、トリチウム排出の総量を精度よく測定するために、トリチウム除去装置の出口にもトリチウムモニターを設置する。

トリチウムに関しては化学形態によって法令の管理濃度が異なることから、化学形態別の濃度管理ができることが望ましい。そのため、市販のトリチウムオンラインモニター（電離箱、比例計数管）よりも1桁程度高感度のモニターを開発導入している。これにより、法令の管理値以下を連続的に監視することが可能になる。これらの開発が終了次第、既存設備に併設する予定である。

上記を考慮した排気モニターの設置案を図3.6.6-3に示す。

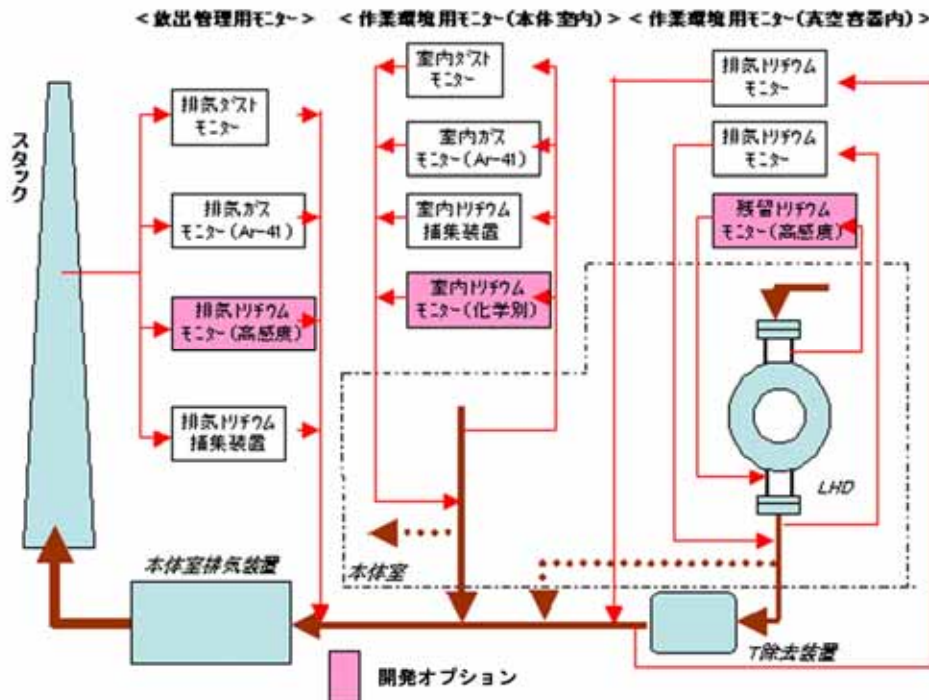


図 3.6.6-3 排気モニターの設置案

< 参考 (市販のトリチウムモニター) >

1) 通常感度モニター [例: アロカ製ルームガスモニター]

- ・ 検出器: 3 L 通気式円筒型電離箱
- ・ サンプリング流量: 5 L/min
- ・ 測定範囲:  $0.1 \sim 10^3 \text{ Bq/cc}$
- ・ 応答時間: 2 ~ 3分

2) 高感度モニター [例: アロカ製ベータ線ガスモニター]

- ・ 検出器: 14 L 通気式円筒型電離箱
- ・ サンプリング流量: 5 L/min
- ・ 検出限界:  $1.3 \times 10^{-3} \text{ Bq/cc}$
- ・ 応答時間: 60分

3) 高感度モニター「例: セイコーEG&G製モニター」

- ・ 検出器: 1.3 L 比例計数管
- ・ サンプリング流量: 1 L/min
- ・ 検出限界:  $1 \times 10^{-3} \text{ Bq/cc}$  (計測時間: 10分)
- $3 \times 10^{-3} \text{ Bq/cc}$  (計測時間: 1分)

< 参考 (開発中の高感度モニター) >

- ・ 検出器: 1.3 L 比例計数管 (セイコーEG&G製モニター相当)
- ・ サンプリング流量: 1 L/min

- ・検出限界： $1 \times 10^{-4}$  Bq/cc 以下（計測時間：約10分）
- ・高感度化方式：  
計測ガス中のトリチウム濃縮処理+計測信号のS/N比向上処理

#### （7）排水中放射能濃度モニター

排水中にはトリチウムをはじめその他のベータ、ガンマ核種が含まれる。このうちトリチウムとカーボン14の純ベータ核種は、液体シンチレーション測定装置で、自動サンプリング測定もしくは手動サンプリング測定を行い、またガンマ核種については半導体検出器を用いて手動サンプリング測定を行って放射能濃度を求める。なお手動サンプリング測定の場合には、採取した試料水の状況に応じて、サンプルの濾過や濃縮等の前処理を行うこともある。これらの測定に用いられる装置を表3.6.6-2にまとめる。

表3.6.6-2 排水に含まれる放射能の濃度測定に用いられる測定装置。

|  |
|--|
| <p><b>トリチウム測定</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ T、C 自動測定装置</li> <li>・ 低バック液体シンチレーション測定装置</li> <li>・ 液体試料前処理装置（仕様は未定）</li> </ul> <p><b>トリチウム以外の核種測定</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低バック半導体 線スペクトロメーター</li> <li>・ 低バック半導体 X線スペクトロメーター</li> <li>・ ガスフローカウンター（自動測定装置）</li> <li>・ 液体試料前処理装置</li> </ul> |
|--|

#### （8）真空容器開放時のトリチウム測定

真空容器開放時に現場で放射能や放射線の測定評価の便宜を図るため、真空容器開放作業現場専用の測定装置を搭載したモニタリングカートを準備する。モニタリングカートには、以下のような装置を組み込む。

- ・半導体 線スペクトルメーター（ポータブル型）
- ・窓なしガスフローカウンター
- ・小型液体シンチレーションカウンター
- ・トリチウムガスモニター（普及版）
- ・ダストモニター
- ・ダストサンプラー
- ・モニタリングカート本体

・電源

( 9 ) 空気放射化モニター

本体室の空気の放射化に関しては、問題となるのはアルゴンと金属等のダストである。ダストに関しては次節の「ダストモニター」にて、核種を同定する。線量は、通気型もしくは市販の放射線モニターシステムを用いる。

( 10 ) ダストモニター

集塵機により本体室や真空容器内のダストをフィルター（ろ紙）に収集し、核種を同定する。真空容器内に入域する時には確認する。

( 11 ) 線量表示

放射線安全管理の基本的な情報を、一カ所に集め、常時監視する。線量表示に関しては、現在すでに設置してあるRMSAFEのこれまでの運用実績をベースに、重水素実験作業環境の線量監視を目的として、線量監視機能の増強を行う。

3.6.6.2 環境放射線測定

( 1 ) 環境放射線

測定目的

敷地境界における線量が重水素実験開始後も大きく増加しないことを測定によって明らかにする。

（注 敷地境界における線量の管理目標値は50マイクロシーベルト/年である。自然放射線による線量が、1000マイクロシーベルト/年程度であるので、その5%に相当する。）

測定器の設置と測定頻度

敷地内、敷地境界の7地点にガラス線量計を設置して線量を測定する。1回の設置は、3ヶ月間とする。（電子線量計の試用を2006年3月に開始した。）これらについては、放射線監視システムによる監視結果との比較も行う。

なお、土岐に7地点、多治見に7地点、それぞれガラス線量計を設置して測定中である。その他、土岐市プラズマ研究委員会によるTLD測定もおこなわれている。これらの場所には、重水素実験の影響は及ばないので、自然バックグラウンド測定という位置づけである。

中性子線量を測定するために、標準的モデルであるレムカウンターを1～2箇所設置する。さらに制度よく測定するために、使用する測定器と設置の方法を決定した上で設置する。これらの測定器は、実験開始の1年以上前に設置を完了して、1年間は、バックグラウンド測定期間とする。

( 2 ) 環境トリチウム（水）

これまで、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターによって測定

を行ってきた。この方法の検出下限は0.5 Bq/kg～0.8 Bq/kg程度であり、現在土岐地区の環境水中トリチウム濃度は殆ど全てがそれを下回っている。

現在の測定を継続する。試料採取地点は13箇所である。

### (3) 環境トリチウム(大気)

LHDの重水素実験で発生するトリチウムは少ないので、これによる環境への影響は極めて低いと考えられるが、影響の無いことを確認することも大切である。このため、定期的に大気中のトリチウム濃度を計測監視する。

年間の本体棟付近の風向分布を勘案し、敷地内境界周辺の候補地点 2 ないし 3 箇所にサンプリングポストを設ける。

大気中のトリチウムは図3.6.6-4に示す流れで、3つの化学形態(水蒸気、水素ガス、メタン)別に弁別して酸化触媒を用いて水の形で捕集する。

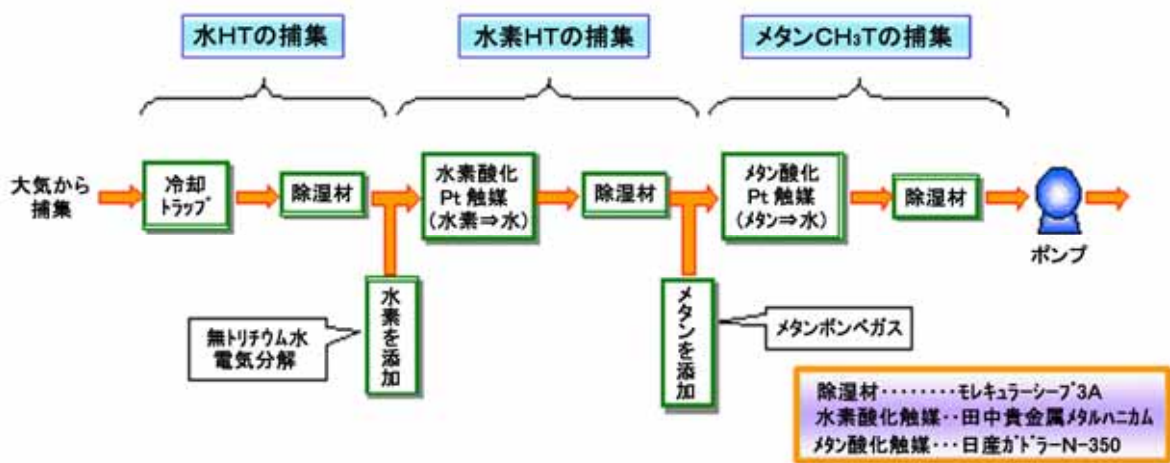


図 3.6.6-4 トリチウムを含む大気中水素の化学形態別捕集方法。

1ヶ月(基本的には4週間)連続して大気サンプリングしたのち、濃度測定する。得られた値を1ヶ月の平均値とする。

### (4) 建屋周辺環境放射能測定

建屋周辺環境放射能測定の対象と考えられるのは、トリチウムと放射化ダストである。

放射化ダストは、建屋内やスタックで測定される。建屋内やスタックにおける放射化ダストの濃度が管理上問題となるようなレベルの場合には、建屋周辺環境での測定が重要となる。従って、重水素実験による周辺環境の放射化ダストへの影響を確認するために、重水素実験前のバックグラウンドを測定しておく必要がある。

重水素実験開始の1年前から、毎月ダストを採集して、バックグラウンドデータを測定しておく。また、重水素実験期間中に、適宜採集測定して、異常のないことを確認する。

風向風速を考慮に入れて、採集地点を決める。ダストサンプラーによってダストを

採集する。GM管によるベータ線、ガンマ線測定を行う。ゲルマニウム半導体検出器でガンマ線スペクトル測定を行う。GM管とゲルマニウム半導体検出器は、建屋内環境等の測定に用いるものを使う。

自然バックグラウンドとの精確な弁別と評価のためには、大気中のラドン等の測定が不可欠となる。

### 3.6.6.3 まとめ

重水素実験において重要となる環境への放出量を測定するための測定器に関するまとめを表3.6.6-3に示す。この表では現行の入手可能な装置での測定を想定している。現在開発中の装置が完成した場合には、並行して設置し、所定の性能を確認した時点で移行していく予定である。

表3.6.6-3 環境測定用計測機器

| 使用目的   | 検出対象  | 測定器     | 検出方法   | 検出速度(注0)                    | 検出下限                                      | 管理目標値                                 | 備考            |
|--------|---|---------|--|-----------------------------|---|---------------------------------------|---------------|
| 中性子計測  | 本体室   | 連続      | 電離箱  | リアルタイム                      |   | 1-6年(2.1E19/年)<br>9-年(3.2E19/年)       | 別途、警報レベルを設定する |
| 排気測定   | 排気塔   | 連続      | 通気式電離箱                                       | 5分～(検出下限による)                | 0.0013Bq/cc(計測時間60分)                      | 0.005 Bq/cc(法規制値)                     | 異常値を検出        |
|        |   | 連続      | 比例計数管  | 1～10分(検出下限による)              | 0.003 Bq/cc(計測時間1分), 0.001 Bq/cc(計測時間10分) | 0.005 Bq/cc(法規制値)                     | 異常値を検出        |
| 排出量算出用 | 除去装置通過後<br>真空排気ガス系統<br>真空容器パージ<br>ガス系統(保守時) | 連続(開発中) | 比例計数管  | 約10分                        | 0.0001 Bq/cc以下(目標値)                       | 0.0002 Bq/cc                          |               |
|        |   | 積算      | シリカゲル等に水分を捕集。水素成分は酸化して捕集。捕集終了後に水分を回収して液シン測定。 | 1週間～3ヶ月(捕集時間の違うサンプルによる多重計測) | 0.00002 Bq/cc以下                           | 総排出货量、年間0.1Ci、<br>3ヶ月平均濃度0.0002 Bq/cc | 総量及び濃度管理      |
|        | 放射化ガス(Ar-41)                                | 連続      | 測定用タンクに空気を引き入れ、NaI検出器で検出。                    | 1時間                         | F-18で0.0007 Bq/cc (Bkgd=10/sの時)           | 0.0005 Bq/cc(法規制値)                    | 計算と併用         |
|        | ダスト(γ線、β線)                                  | 連続      | ダストモニター                                      | 5分                          |   |                                       | 適宜測定          |
| 排水測定   | 排水槽(トリチウム含有水)                               | 連続      | 通気式電離箱                                       | 2～3分                        | 0.1Bq/cc                                  | 35 Bq/cc(注1)                          |               |
|        | (ドレン水など)                                    | 連続      | 比例計数管  | 1～10分(検出下限による)              | 0.003 Bq/cc(計測時間1分), 0.001 Bq/cc(計測時間10分) | 0.007Bq/cc(注1)                        |               |
| 放射線測定  | 敷地境界線量                                      | 排水後測定   | 液体シンチレータ                                     | 10分                         | 0.3 Bq/cc水                                | 0.6 Bq/cc水                            |               |
|        |   | 排水後測定   | NaI検出器                                       | 10分                         | 0.01 Bq/cc水                               |                                       |               |
| 放射線測定  | 敷地境界線量                                      | 排水後測定   | 液体シンチレータ                                     | 測定開始後、約3時間                  | 0.001 Bq/cc水                              | 0.6 Bq/cc水                            |               |
|        |   | 排水後測定   | 各種、放射線測定器                                    | 蒸発乾固等の前処理の後、測定              |   |                                       |               |
| 放射線測定  | 敷地境界線量                                      | 連続      | 電離箱  | ほぼリアルタイム                    |   | 50 μSv/年                              |               |
|        |   | 連続      | 比例計数管  | ほぼリアルタイム                    |   |                                       |               |

研究所管理値の監視  
法令値の監視

注0：データになるまでに要する時間  
注1：T回収率95%時の最大出口濃度



### 3.6.7 建屋整備

重水素実験に対する安全対策として、

- 1) 発生する中性子および誘導放射能によるガンマ線の遮蔽。  
特に中性子に関しては、ストリーミングを十分考慮して対策を立てる。
- 2) 発生するトリチウムの回収および処理システムの構築。  
トリチウムなどに付随した換気・排気システムの構築。
- 3) 入退管理システムの構築。
- 4) 安全対策用計測機器の整備および監視システムの構築。
- 5) 放射性物質の管理・保管・取り扱い施設の整備。
- 6) 管理区域の入隊に関するマニュアルの整備。
- 7) 実験手順に関するマニュアルの整備。
- 8) 機器の整備、補修に関するマニュアルの整備。
- 9) 災害時、緊急時の対応マニュアルの整備。

等が挙げられる。本章では、建屋の整備・増強に関して述べる。

#### 3.6.7.1 中性子線・ガンマ線対策

##### (1) 貫通口対策

本体室の壁コンクリートは2 m厚であり、天井の厚みは1.3 mである。さらに、地上部分に貫通孔を持たない。そのため、敷地境界における線量は法令の規制値である1 mSv / 年に比べて十分に小さいと計算している。一方で、本体地下室に隣接する部屋では、本体地下室の貫通孔からの中性子ストリーミングによる線量増加があるので、その対策が必要になる。

##### (a) 本体室床孔の穴仕舞い

地下室への中性子ストリーミングが少なければ、地下室から隣接する部屋への貫通孔の対策が楽になる。できるだけ、隙間がないように埋める。これは、防火区画や本体室の負圧管理と矛盾しない。図 3.6.7-1 に本体室1階から地下への貫通孔を示す。

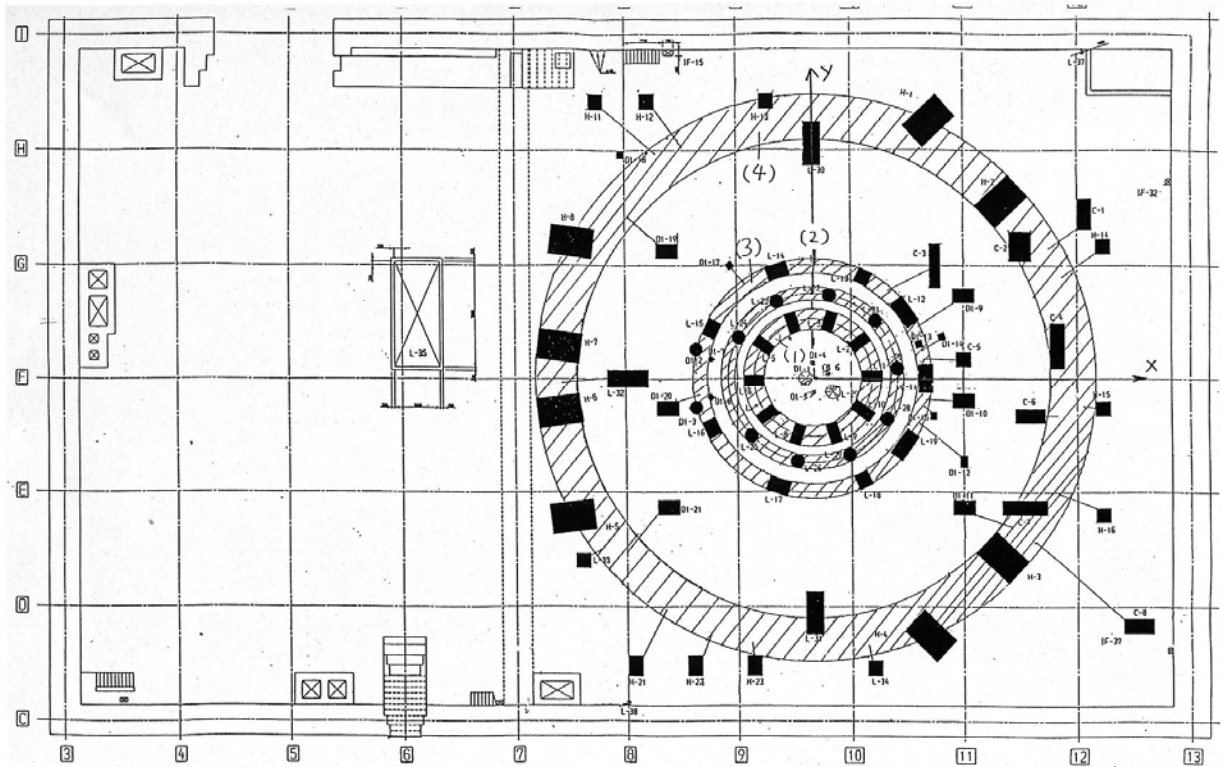
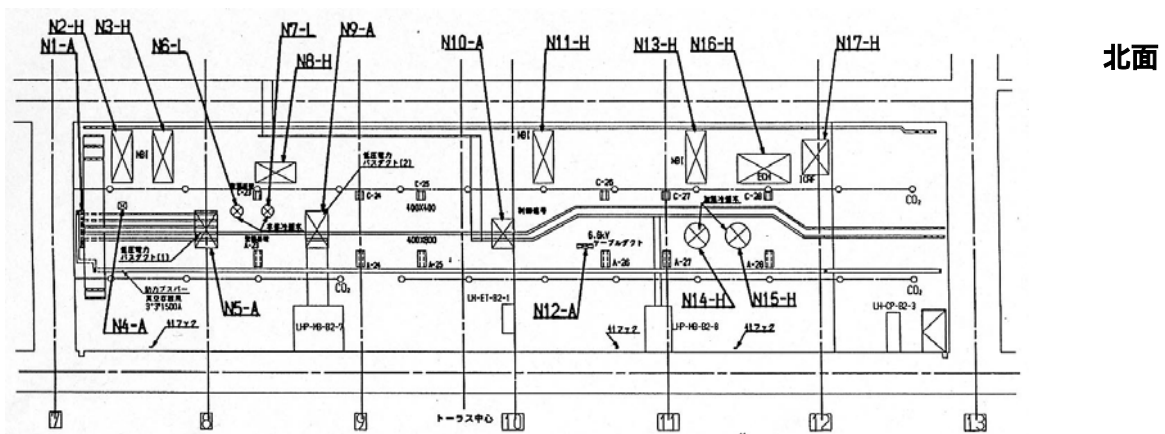


図 3.6.7-1 本体室 1階から地下への貫通孔。

(b) 本体地下室貫通孔の穴仕舞い

本体地下室壁面の貫通孔は、それぞれ隣接した部屋の用途が異なるため、個々に対応が必要となる。図 3.6.7-2 に本体地下室壁面の貫通孔を示す。

(注) この遮へい計算における1ショットの中性子発生量は DD 中性子が  $2.4 \times 10^{17}$  個、DT 中性子が  $4.3 \times 10^{15}$  個としている。現計画中之での1ショットあたりの中性子発生量はこれよりも小さいので、貫通孔対策は、ここで記すものよりも軽減できると考えられる。



北面

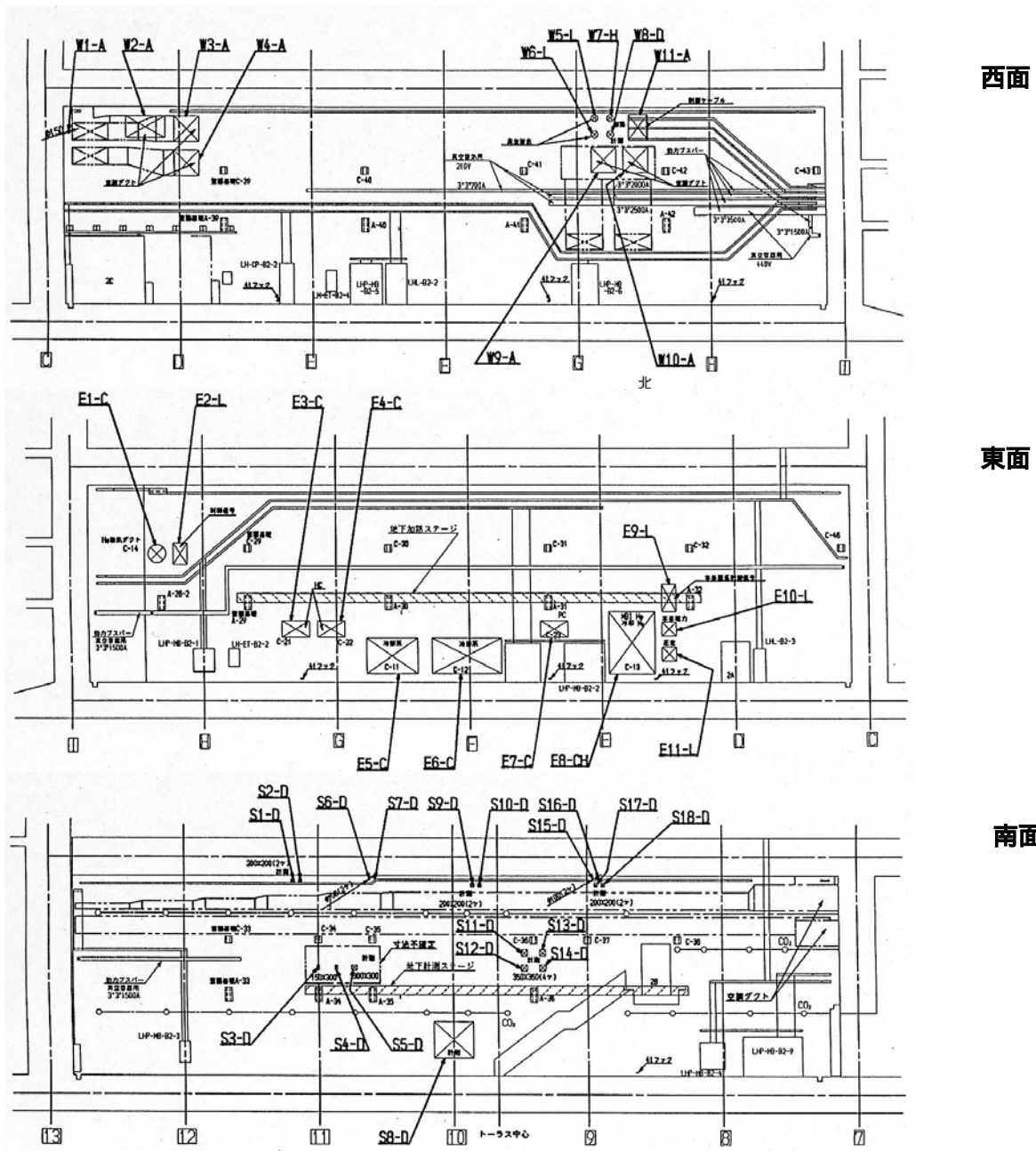


図 3.6.7-2 本体地下室壁面の貫通孔。

これら貫通孔からの中性子のストリーミングによる線量を低減するために、穴仕舞い、迷路構造、遮蔽材によるブロック等の対策を行う。これら対策の概念図を、図 3.6.7-3 に示す。

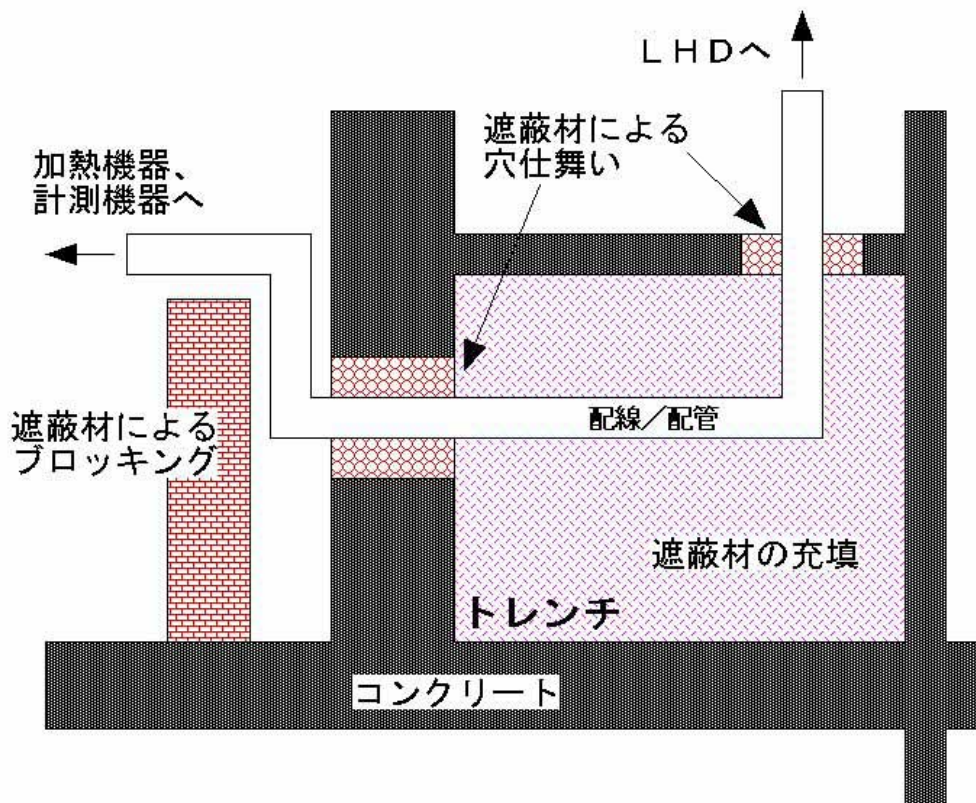


図 3.6.7-3 遮蔽対策に関する概念図。

### (2) 実験室内面の塗装

実験室内は、1階低部の壁面、安全通路等のみが部分的に塗装された状態であるため、汚染防止のために必要に応じた塗装を施す。

### (3) 制御ケーブルの中性子対策

制御ケーブルには難燃性架橋ポリエチレン被覆ケーブルが使用されており、そのまま使用できる見込みである。同一素材の試験試料を本体室に配置して、定期的に特性変化を調べることによって劣化の有無を判断する。

## 3.6.7.2 トリチウム対策

### (1) 真空排気装置系

現在の真空容器、真空排気装置、建屋排気塔までの排気配管の内、排気配管などの接続にはバイトンOリングが使用されているため、改造する必要がある。

以下のような改造を行うものとする。

- ( a ) 真空容器系排気配管と断熱真空容器系排気配管は、別配管とする。断熱真空容器系排気配管として、ヘリウム排気配管を利用することを考える。
- ( b ) 真空容器系排気配管は、現在の排気配管を利用するものとする。O-リングとして、バイトンが使用されているが、原則として、これを全てヘリコフレックスのような金属O-リングに変える。
- ( c ) 真空容器系排気配管のトリチウム除去装置接続部分は、2系統に分岐し、各々に排気ファンを接続して、故障に備えるものとする。
- ( d ) 真空容器系排気配管には、中性粒子加熱装置、計測機器の排気配管などが接続されるが、これらの排気配管の接続部も全てヘリコフレックスのような金属O-リングに変える。
- ( e ) 真空容器に接続している加熱機器、計測機器などで、大気を直接シールしているO-リングは、原則として、全てヘリコフレックスのような金属O-リングに変える。
- ( f ) 加熱機器、計測機器などと真空容器の間に設置されているゲートバルブの弁のシールは、機器側も通常真空が保たれている場合には、バイトンでよいものとするが、そうでない場合には、弁のシールとして金属O-リングのゲートバルブを使用し、機器側にさらにバイトンのゲートバルブを設置する(ダブルゲートバルブ)。
- ( g ) トムソンの測定窓のようにバイトンを使用しているものは、原則として金属O-リングに変えるものとするが、どうしても金属O-リングを使用できない場合、トリチウムが透過しない工夫をするものとする。

( 2 ) 真空排気装置端への除去装置製作・設置

トリチウム管理に関する基本方針を表3.6.7-1に示す。また、この基本方針に対応したトリチウム除去装置の設計仕様を表3.6.7-2に示す。トリチウムの年間発生量の最大値(1.5Ci)を想定した場合でも、回収率90%のトリチウム除去装置を設置することで、NIF Sの管理目標の達成が可能である。

表 3.6.7-1 トリチウム管理方針。

| 発生源            | 管理方針   | 法令基準<br>(水蒸気状T)                             | NIF S<br>管理値                                |
|----------------|--|---|---|
| 実験中の<br>真空排気ガス | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水の形で除去回収</li> <li>・建屋排気塔出口でNIF S管理値以下を確認</li> <li>・回収トリチウム水はRI協会に引渡処分</li> </ul> | $5 \times 10^{-3}$<br>Bq/cc<br>(3ヶ月平均<br>値) | $2 \times 10^{-4}$<br>Bq/cc<br>(3ヶ月平均<br>値) |

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| メンテナンス時の真空容器パージ空気  | <ul style="list-style-type: none"> <li>トリチウム除去装置を設置</li> <li>N I F S管理値を越える場合に除去装置を使用</li> <li>回収トリチウム水はR I 協会に引渡処分</li> </ul> | $5 \times 10^{-3}$<br>Bq/cc<br>(3ヶ月平均値) | $2 \times 10^{-4}$<br>Bq/cc<br>(3ヶ月平均値) |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>本体室空調機ドレン水</li> <li>手洗い水</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>N I F S管理値以下を確認のうえ、下水に放出</li> <li>管理値を越える場合にはR I 協会に引渡処分</li> </ul>                     | $60$ Bq/cc<br>(3ヶ月平均値)                  | $0.6$ Bq/cc<br>(3ヶ月平均値)                 |

表 3.6.7-2 処理装置の設計仕様案。

| 処理装置                   |         | 真空排気系<br>気体処理装置         | 真空容器内<br>気体処理装置        |
|------------------------|---------|-------------------------|------------------------|
| 処理ガス流量                 |         | 0.02 Nm <sup>3</sup> /h | 100 Nm <sup>3</sup> /h |
| 運転時間                   |         | 4000 h/年                | 4000 h/年               |
| T発生量                   |         | 1.5 Ci/年                | 1.5 Ci/年               |
| T回収率                   |         | 90%                     | 90%                    |
| トリチウム<br>濃度<br>(Bq/cc) | 装置入口    | 750                     | 0.15                   |
|                        | 装置出口    | 75                      | 0.015                  |
|                        | スタック出口  | $1 \times 10^{-4}$      | $1 \times 10^{-4}$     |
| 管理値<br>(Bq/cc)         | 法令      | $5 \times 10^{-3}$      |                        |
|                        | N I F S | $2 \times 10^{-4}$      |                        |

重水素実験に伴って生成するトリチウムのうち、真空容器壁表面に吸蔵・堆積されなかったものが真空排気ガスとともに系外に直接排出される。また、He放電洗浄によって、真空容器壁表面に堆積したトリチウムの一部が脱離して真空排気ガス中に移行すると想定される。これら真空排気ガス中のトリチウムは比較的高濃度になることが予想されることから、全量処理するものとする。トリチウム除去設備の概念図を図3.6.7-4に示す。

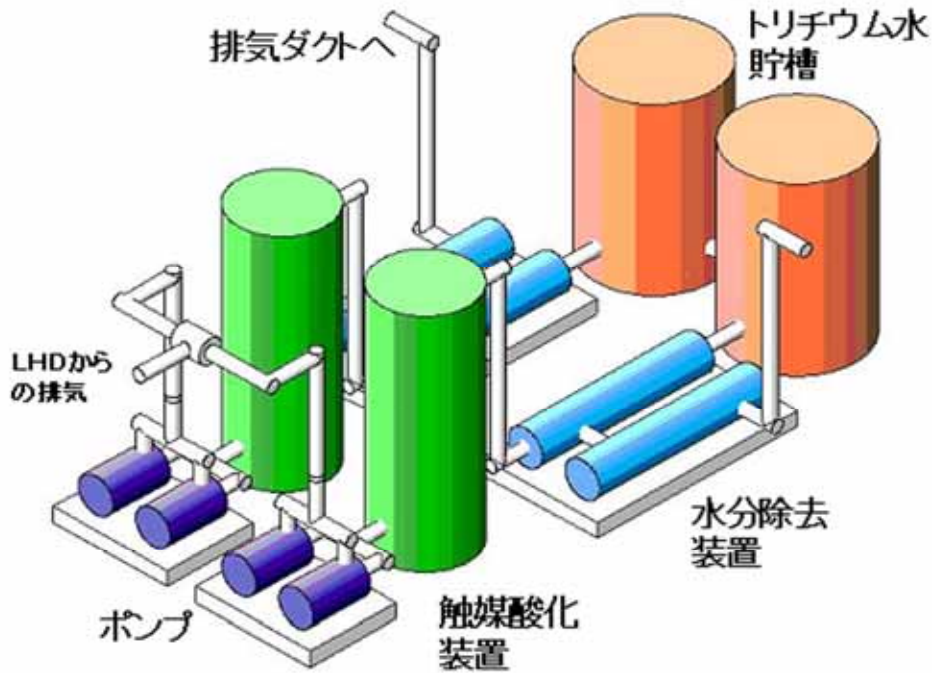


図 3.6.7-4 トリチウム除去設備の概念図。

### (3) 真空容器壁からのトリチウム放出対策用除去装置

真空容器壁表面に吸蔵・堆積したトリチウムは、真空容器開放点検時に容器内の空気雰囲気中に徐々に放出されると想定される。管理値を超える場合には、除去処理を行う。

### (4) トリチウム含有水保管関連施設の整備

本体室放射線管理区域内で発生した全ての排水は、発生後いずれも専用の保管容器や貯留槽に一時的に保管し、一定量ごとに処理して放射能濃度を測定（モニター）する。その結果、排水中の濃度が管理値を超えていない場合、放出処分を行う。また濃度が管理値を超える排水は、日本アイソトープ協会から貸与を受けた液体廃棄物容器等に廃液として収納し、保管廃棄施設で保管して、適宜、日本アイソトープ協会へ引き取りを依頼する。以上の方針において、管理区域内で発生するすべての排水は一時的に貯留され、濃度の確認がなされた後、放出あるいは引き渡しが行われるため、直接管理区域外に放出されることはない。

用語：廃液： 専用容器に保管し、日本アイソトープ協会へ引き渡すことを前提とするもの。  
 排水： 低濃度用貯留槽に貯留し放出処分を前提とするもの。



### 廃液等保管容器

保管廃棄施設において廃液等および排水を保管するために使用される保管容器は、図 3.6.7-5 に示すように耐火性外容器と液体収納用容器（液体容器、ポリエチレン製）からなる。廃液等は液体容器に貯留され、耐火性容器の中に保管される。これは日本アイソトープ協会から貸与されたものである。廃液等は、発生してから日本アイソトープ協会へ引き渡されるまでの間、この容器に保管された状態で、保管廃棄施設において保管される（保管廃棄）。

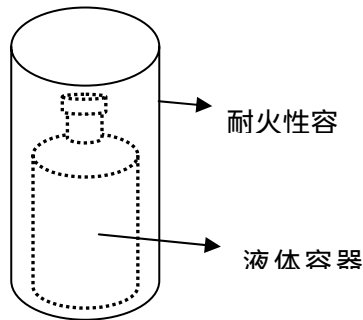


図 3.6.7-5 日本アイソトープ協会から貸与を受ける液体保管容器。

### 貯留槽

貯留槽の基本的な構成例を図 3.6.7-6 に、主な仕様を表 3.6.7-3 に示す。このシステムは排水処理槽 2 基、低濃度用貯留槽 3 基からなる。3 基の低濃度用貯留槽を単に貯留槽と呼ぶが、互いに同じ機能を有し、バルブ操作によって、切り替えながら交互に使用する。

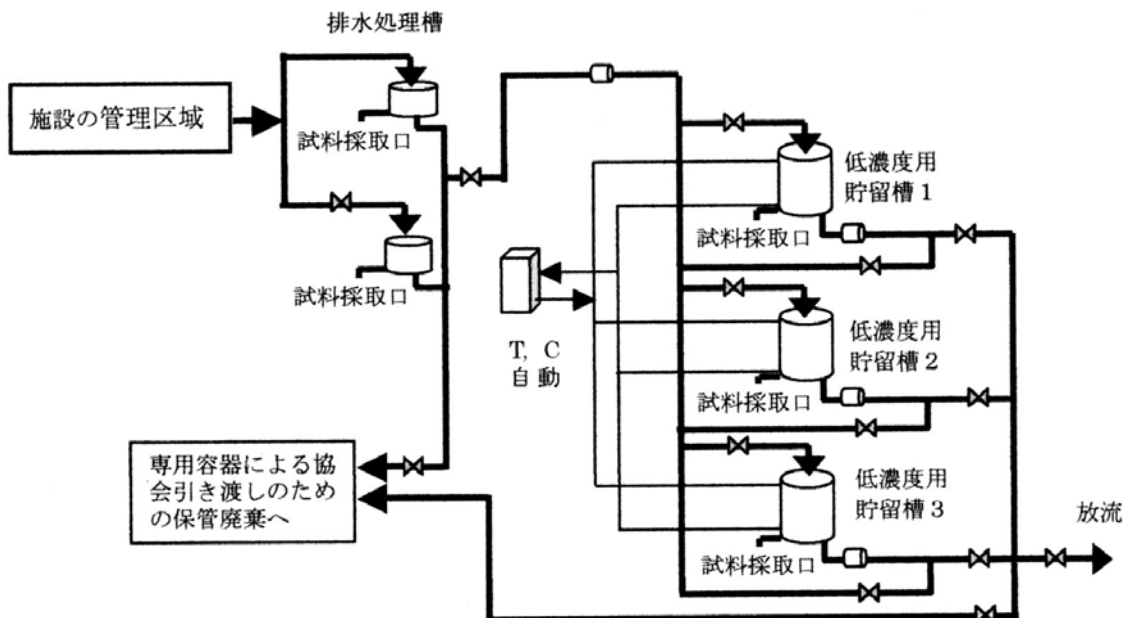


図 3.6.7-6 排水貯留槽とモニターの構成例（貯留槽切替え以外のバルブは省略）。

表 3.6.7-3 排水貯留槽の主な仕様、その他。

|   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・貯留槽（排水処理槽 2、低濃度用貯留槽 3、ステンレス製）</li><li>・切替バルブ（電動・手動 2 重、遠隔・現場操作）方式</li><li>・放流基準：法令の濃度限度</li><li>・バッチ方式試料採取測定<ul style="list-style-type: none"><li>・ T, C 自動測定装置（H-3, C-14 遠隔測定）</li><li>・液シン： 核種（トリチウム、カーボン他）</li><li>・半導体検出器： 核種</li><li>・その他の核種</li></ul></li><li>・放射線総合監視システムへの管理信号</li></ul> |
|---|

管理区域内で発生した排水はすべて、排水処理槽に送られる。排水処理槽は 3 ~ 5 トン程度の比較的小さな容量の槽である。一方の排水処理槽が満杯になったらもう一方の排水処理槽にバルブの切り替えを行い、放射能を測定する。その結果、濃度が管理値以下であれば三基の貯留槽のうちどれかに排水を送って貯留する。また濃度が管理値を超える場合には、日本アイソトープ協会への引き渡しを行うため、廃液として専用容器に移し替え、引き渡しまでの間、保管を行う。

#### （ 5 ）トリチウム含有水の処理

表 3 . 6 . 7 - 1 の基本方針に示すように、トリチウム除去装置で回収したトリチウム含有水は全量、日本アイソトープ協会に引き渡し処分する。

本体棟の空調機からのドレン水、手洗い排水などについては、N I F S 管理値（0.6 B q / c c ）以下の場合には、下水に放出する。管理値を越える場合には日本アイソトープ協会に引き渡し処分する。

#### 3 . 6 . 7 . 3 換気・排気対策

プラズマ実験期間中は、大型ヘリカル実験棟の本体室内の空気が放射化するため、負圧を保つために排気を行うが、放射化した空気の排出量を抑制するため、本体室からの排気量は可能な限り少なくする。大型ヘリカル実験棟の本体地下室と排気装置室も負圧に管理し、これらからの排気は、放射線濃度をモニターしながら排気塔から大気に放出する。

現行の空調機の仕様を表 3 . 6 . 7 - 4 に示す。外気との換気が可能な系統は ACU-6 系統の 1 系統だけであるが、12,550 m<sup>3</sup>/h の換気能力を有しており、負圧維持に必要な能力を備えていると考えられる。開口部や扉部分の気密性を高めることによって負圧保持のための換気量を抑制する（気密性を高くすることは、中性子のストリーミングを減少させる上でも有効である）。

ACU-6 系統の排出口および 1 F 検査室の排気口には RI フィルターを設置して放射化したダスト等をろ過して取り除く。

表 3.6.7-4 現行の空調機の仕様

|   |  |
|---|--|
| < 構成 >  |  |
| 吸収式冷凍機  | 2台 (550 冷凍トン/1台 : 2.12 MW/台) 熱源は自家発電機の廃熱   |
| ガス炊き式冷温水発生器                                       | 1台 (500 冷凍トン : 1.93 MW / 加熱能力 1.35 MW)   |
| < 温度・湿度管理 >                                       |  |
| 冷房・暖房切替、温度・湿度設定は中央監視により遠隔操作で行う。                   |  |
| 検出器   | 本体室 温度計測点 2箇所、上下 2点計 4点  |
|   | 湿度計測点 2箇所 計 2点   |
| < 空調機系統と各室ダクト等の関係 >                               |  |
| ACU-1 系統 (60,000 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階北側 中段吹き出口用 (可変ノズル)  |
| ACU-2 系統 (60,000 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階南側 中段吹き出口用 (可変ノズル)  |
| ACU-3 系統 (60,000 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階北側 最上段吹き出口用 (固定ノズル)   |
| ACU-4 系統 (60,000 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階南側 上段吹き出口用 (固定ノズル)  |
| ACU-5 系統 (80,000 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階西側 上段吹き出口用 (固定ノズル)<br>中段吹き出口用 (可変ノズル)   |
| ACU-1 ~ 5 系統共に下段は吸い込み口                            |  |
| ACU-6 系統 (12,550 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室 1 階および本体室地下 1 階排気装置室排気処理用<br>ダンパー調整により外気の取り入れができる。<br>(外気取り入れ量 : 12,550 m <sup>3</sup> /h) 7.0%/h = 0.12%/min. |
| ACU-7 系統 (74,300 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室地下 2 階北側 ACU-6 と共に炭酸ガス排出に使用   |
| ACU-8 系統 (74,300 m <sup>3</sup> /h)               | 本体室地下 2 階南側  |
| ACU-9 ~ 11 系統 (13,600 - 15,500 m <sup>3</sup> /h) | 計測機器室系統  |
| < 空調機の設置位置 >                                      |  |
| ACU-1 ~ 4、6 ~ 8                                   | は空調機械室(1) (地下 1 階、本体地下室の西側)  |
| ACU-5   | は本体室   |
| ACU-9、10、11                                       | は空調機械室(1) (2 F、計測機器室の西側)   |

### 3.6.7.4 入退管理対策

#### (1) 本体室入退管理室 (汚染検査室) の整備

本体室が加速器施設であると同時に非密封 R I 取扱施設になることを想定して、放射線安全管理を円滑に進めるために必要な出入り口の整備を行う。放射線施設の出入り口には、以下の設備を設ける。

- (a) LHD 入退管理室
- (b) LB 保管場所
- (c) 更衣室と下駄箱、バリア

- ( d ) 汚染検査設備
- ( e ) 除染設備
- ( f ) 記録作業室 ( 非管理区域 )
- ( g ) その他 ( 管理情報を提供するための設備 )

( 2 ) 本体棟入退管理装置の強化

本体棟が放射線施設になり管理区域が設定されると、放射線業務従事者 300 名に対する更衣室と汚染検査室・除染室の設置、記録室、LBの保管が必要となる。そこで、放射線安全管理の円滑な運用を確保するために、これまで4箇所あった本体室への出入り口を一箇所に限定する。その一箇所としては現在の本体室一階南側入り口を想定している。ただし現状では、更衣室や汚染検査室などとの機能のつながりが円滑でないため、入り口付近を改造する必要がある。その案を図3.6.7-7に示す。図3.6.7-7では、更衣室、汚染検査室、入退管理装置などの配置案を示したが、300名の放射線業務従事者に対応するには、スペースとして十分とは言い難い。今後、分電盤、制御盤の移設、壁の撤去、部屋の再配置などを視野に入れて再検討したい。以下に、入退室管理装置に必要な機能や整備事項を列記する。

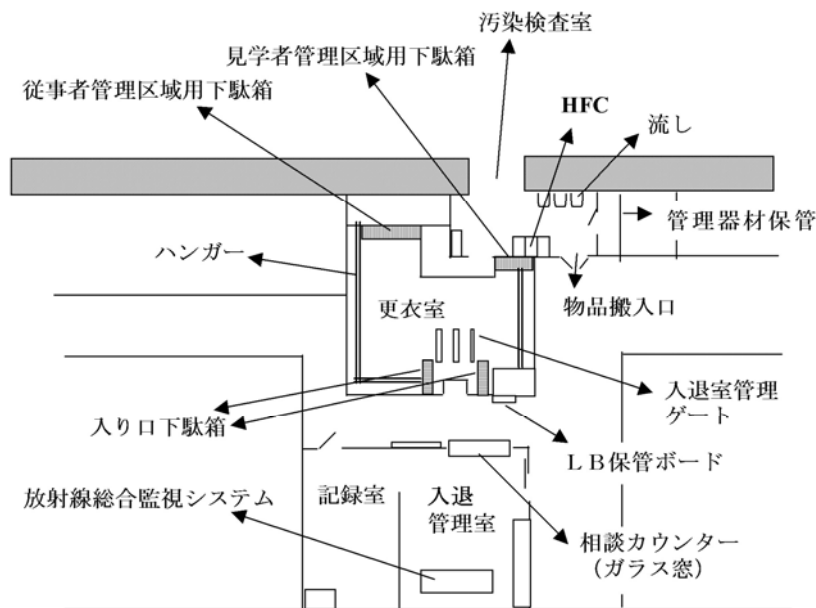


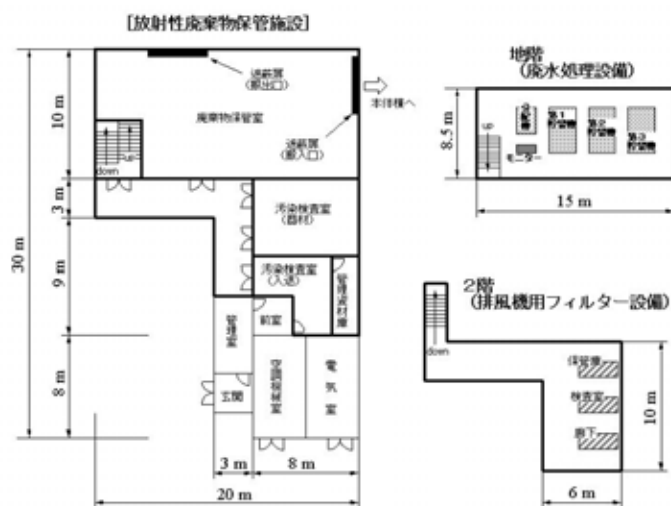
図 3.6.7-7 管理室、更衣室等の配置案

### 3.6.7.5 付帯設備の整備

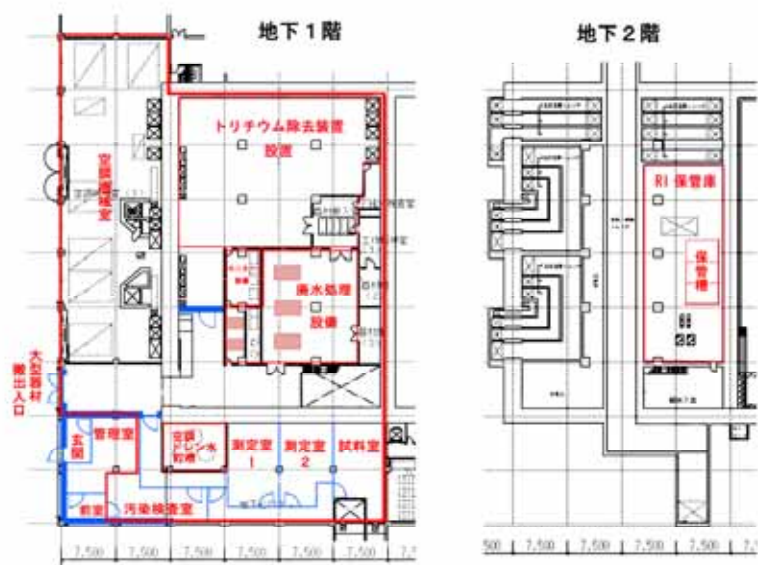
#### (1) 放射性廃棄物保管施設（器材庫II）

重水素実験により、本体室内の装置は中性子照射を受けて放射化する。そのため、故障等により本体室から撤去される機器を保管する施設が必要となる。また、トリチウムを分離除去した場合は、トリチウム含有物の保管も必要となる。これらの目的のため、「放射性廃棄物保管施設（器材庫II）」を設ける。この施設は汚染検査室など、法律に基づいた設備を有し、機器の汚染の度合いを計測する各機器類、施設への入退を管理する設備を整備する。放射性廃棄物保管施設の新設案（器材庫II）と改築案（本体棟地下）を図3.6.7-8に示す。この施設は法律に基づき耐火構造とするが、特に廃棄物保管庫は地震に備え、震度7の耐震構造とする。

#### a) 放射性廃棄物保管施設の新設案（器材庫II）



#### b) 放射性廃棄物保管施設の改築案



### 図 3.6.7-8 放射性廃棄物保管施設案

放射性廃棄物保管施設に必要な設備として、管理室、汚染検査室、廃棄物保管室、廃水処理設備、換気設備、管理資材庫等が挙げられる。

#### (2) 汚染除去、分析・測定および照射校正実験室

放射線量を正確に測定するには、測定器に校正を精密に行うことが必要不可欠である。そのためには、以下の部屋を設けることが望ましい。

##### 1. 汚染除去室

通常使用する機器や、再利用可能な低レベルの放射化物の除染を行う。

##### 2. 分析、測定室

液シン、Ge 検出器等の測定器を設置し、機器や試料の線量測定、計測機器の校正等を行う。

##### 3. 照射校正室

照射装置を設置し、高レベルの線量測定器の校正、中性子計測器の校正を行う。

#### (3) 管理区域内保守作業室

本体室内で行わなければならない作業に対処するため、管理区域内作業室を本体室西側のスペースに設ける。室内には3トン程度の走行クレーンを備え、室内での重量物運搬に備える。通常の出入りは180cm両開き扉であるが、大型物品を搬入するために、間口8mの両開きの扉を設置する。この作業室には遮蔽機能はなく、換気機能だけを有する。本体室内の空気をロールフィルターで浄化して東側天井位置から室内に給気し、西側の排気口からプレフィルターバンクをとおして排気する。本体室内よりも負圧を維持することにより、トリチウムの本体室内への漏出を防ぐ構造とする。図3.6.7-9に管理区域内保守作業室の概念図を示す。

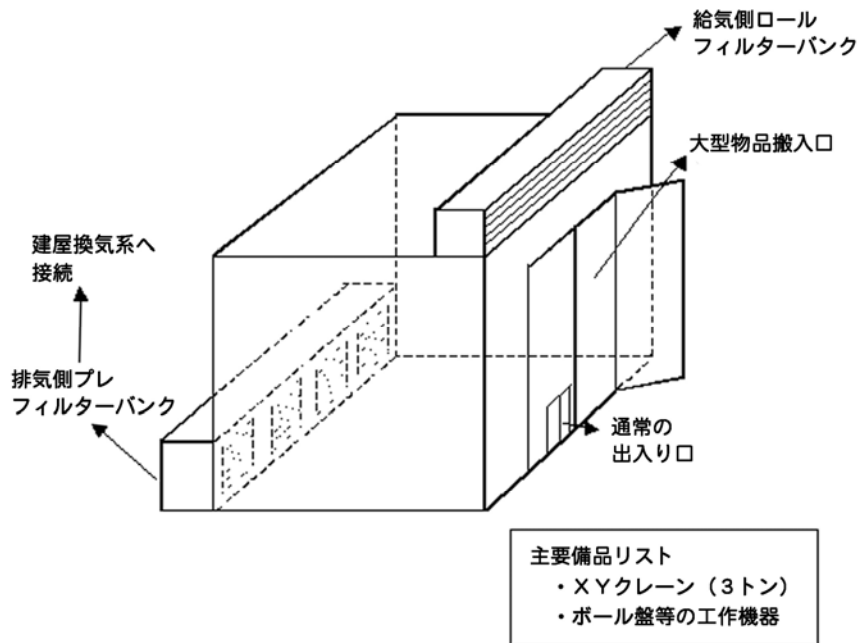


図 3.6.7-9 管理区域内保守作業室概念図

### 3.6.7.6 放射線管理

#### (1) 放射線総合監視システム

放射線安全管理の基本的な情報を、一カ所に集め、常時監視するために、放射線総合管理システムを設置する。この装置は、表示パネル等にエリアモニターその他の測定値（放射線管理状況）をライブ表示するとともに、排水処理槽や低濃度用貯留槽切り換えバルブの遠隔操作やバルブ開閉状況表示など、放射線安全管理業務関連装置の制御運転や監視の機能を有する。



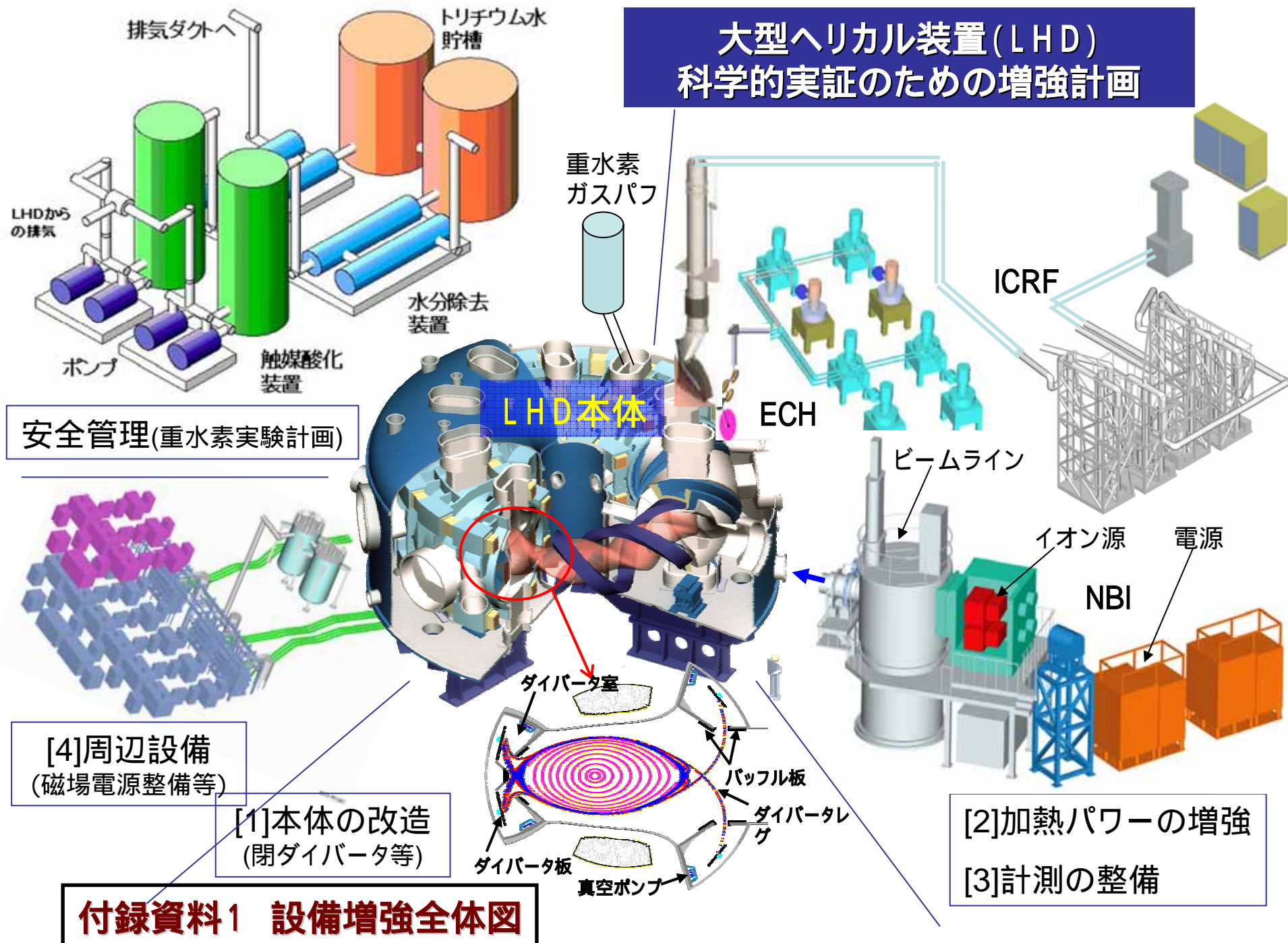
## 第 4 章 ま と め

本報告書では、大型ヘリカル装置（LHD）における重水素実験計画について検討した結果を述べている。これまでの10年間の水素を用いた実験により、物理・工学研究の両面において所期の目標に対し、現在の実験条件では十分に評価できる結果を得てきたと考えている。プラズマパラメータにおいてトカマク方式と同等の性能を出しており、プラズマの安定性、定常保持能力ではヘリカル方式の特長を十分に実証してきた。しかしながら重点研究課題の中で残された研究課題も多くあり、将来のヘリカル系核融合炉を目指した研究には、この研究課題のさらなる進展が不可欠となっている。本書で記述した重水素実験計画により、これらの課題の研究を進展させることが出来ると考えている。閉じ込めの改善と加熱パワーの増強、ダイバータの強化、計測の充実等により、新たにパラメータ領域と物理研究領域を拡大し、ヘリカル系の核融合炉の設計をより明確におこなうことを可能とするデータが得られると期待される。大型トカマク装置のデータと比較することにより、環状閉じ込め装置の高温プラズマ物理に対し総合的理解が一層すすむことも同時に期待されている。

核融合エネルギーの実現は将来の明るい社会には不可欠な技術である。核融合研究は長期間の研究であり、経済的な核融合炉の実現には、革新的な技術開発が必要である。このため、核融合科学研究所は、今後も大学共同利用機関としての役割を担い、全国の研究者に最先端の科学研究の場を提供すると共に、大学院生の教育を通して将来の研究者育成にも当たるものである。

我が国独自開発のヘリオトロン方式である大型ヘリカル装置（LHD）による核融合研究は、世界的にも高く評価されており、国産技術の開発は国家戦略上も重要である。核融合科学研究所ではこの重水素実験を推進することにより、共同研究を積極的に活性化し、核融合実用化への研究に鋭意努力して行く所存である。

# 大型ヘリカル装置(LHD) 科学的実証のための増強計画



安全管理(重水素実験計画)

[4]周辺設備  
(磁場電源整備等)

[1]本体の改造  
(閉ダイバータ等)

[2]加熱パワーの増強

[3]計測の整備

## 付録資料1 設備増強全体図

LHD科学的実証のための増強計

|   | 重水素実験準備期間 |        |            | 前期重水素実験 |     |                     |        |        | 後期重水素実験             |     |     |     |
|---|-----------|--------|------------|---------|-----|---------------------|--------|--------|---------------------|-----|-----|-----|
|   | 準備初年度     | 準備2年度  | 準備3年度      | 初年度     | 2年度 | 3年度                 | 4年度    | 5年度    | 6年度                 | 7年度 | 8年度 | 9年度 |
| 本体の改造と加熱パワーの増強計画  |           |        |            |         |     |                     |        |        |                     |     |     |     |
| [1]本体<br>(1)閉構造ダイバータ  |           |        | 発注・製作      | 設置      |     |                     |        |        |                     |     |     |     |
| [2]加熱<br>(1)電子サイクロトロン加熱<br>真空導波管整備<br>アンテナ整備<br>ジャイロトロン購入(140or150GHz)  |           |        |            | イロトロ    |     |                     | 大電力5MW |        |                     | 交換  |     |     |
| (2)中性粒子入射加熱<br>垂直中性粒子入射加熱装置   |           |        | 垂直80KeV9MW |         |     | 計測DD改造60KeV垂直9MW、接線 |        | 大型部品交換 |                     |     |     |     |
| (3)イオンサイクロトロン加熱<br>アンテナ整備<br>伝送路整備<br>発振器整備   |           | 3ﾊﾞｰ体制 |            |         |     |                     |        |        | 5ﾊﾞｰ、1時間3MW、単パルス8MW |     |     |     |
| [3]計測<br>高エネルギー粒子計測システム<br>高精度輸送計測システム<br>(トモグラフィ計測ステーション)<br>ダイバータ計測システム<br>(ダイバータ計測ステーション)<br>定常・高速データ収集・処理システム |           |        |            |         |     |                     |        |        |                     |     |     |     |
| [4]周辺整備<br>位置制御ボロイダルコイル磁場電  |           |        |            |         |     |                     |        |        |                     |     |     |     |

重水素実験計画

手続きなど

|       |  |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 規制課申請 |  |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 規制課検査 |  | 準備、申請書作成 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 予備実験  |  |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

機器

|                                 |  |  |  |  |  |    |  |  |    |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|----|--|--|----|--|--|--|
| [1]本体<br>基幹設備DD対応(真空容器、真空排気系改造) |  |  |  |  |  |    |  |  |    |  |  |  |
| [2]計測<br>中性子計測システム              |  |  |  |  |  |    |  |  |    |  |  |  |
| [3]安全管理<br>安全装置                 |  |  |  |  |  | 整備 |  |  | 整備 |  |  |  |

付録資料2 設備増強年次計画