



プロジェクトレビュー

大型ヘリカル装置計画から

山田 弘司

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリカル研究部

(原稿受付：2011年1月25日)

大型ヘリカル装置 (LHD) 実験の最近の成果を中心に紹介するとともに、原点からの経緯を振り返り、将来の展望について述べる。また、共同研究を骨子とした実験体制と国際的・学際的連携についても触れる。LHD 実験では本体・加熱などのハードウェアの整備とプラズマ物理学上の発見が相乗的に研究を加速している。プラズマ性能を向上させる内部拡散障壁、高イオン温度をもたらす改善モードなどの発見、非局所輸送、共鳴摂動磁場への多様なプラズマの応答などに新しい知見が開かれてきている。精密な計測機器の整備によって、これらの物理現象間の相関関係から因果関係の同定を緻密に詰め、理解の体系化を図っている。LHD は平成10(1998)年より超伝導コイルの冷却運転を根拠とした数か月の実験サイクルを平成22年(2010年)度までに14回実施し、10万ショット以上のプラズマ放電を共同研究に供してきた。今後も LHD ではトロイダル電流を必要としない定常ヘリカルプラズマの特長を活かし、核融合エネルギーの実現に資するトロイダルプラズマの総合的理解に向け、成熟度を高めていく計画である。

Keywords:

Large Helical Device (LHD), steady-state discharge, high-beta, high-density, divertor, confinement improvement

1. はじめに

大型ヘリカル装置 (LHD) 計画の目的は、平成元(1989)年の核融合科学研究所設置構想に定義されているとおり、新しいプラズマ領域の研究を世界に先駆けて行うこと、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、そして、広く共同利用に供することである。平成10(1998)年3月31日のファーストプラズマ以来、今日まで数か月間の実験キャンペーンを14回行い、10万ショット以上のプラズマ放電実験を通じて、この目的に沿った研究を進めてきた。これらの目的は、13年間のLHDにおける研究進展と世界的な核融合研究の流れから、今日的意義を高め、輪郭がより明確になりつつある。すなわち、定常型原型炉に向けた研究の収斂を学術的なアプローチから加速する一方、関わる分野において知の循環を発展させるための研究ネットワークの中核としての機能強化を図ることである。

本稿では、プラズマ・核融合学会誌において平成18(2006)年に掲載されたプロジェクトレビュー「大型ヘリカル装置の最近の成果」[1]以降の進展を振り返り、アップグレードとも呼べる新しい研究段階への展望について述べる。ごく最近の成果については、学術誌への投稿準備中であるものが多く、さわりの紹介になることをご容赦願いたい。

LHD の目的が叶うよう設定された重点課題は常に研究の方向性を照らすために基本となるものであり、本稿のはじめにあたって再確認しておきたい。

- (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%以上の高い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る舞いを研究し、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。

現在、これらの基本課題を達成するための目標とされるプラズマ性能で言えば、概ね6-7割目に来ている。表1に代表的な達成値をまとめる。これまでの研究成果については、国立大学法人評価委員会による評価での「イオン温度、密度、放電時間など核融合炉実現のために重要な諸パラメータの顕著な改善が得られ、核融合エネルギー開発を先

表1 主だったプラズマ性能の達成値(同時達成ではなく個別達成)。

緒元	達成値	備考
中心イオン温度	5.6 keV	電子密度 $1.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
中心電子温度	20 keV	電子密度 $2.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
中心電子密度	$1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	電子温度 0.25 keV
体積平均ベータ	5.1%	磁場強度 0.425 T
定常運転	13分20秒	加熱電力 1 MW
	31分45秒	加熱電力 0.7 MW
	54分28秒	加熱電力 0.5 MW

議では運転計画を基盤 (図1 参照) として、これらの実験テーマが有効かつ効率的に実施できるよう、実験サイクルレベルから、半日単位以下までのテーマグループへのマシンタイム配分までを明らかとした実験計画を、テーマグループリーダーとの議論の上、決める。現場での実験はマシンタイムの配分内で担当するテーマグループが原則的に裁量できるものとしている。

LHDでは、遠隔地からの実験参加を可能とする手立ても講じている。スーパーSINETを用いて、データへのアクセス環境がLHDの制御室と同等な拠点が、これまで九州大学、京都大学、名古屋大学、広島大学、東京工業大学、東京大学、東北大学、筑波大学等に設けられている[5]。また、双方向の環境を整備するため、多地点中継が可能なTV会議システムを導入し、制御室の情報だけではなく、いろいろな研究打ち合せ等にも利用している。制御室の音声と画像や実験放電条件・実験条件記録等の情報はLHD実験LANを介しても配信しており、スーパーSINET環境を持たない共同研究者にも一方向ではあるが、実時間の実験情報の提供等を行っている。データへのアクセスもトークンとVPNを利用して、ユーザ登録者にはセキュリティを確保しつつ、所内と同じ環境となるように配慮している。また、共同研究成果についての論文等への研究発表は、事前登録、LHD合同会合等での事前発表、LHD実験会議における投稿承認を経ることを義務づけており、一連の手続きが容易かつ迅速となるようWebによる仕組みが整備されている。

3. 装置整備とプラズマ性能の拡大

LHDではディスラプションのない無電流定常プラズマの特長を活かしつつ、プラズマ性能の拡大が順調に図られてきている。ここでは、装置本体および加熱設備などの各々の要素について信頼性に優れ、かつ十分な尤度を持ったハードウェアを整備するとともに、これらを最大限に物理実験に統合利用していく物理の理解が重要である。図2に実験開始以来の代表的な装置性能である磁場と加熱入力パワーの推移を示す。超伝導コイルによって約3Tの磁場が定常に実験に供され、加熱では主力となる中性粒子入射加熱(NBI)が29MWまで整備されてきている。

NBIは図3に示すように、負イオン源を用いた180keVの加速電圧を有する接線入射が3基、正イオン源を用いた40-60keVで運転される垂直入射が2基の構成となっている[6]。電子サイクロトロン加熱(ECH)は3本の77GHzジャイロトロンを中心として約4MWの加熱電力を持ち、局所加熱や変調加熱によって特徴ある実験を可能としている[7,8]。イオンサイクロトロン加熱(ICH)[9]は定常運転に優れており、さらに性能を向上させるためのアンテナ改造を待って、平成22(2010)年より3年ぶりに実験を再開した。

他に、本体の基幹機能として粒子排気と供給があげられる。ヘリオトロン磁場配位は、ポロイダル断面でトカマクのダブルヌルに似た4本のダイバータレッグを本来的に有している。このヘリカルダイバータは現在、いわゆるオー

ブンダイバータ配位であり、これを閉構造化することが平成23年(2011)年度以降に計画されている。一方、外部から共鳴磁場摂動(Resonant Magnetic Perturbation: RMP)を印加し、磁気島を発生させ、この磁気島をセパトロリックスとして利用するダイバータ概念がLocal Island Divertor(LID)である[10]。LIDによる高効率の排気によって、後述する内部拡散障壁(Internal Diffusion Barrier: IDB)による超高密度プラズマ状態が発見された[11]。LHDの回転変換は真空磁場でおしなべて中心が1/3強であり、周辺が1.5程度であることから、コア部に $m/n=2/1$ 、周辺部に1/1の共鳴面を持つ。RMPコイル(LIDコイル)は主として $m/n=1/1$ の共鳴磁場を発生させ、プラズマ周辺部に磁気島を発生させる。このLIDコイルはダイバータ実験に限ら

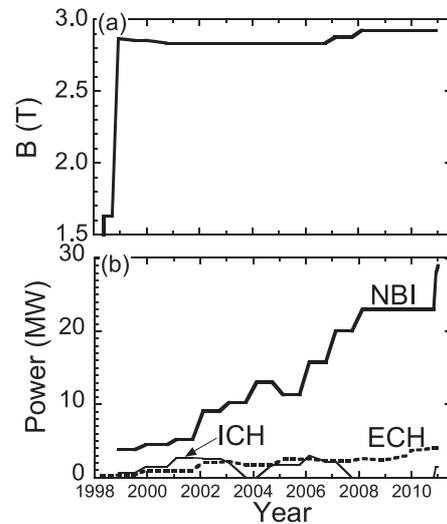


図2 LHDの実験開始以来の装置性能の経緯。(a)閉じ込め磁場強度、(b)加熱電力、NBI(中性粒子ビーム入射)、ICH(イオンサイクロトロン共鳴加熱)、ECH(電子サイクロトロン共鳴加熱)。

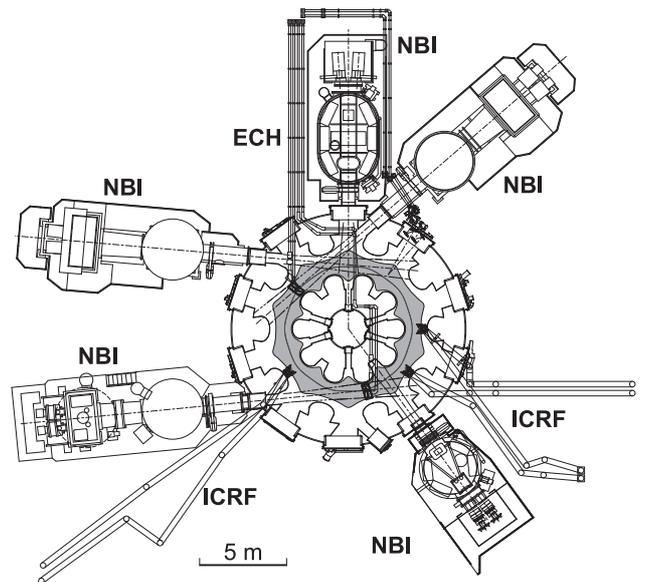


図3 LHDの本体と加熱装置の平面配置図。中心のハッチした円環がプラズマ。

ず、磁気島生成や磁力線の統計化（ストキャスティック化）を通じて、非常に多様な実験研究の展開をもたらしている。また、IDBの発見には、固体水素ペレット入射による高効率燃料供給も決定的な貢献をした。LHDでは固体水素ペレット入射のために、20発のパイプガン方式装置と、入射個数に制限がなく10 Hz程度の繰り返しが可能な射出成型方式の連続ペレット入射装置が常時稼働[12]している。

これらの装置性能と同じ時系列で、図4に代表的なパラメータをあげてプラズマ性能の拡大を示す。ここでは、全体として順調な進展の中でも、急激な性能拡大の時期があることがわかる。つまり、ここに技術的なブレークスルーと新たな物理の発見を相乗的に作用させる重要性が指摘できる。

特に、最近の展開として、内部拡散障壁をもった超高密度コアプラズマ[13,14]と、不純物を自動的に排出する機構を有した閉じ込め改善による高イオン温度[15,16]の二つがあげられる。これらについては3章で詳しく述べる。

LHDが採用しているヘリオトロン磁場配位では磁気丘を伴っている。プラズマコア部はプラズマ圧力によるシャフラノフシフトによって自発的に磁気井戸となること、磁気丘が残る周辺部については強い磁気シアによって交換型不安定性を安定化する概念となっている。交換型不安定性が線形不安定であってもプラズマへの影響は軽微なものにとどまる理解[17]が運転シナリオに反映され[18]、磁場強度0.425 Tにおいて炉条件に求められるベータ値5%を達成した[19]。さらにこの5%近傍の高ベータ状態は図5に示すようにエネルギー閉じ込め時間の100倍程度まで保持できており、この保持時間およびベータ値はプラズマの安定性などの物理過程ではなく、NBI加熱の装置能力によって制限されている。平成20年(2008年)度より、ポロイダルコイル電源にパルス電源を追加し、磁場0.5 T時には1.4秒間で磁気軸を10 cmシフトさせることができるように

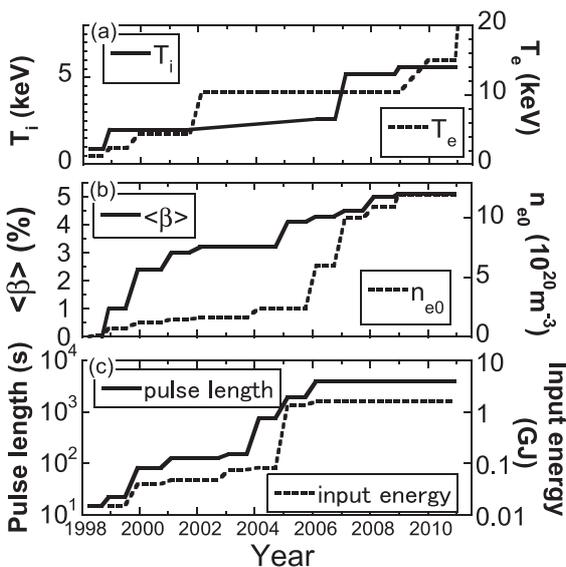


図4 LHDの実験開始以来のプラズマ性能の進展。(a)中心イオン温度 T_i と中心電子温度 T_e , (b)体積平均ベータ $\langle\beta\rangle$ と中心電子密度 n_{e0} , (c)定常放電パルス幅と注入加熱エネルギー。

なった。LHDにおいて磁気軸位置がMHD平衡・安定性と閉じ込めの鍵となっていることは広く論ぜられているところである[20]。このパルス電源を用いることによって、プラズマ放電中に磁気軸を移行させ、ベータ値を制限する機構について詳しく調べられるようになった。すなわち、大きく磁気軸を内寄せにしたり、アスペクト比を大きくした場合は、理想交換型不安定性が大きく成長し、その共鳴領域での圧力勾配を広い範囲で平坦化したり、局所的な緩和現象を引き起こしたりすることによってベータ値が制限される。また、逆に磁気軸を外寄せにしたり、アスペクト比を小さくしたりすると、高速イオンの軌道のずれによる加熱効率の劣化や異常輸送の増大によって閉じ込め性能が劣化することがベータ値の制限につながる。これらの中間領域では理想交換型不安定性が安定であっても、周辺部では抵抗性交換型不安定性が不安定となり、これが輸送を増大させ、ベータ値の制限につながっているものと考えられる。このように、ベータ値をさらに上げうる磁場配位はほぼ定まってきている。抵抗性交換型不安定性の影響を抑えるためには磁気レイノルズ数を高めることが有効であることが、磁気揺動強度が磁気レイノルズ数とともに減少することの観測や理論予測から示唆されており、このための高温化を課題とした高ベータ実験への取り組みが強化されつつある。

閉じ込め物理における径電場の重要性は広く指摘されているところである。ヘリカル系ではプラズマの回転とともに、ヘリカルリップルの存在による新古典拡散の非両極性によっても径電場が形成される。このヘリカル系に特有な径電場による閉じ込め改善モード（コア電子ルート閉じ込め（Core Electron-Root Confinement: CERC）[21]によって、ごく最近、20 keVの中心電子温度を実現した。ここで、注意すべきことは、電子温度の勾配と釣り合った正の径電場の発展は重イオンビームプローブ（Heavy Ion Beam Probe: HIBP）[22]によって新古典拡散とよく一致することが確かめられている一方、閉じ込めの改善は新古典拡散の抑制だけでなく異常輸送の抑制が決定していることである。また、この改善は有理面の位置と必ずしも相関してお

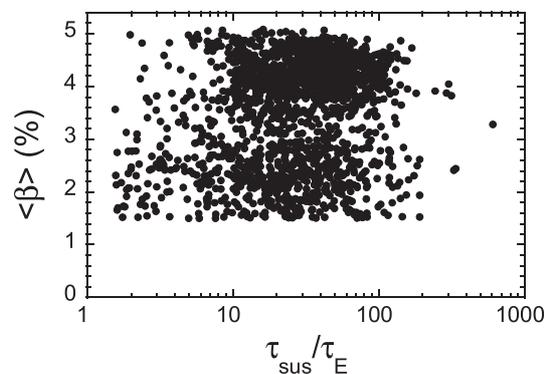


図5 縦軸に体積平均ベータ、横軸にエネルギー閉じ込め時間で規格化した維持時間で表したLHDの達成運転領域。参考文献[17]より転載。

らず、その相関が指摘されているトカマクにおける内部輸送障壁 (Internal Transport Barrier: ITB) との包括的な理解に注視している。

4. 新たな発見

4.1 内部拡散障壁による超高密度プラズマ

放射崩壊をもたらす 100 eV 程度の周辺プラズマの密度 [23] を強力な粒子排気によって下げ、中心部に固体水素ペレットによってプラズマ燃料を直接供給すると、2.5 T 程度の磁場で中心密度が $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ を超える超高密度プラズマが生成できることがわかった。この現象は、LID [10] を用いた高効率粒子排気実験時に発見され [11]、その後、周辺中性粒子密度が抑制できる磁場配位では LID を用いずとも再現できることが明らかとなった [13]。

ガスパフによって同じ線平均密度を持つプラズマとの比較を図 6 に示す。プラズマコア部に IDB を示す急峻な密度勾配が形成され、この超高密度コア (Super-Dense Core: SDC) 内での粒子の拡散係数は $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下に抑えられている。プラズマ性能の最大値として、2.5 T の磁場強度で中心密度は $1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、中心圧力は 1.5 気圧を、1.5 T の磁場強度では中心ベータ値 10% を記録している。

また、この時の SDC 内の電子温度は、高い密度にも関わらず、ガスパフ時よりも高く、顕著な閉じ込め改善を示唆している。一方、SDC はマントルと呼ぶ比較的低い密度を外部に持ち、温度勾配はこのマントル部に見られる。

衝突頻度で言えば、低温・高密度の衝突頻度が高い領域

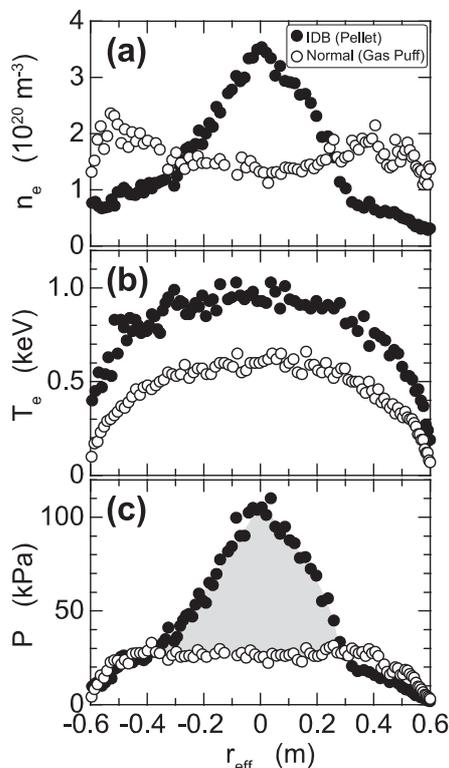


図 6 内部拡散障壁 (IDB) を伴うプラズマ (黒丸) と同じ線平均密度を持つガスパフによる高密度プラズマ (白丸) の分布の比較。(a) 電子密度、(b) 電子温度、(c) プラズマ圧力。負の小半径は磁気軸に対してトラス内側を示す。

だけでなく、 $1/\nu$ 領域に近いプラトー領域においてもこの特徴ある分布構造が形成されることが確かめられている。また、周辺部の制御に LID コイルにより RMP を印加すると、粒子の吐き出しが増長され、マントル部の密度が下がって、SDC 領域が広がることや、この粒子吐き出しはダイバータ部での密度を逆に増やし、SDC の状態とプラズマデタッチメントが安定して両立できることもわかった。デタッチメントについては 4.4 節に詳述する。

固体水素ペレット入射による密度の帰還制御を行うことによって、最長 4 秒間、エネルギー閉じ込め時間の 35 倍程度の間、中心密度が $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度の IDB による SDC 状態を保持できることを実証した。この間、 Z_{eff} には顕著な増加は見られず、不純物の蓄積は問題となっていない。荷電交換分光によるポロイダル回転から電場を推定する方法は必要とされる NBI の侵入長が SDC 内部まで及ばないため、直接の電場測定はできていないが、測定可能なマントル部からの傾向として負電場が示唆されており、また、電場に関しては実験と良い一致を示す新古典拡散理論からも負電場が予測されている。この高密度プラズマが負電場であっても、コア部での不純物イオンの蓄積が起こらない理由の同定については今後の研究を待たねばならないが、5.2 節で後述する LHD プラズマに特徴的な周辺エルゴディック層による不純物流入の遮蔽効果がこの運転の背景にあることは確かである。

現在の LHD ではダイバータ部に排気設備を有していないことに留意願いたい。現在の SDC の準定常保持の場合は NBI の設備能力によって時間が制限されているが、放電後期にはマントル部の密度上昇、周辺中性粒子圧力の上昇、閉じ込めのゆっくりとした劣化が観測されており、さらなるパルス幅の伸長や良好な閉じ込めの維持には能動的な排気制御による周辺中性粒子の抑制が必要であることが明らかである。

この超高密度運転の上限を規定する機構は、一つには周辺部の冷却に起因する放射崩壊 (radiation collapse)、二つには密度が非常に高い SDC 内を直接加熱する術が今ないことから、固体水素ペレット溶発に必要な温度を保てなくなること、そして、コア密度崩壊 (Core Density Collapse: CDC) [13] と呼んでいる現象である。この CDC は 1 ミリ秒以下の時間スケールで SDC 内の粒子の半分までが吐き出される現象である。SDC 内はもともと温度分布が平坦なので、温度の変化はないが、プラズマの圧力も半分になる。時間スケールから MHD 不安定性によることが示唆され、周辺部で発生したバレーニングモードによる緩和崩壊がコアへと伝播する物理描像に合致した理論的考察 [24] と実験観測 [25] が確かめられつつある。CDC はシャフラノフシフトを抑える縦長断面変形や周辺での圧力勾配を下げる調整によって回避できることがわかっている。

この IDB を伴う SDC プラズマの閉じ込め改善モードの機構については、密度が非常に高いために、電場、回転変換、イオン温度などについて現在の計測が適用できないことや、SDC 内を加熱することができないことなどから、まだ体系的な説明が十分とは言えない。しかしながら、この

運転を炉条件まで外挿できれば、10 keV 以下の低い温度領域においても燃焼運転を見込むことができ、ダイバータ熱負荷などの工学的要求を軽減できる可能性がある[26]。核融合炉としてこの温度領域は一般に熱的に不安定であるとされているが、帰還制御[27]による方法の原理実証や、温度上昇によって増大する輸送が調整に働くことを閉じ込め特性の理解から予測できるかなどを明らかにしていく必要がある。この他にも、MHD 平衡と磁力線の乱れの課題がある。磁気面の存在を仮定しない3次元 MHD 平衡コード HINT によると、非常に大きなシャフラノフシフトによってマントル部では磁力線が統計的に乱れた状態になることが予測されている[28]。一方、このマントル部では有意な温度勾配が存在しており、輸送と MHD 平衡の矛盾のない説明を精密に辿ることができるよう研究を行っていく必要がある。

4.2 内部輸送障壁による高イオン温度プラズマ

LHD では主力となる NBI 計画が当初から接線入射であったことから、十分な侵入長を確保するため高い加速電圧 (180 keV) を必要とし、このことから、主たる加熱は電子が対象となっていた。ヘリカルリップルによって無衝突領域では新古典拡散が増大するという懸念に対して、捕捉粒子の軌道が磁気面とずれない磁場配位 (いわゆる磁気軸内寄せ配位)[29]をとるにより解答が与えられ、特に、イオンサイクロトロン共鳴加熱 (ICH) 実験の進展により、2.5 MeV におよぶ高速イオンの閉じ込めが確認できた[30] (図7参照)。これらの成果の基づいて低い加速エネルギー (40-60 keV) を持つ垂直入射 NBI を導入し、イオンへの加熱効率を高めた実験を進めている。

図8に典型的な高イオン温度プラズマの分布を示す。イオン温度は尖塔化しているが、電子温度はイオン温度よりも低く、より幅広い分布となっている。この時、コア部でのイオンの熱輸送は新古典拡散の予測値近くまで低減しており、異常輸送が抑制された閉じ込め改善状態にある。この状態では、コア部の温度勾配が加熱入力に強く相関して増加することに対して、周辺部では加熱入力を増大させても温度勾配が増加しない。したがって、コア部と周辺部の間にイオン系の ITB が形成されていることを示している。トカマクでは、この ITB によるイオン温度勾配は R/L_{Ti} にして数十にもなるが、その輸送障壁の幅は狭い。一方、LHD では温度勾配は同じく15程度までにとどまるが、幅が広いという差異がある。LHD の ITB はトカマクに比べると際立った断熱特性を示すわけではないが、かえって著しい温度勾配 (圧力勾配) によって不安定性を招くこともない。また、LHD の ITB 形成には、初期条件として電子温度をイオン温度と同程度までに抑えることが必要条件であることがわかってきた。電子温度がイオン温度よりも有意に高い状況では、垂直 NBI によってイオンを加熱してもこのような高いイオン温度を得ることができない。これら ITB 特性のトカマクとの異同についての議論を進めている[31]。

この高イオン温度プラズマでは非常に興味深い輸送現象が二つ顕著に見られている。一つは不純物ホールと呼ばれ

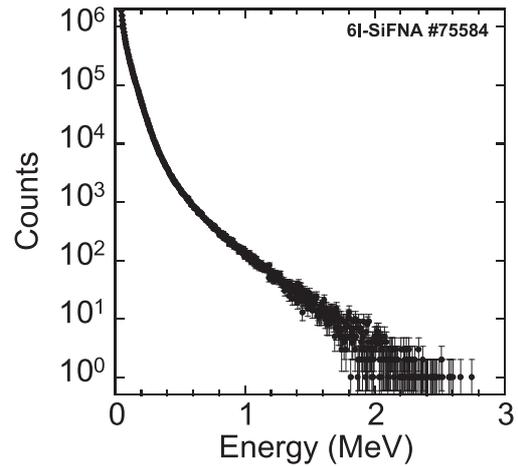


図7 イオンサイクロトロン共鳴加熱時に観測された高エネルギーイオンスペクトル。

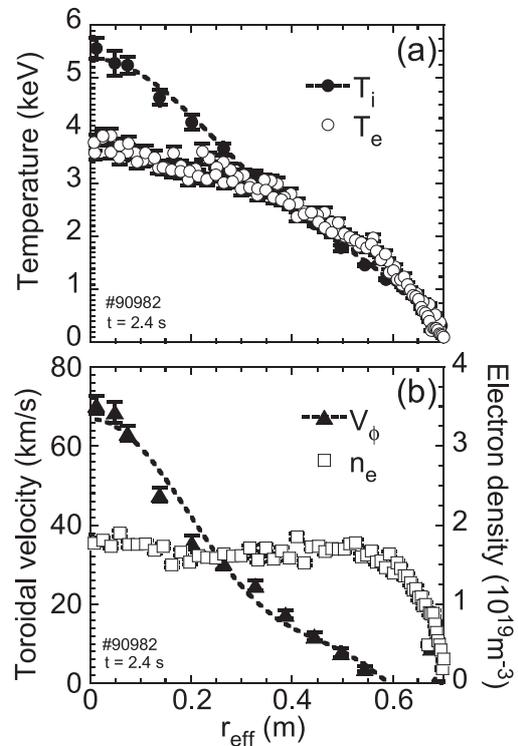


図8 典型的な高イオン温度プラズマの分布。(a)イオン温度 (黒丸)と電子温度 (白丸)、(b)トロイダル回転 (三角)と電子密度 (四角)。 r_{eff} は実効小半径。

る不純物がコア部から自動的に排出される現象であり、もう一つはプラズマのトロイダル方向の自発回転である。いずれの現象も輸送行列の非対角項が本質的な役割を果たしている。

上記の知見に沿って、垂直 NBI による加熱の初期状態で、できる限りイオン温度を電子温度に近づけるため、また高いエネルギーを持った接線 NBI の吸収パワーを低密度で増加させるため、炭素ペレット入射を行うことが運転上有効である。炭素ペレット入射を行わない水素のみの放電でも ITB の形成は確認されているが、結果として現在のところ炭素ペレット入射をした場合に比べて達成される中心イオン温度は低い。さて、この意図的に入射された炭素が

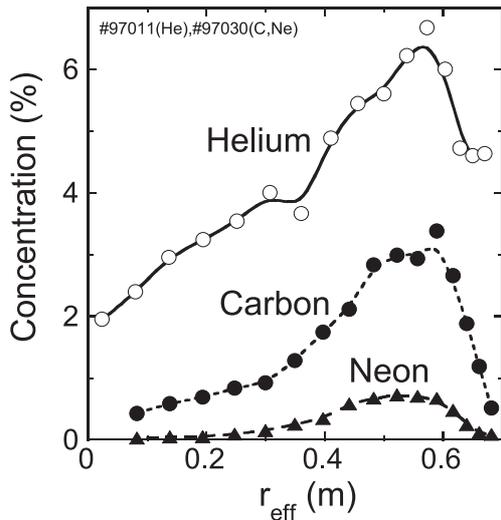


図9 高イオン温度プラズマ中の不純物（ヘリウム，炭素，ネオン）濃度の分布。 r_{eff} は実効小半径。

イオン温度の上昇とともにコア部から排出されることが明らかとなった。密度分布は図8(b)に示すように平坦であるが、不純物の分布は極端な凹型となる。炭素以外の不純物についても、意図的にガスパフなどで注入した実験によって排出が確認された(図9参照)。いずれの場合も初期状態では濃度として数%から数十%であるにも関わらず、イオン温度が高い状況では、図9に示すように、不純物は極めて低い濃度となり、プラズマの純度は高い。不純物ホールの原因となる機構については未解明であるが、特性が定量的にも同定されてきており、重要な点を4つ指摘しておく。(1)コア部はイオンルートにあり、負の径電場が形成されている。このため、新古典拡散理論からは内向きの対流が予測されるが、実際は外向きの対流が不純物ホールをもたらしている。(2)外向きの対流は輸送行列では非対角項となる温度勾配とともに増大する。(3)新古典拡散理論による実効的ヘリカルリップルが大きいほど外向き対流が大きくなるという明確な相関がある。(4)外向き対流はイオン種の質量が大きいほど大きくなる。

次がトロイダル回転である。LHDの接線NBI3基は図3に示すように向きが異なっており、閉じ込め磁場の向きによって順方向(NBI駆動電流が回転変換を増やす向き)と逆方向(逆に減らす向き)に偏りが生じる。図8(b)では順方向NBIが支配的な場合で、尖塔化した順方向のトロイダル流が認められる。一方、逆方向NBIが支配的な場合は、コア部では接線NBIからのトルク注入によって逆方向に回転するが、図8(b)をひっくり返したような対称の形にならず、コア部の逆方向回転速度はより遅く、コアから周辺部にかけては流れが逆転し、順方向となる。この非対称性は順方向の自発回転があることを示しており、その自発回転の大きさはイオン温度勾配と相関している。このように、不純物輸送とともに運動量輸送においても非対角項の現れを見て取ることができる。

平成22年(2010年)度の実験では、垂直NBIの整備により加熱電力を増加させた実験を進めており、運転領域の拡大

とともに異常輸送の抑制をもたらす物理機構の解明が、熱輸送だけでなく、磁場閉じ込めプラズマの特徴である多様な輸送の連関という物理描像の中で進むものと期待される。

4.3 拡散輸送から逸脱した非局所輸送について

輸送というものを考える場合、プラズマでは温度、粒子、そして運動量が代表的であり、単純な拡散の場合は

$$\begin{aligned} Q/n &= -\chi \nabla T \\ \Gamma &= -D \nabla n \\ P/n_i m_i &= -\mu \nabla V \end{aligned}$$

によって表される。ここで、 Q 、 Γ 、 P はそれぞれ熱流束、粒子束、運動量束であり、 $n(n_i)$ は(イオン)密度、 T は温度、 m_i はイオン質量、 V は流速、そして χ 、 D 、 μ はそれぞれ熱輸送係数、粒子輸送係数、運動量輸送係数である。

この輸送係数はそれぞれの物理量の関数であることが一般的であるが、さらに、その勾配の関数となる場合があることが知られている。例えば、 $\chi = \chi(T, \nabla T)$ や $D = D(n, \nabla n)$ である。これによって流束と勾配で表される熱力学的力の関係が非線形となり、トカマクのLモードで見られる分布のスティフネス(加熱電力を増加させても、温度勾配が変化しないなど)を説明することにしばしば用いられる。

さらに、プラズマの非線形性の現れの一つとして、非拡散項が働く。異なった物理量間の輸送に相関が生じ、空間対称性の破れによってHモードやITBなどの特異な構造形成につながっていると考えられている。特に、非拡散項の影響は粒子輸送と運動量輸送に顕著であり、方程式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \Gamma &= -D(n, \nabla n) \nabla n + D^N(n/T) \nabla T + \dots \\ P/n_i m_i &= -\mu(\nabla E) \nabla V + \mu^N(V/T) \nabla T + \dots \end{aligned}$$

非拡散項は輸送方程式を行列で表すと、非対角項(輸送係数の上付き N は非対角項であることを表す)となり、粒子輸送では粒子のピンチ、運動量では自発回転として観測されることは前節で述べた。

ここまでは、局所的な勾配が局所的な流束を生む拡散の局所論の域にあるが、プラズマが遠く離れた現象によって瞬時に応答する、拡散的描像では描くことができない長距離相関あるいは非局所輸送と呼ばれる現象があり、LHDでも研究が進められている。輸送方程式へのモデル化で言えば、次の例に示すように積分項の導入・考察が図られている。

$$\Gamma = -D(n, \nabla n) \nabla n + D^N(n/T) \nabla T + \int f(n, \nabla n, \nabla T, \dots) dr + \dots$$

LHDにおいて微小な不純物ペレットを入射し、プラズマ周辺部を冷却した場合の応答が数年前より調べられてきている。この場合、周辺の冷却が拡散的にコア部へ伝播(コールドパルス)するのではなく、周辺の冷却がトリガーとなってコア部で逆に温度が上昇しだすことがしばしば観測されてきた。これらの応答を定量的に評価していくために、確率分布関数の考えを導入している。これは、プラズ

マが取る局所的な温度勾配の値を確率的に示そうとするものである。例えば上記のような摂動をプラズマに加えた際、その後の応答の結果、ある温度勾配をプラズマが取った時間で与えることができる。定常状態では、もちろん温度勾配は一定値を取ることで、確率分布関数はその一定値だけに鋭いピークを持つことになる。過渡応答では、もし最も単純な局所的拡散が支配すれば、もとに戻ることで、もとの値をユニークなピークとした広がった分布になる。しかし、非局所輸送が現れるような状況では、この分布関数は複数のピークがあるような複雑な形を取る[32]。これはプラズマが取りえる状態が一意ではないことを示している。このように過渡応答を調べることによって、一見定常に見えるプラズマであっても、その分布構造に内在して隠れている機構を現出させ、その分布の安定性などに定量的な考察を進めることができる。今後、ITBなどの閉じ込め改善状態の制御研究に発展していくことが期待される。

これらの非局所輸送にはメソスケールのMHD不安定性や乱流構造が介在しているものと考えられる。微視的な不安定性はこのメソスケールのパターンによって変調を受けるので、異なった場所での微視的不安定性の揺動の相関を調べることによって、メソスケール構造を可視化できる可能性がある。例えば、電子サイクロトロン輻射(ECE)測定による電子温度揺動で微視的不安定性と考えられるものに注目し、径方向についての相関を調べると、通常の拡散的伝播を遥かに越えた1 km/sもの速さをもったコア部から周辺部への伝播が認められる場合がある。さらにこの電子温度揺動と異なったトロイダル位置でのマイクロ波反射計や磁気プローブとの相関を取ることによって、この非拡散的伝播がスパイラル構造を持っていることも同定できている[33]。

4.4 共鳴磁場を用いたデタッチメントの安定保持

ヘリカルヘリオトロン磁場は、閉じた磁気面構造とダイバータレッグの間に壁への連結長が数 kmにも及ぶ統計的磁場構造を持った層(エルゴディック層)がある。磁気軸位置を外寄せにしていくと周辺の回転変換が下がり、 $m/n = 1/1$ の共鳴が、このエルゴディック層中に位置するようになる。この磁場配位にLIDコイルを用いてRMPを印加すると、エルゴディック層中に磁気面を成してはいないが一定の磁気島構造が残留した状態が共存するようになる。この条件が、放射損失が支配的なプラズマの生成を安定化させ、コアプラズマ性能を損ねることのない安定なダイバータデタッチメントをもたらすことがわかった[34](図10参照)。この場合、ダイバータへの熱・粒子束はアタッチの状態に比べて1/10まで減少する。赤外カメラを用いた放射損失のイメージング計測から、残留磁気島のX点近傍で選択的な冷却が起り、局所的に放射損失が増大すること、デタッチメントを起こしている間、この最外殻磁気面の外での放射が安定化されていることが明らかとなった[35]。さらに真空紫外分光計測から、デタッチメント時においても高Z金属不純物の顕著な増加は観測されておらず、コアプラズマへの不純物混入が抑制されていることを示している。

このエルゴディック層における周辺プラズマの振る舞い

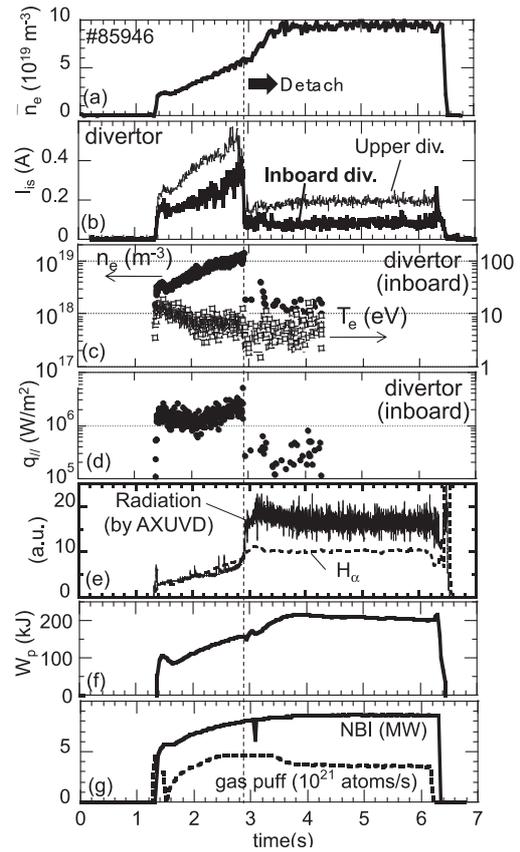


図10 RMP印加によるダイバータデタッチメントの安定保持を実証したプラズマの放電波形。(a)線平均電子密度、(b)ダイバータ板上のイオン飽和電流、(c)ダイバータ部の電子密度(左軸)と電子温度(右軸)、(d)ダイバータへの熱流束、(e)放射損失(実線)とH α 光(破線)、(f)蓄積エネルギー、(g)NBI加熱パワー(実線)とガスパフ量(破線)。参照文献[33]より転載。

は不純物や中性粒子を含めて、EMC3[36]-EIRENE[37]コードによって3次元の幾何学形状の元で解析することができ、上記の実験観測を正確に再現することに成功している。

この発見は、周辺磁場構造によってダイバータデタッチメントを制御できることを示唆しており、ヘリカル系プラズマだけでなくRMPを用いたトカマクにおける先進的なダイバータ設計に貢献するものと期待される。

5. 現象の間にある相関関係および因果関係の同定を通じて法則化へ

様々なプラズマ現象においてその原因となる物理機構を解明するため、現象を体系的にとらえようとするアプローチをすでいくつか読み取っていただけたと思うが、この章で整理してみたい。核融合プラズマは非線形性に富んだ非平衡開放系であり、定常的に見える状態であっても、時間および空間スケールの大きく異なった物理現象が内在し、それらが自己組織化することによって特異な構造を作り、維持している。これらの因果関係を理解することは、例えばITERにおける核融合燃焼プラズマの実証というような具体的な目標への道程を短縮することにもつながり、ひいては核融合エネルギーの早期実現に決定的な貢献をす

るものとなる。ヘリカル系プラズマとトカマクの異同の考察は、ある範囲では自明であっても狭量な理解の本当の有効性を相補的に問い直すことにつながり、科学的予言性能の格段の進化をもたらすものである。トカマクにおいても有限個のトロイダルコイルによるトロイダル磁場リップルや磁性ブランケット、そして ELM 制御のための共鳴磁場などにより 3 次元で物理を精密に議論することが不可欠となっている。例として、図11に 3 次元 MHD 平衡コードで求められた ITER の磁気面と磁気面状での磁場強度分布を示す。有限の個数のトロイダルコイルとテストブランケットモジュールによって軸対称性が破れていることがわかる。このようなことから、トロイダルプラズマの総合的理解を深めるという重要課題の今日的意義は益々強まっている。

このためには、まず精密な計測による観測を通じて、精度の高い相関関係の同定から因果関係の確認へと実験によって確証していくことと、その論理を記述する理論的に精密な物理モデルが必要である。図12にプラズマ中の分布構造を決定する輸送機構の関係を記述する試みを示す。点線で示された関係はヘリカル系に特有の 3 次元性に起因する電子とイオンの非両極性拡散が生む径電場の役割を示している[38]。LHD では、これまでに非常に高い空間・時間分解能を持った分布計測の充実がはかられ[39]、これら



図11 3次元MHD平衡コードで計算されたITERの最外殻磁気面と磁気面上の磁場強度。

の 3 次元の MHD 平衡の磁気面関数へのマッピングデータが常時得られるようになっており、物理モデルの精度を高め努力を続けている。理論においては、磁気面を仮定しない 3 次元 MHD 平衡コード HINT の実験への直接適用が図られる一方、精密な実験によってさらなるコードの高度化の必要性が喚起されている。また、帯状流についても、より線形不安定な磁気軸内寄せ配位において、その乱流がより大きな帯状流を作るために、かえって熱輸送が抑えられることが、世界最高精度のプラズマシミュレーション[40]によって示されている。

以下に、現象の間にある相関関係および因果関係の同定を通じて法則化へ、というアプローチの例として 3 次元磁場に注目した二つの研究課題と高エネルギー粒子が駆動する不安定性に関わる課題を紹介する。

5.1 コア部における磁気島の発生・消滅と統計的磁力線構造への遷移

ヘリカル系では閉じ込め真空磁場を可視化して観測することができ、LHD でも外部から RMP を印加すると、計算通りに磁気島が発生することが確認できている。しかしながら、プラズマはこの真空磁場を自己調整し、磁場の幾何学構造を変えることも LHD で明らかとされている[41]。

最近の研究では、この磁気島の発生と消滅に関して、ポロイダル流との相関が明らかにならつつある。RMP を印加した状態で、プラズマの衝突頻度を保ったまま、ベータ値を高めていくと磁気島を示す電子温度の平坦部が解消され、勾配を持つようになる。この過程において、磁気島外側での電子反磁性方向の回転が加速されることに伴って磁気島が消滅することが確認され、また、逆に磁気島が消滅している状態から発生する状況では、この回転が抑制されるという相関がみられた。さらに、磁気島を消滅あるいは発生・拡大させるためにプラズマが自ら対応する共鳴磁場を作ることが観測されており、この共鳴磁場も磁気島消滅時には電子反磁性方向に回転しながら位相を反転させることがわかった。

磁気島は低次の共鳴面で顕著にみられる。前述したように LHD の磁場配位はコア部に $m/n=2/1$ 、周辺部に $1/1$ の共鳴面を持つ。さて、LHD では接線 NBI によってトロイダル電流を 150 kA 程度流すことができる。最外殻の回転変換は等価電流にして 1 MA 程度であるので、大きくは変化

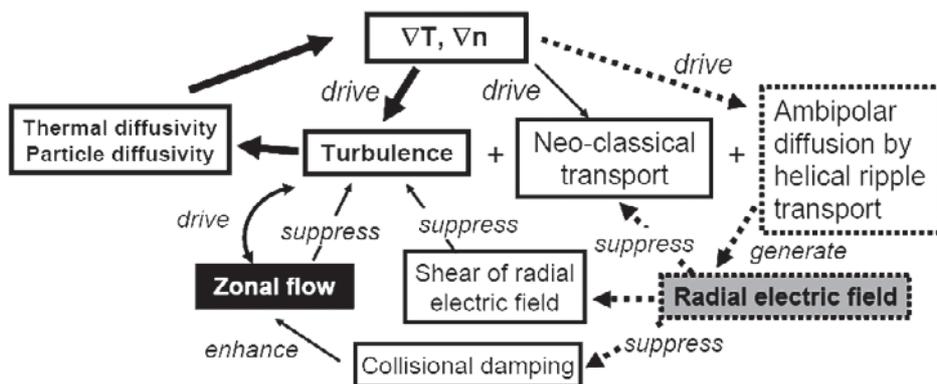


図12 トロイダルプラズマにおける輸送の連関についてのダイアグラム。点線はヘリカル系の特有のものを表す。参考文献[4]より転載。

できないが、コア部の回転変換はかなり大きく変化させることができる。これによって共鳴磁気面の有無やその場所での磁気シアを制御した実験が可能である。 $m/n=2/1$ 共鳴近傍の磁気シアを弱めると、電子温度分布に大きな平坦部が生ずる場合があることがわかった。温度勾配が失われるが、これは熱輸送係数が極端に大きくなったことよりも、磁気島が発生したと考える方が妥当である。さらには、磁力線が統計的（ストキャステック）になった可能性もある。これらを区別するために、中心加熱となるECHに変調をかけ、その熱パルスの伝播をECE測定から解析した。温度勾配がある状況では、熱パルスは拡散的に伝わる。一方、温度勾配がない状況では、平坦部外縁がすぐ応答し、中心と平坦部外縁から熱パルスを印加したようにその中間領域へと熱パルスが拡散的に伝播する場合[42]と、熱パルスに時間遅れがなく、中心から平坦部の外縁まで一度に伝播する場合があることがわかった。後者は前者よりも磁気シアが少しあるという相関も明らかとなった。この実験結果は、前者は磁気島があり、磁気島内では閉じた磁気面によって拡散的に熱が伝播すること、後者は磁力線が統計的になっていることの証左となっている。この研究手法はプラズマ周辺部にも応用され、磁力線構造の同定の決定的な手段として確立されつつある。

5.2 周辺の統計的磁力線構造がもたらす不純物遮蔽

前述したように、ヘリカルヘリオトロン磁場は、閉じた入れ子状の磁気面構造の外に壁への連結長が数 km にも及ぶ統計的磁場構造を持った層（エルゴディック層）があり、この層の最終的な最下流として、4本のダイバータレッグによって壁（ダイバータ板）へとつながる、という構造を本来的に有している。このエルゴディック層では磁気島構造が折りたたまれ、重畳し、開いた磁力線とは言え、連結長が長いために磁力線に垂直方向の輸送が有意となる状況となっている[43]。図13に磁力線の壁への結合長をポロイダル断面とスラブ上に開いた断面で示す。

ダイバータで発生した不純物の振る舞いは簡単には、上

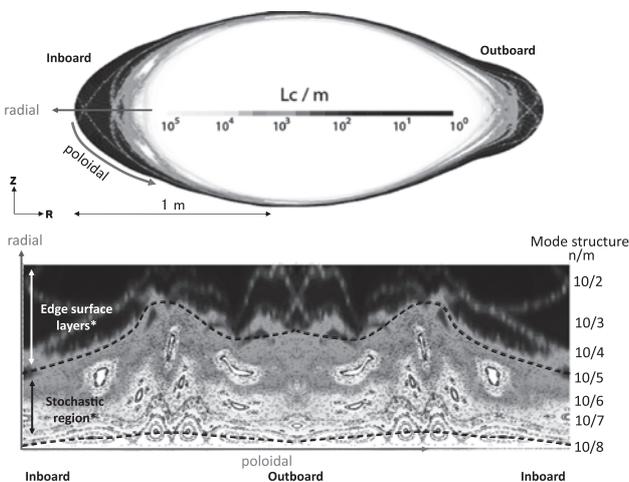


図13 LHDの最外殻磁気面の外側を取り巻くエルゴディック層における磁力線の連結長分布。上はポロイダル断面、下は縦軸小半径方向、横軸ポロイダル角上に展開。参考文献[43]より転載。

流からの粒子の流れとの摩擦によるダイバータへ向かう力と、温度勾配によるコアプラズマに向かう熱力学的力のバランスで決まると考えられる。短い磁力線を介した垂直方向の粒子損失はリサイクリングを促進し、結果として電離による粒子源が増えることによりダイバータ部へ向かう粒子の流れを加速させる。このため衝突頻度が上がる高密度時には不純物はこの粒子の流れとの間の摩擦力によってダイバータ部に押し戻される。また、密度の上昇とともに残留磁気島内で垂直方向の熱流束が増加し、磁力線に平行方向の熱流束を補う働きがある。この働きは平行方向の温度勾配力を減少させる。この二つの効果によって、高密度プラズマでは、不純物イオンはダイバータ面近傍に留められ、コアプラズマから遮蔽されることになる。

図14にEMC3-EIRENEコードによって計算された周辺エルゴディック層での不純物の分布をダイバータ板前面の密度で規格化したものを示す。いずれの不純物においても、密度が高まるとコアへの流入が遮蔽されることが示され、多価になるイオンほど、イオン化がダイバータのより近傍で起こるため、その効果は強い。実際の観測においてもこの予測と合致する不純物の挙動が確認されている[44]。前述した、IDBを伴う超高密度プラズマでは負電場にも関わらず不純物汚染の問題が露わになってこない主要な理由として、このエルゴディック層での不純物遮蔽効果があげられる。

5.3 高速イオン励起の測地的音響モード(GAM)の特性理解

高速イオンが起こすアルフベン固有(Alfvén Eigen:AE)モードについて、LHDでも研究が進められ[45]、磁場配

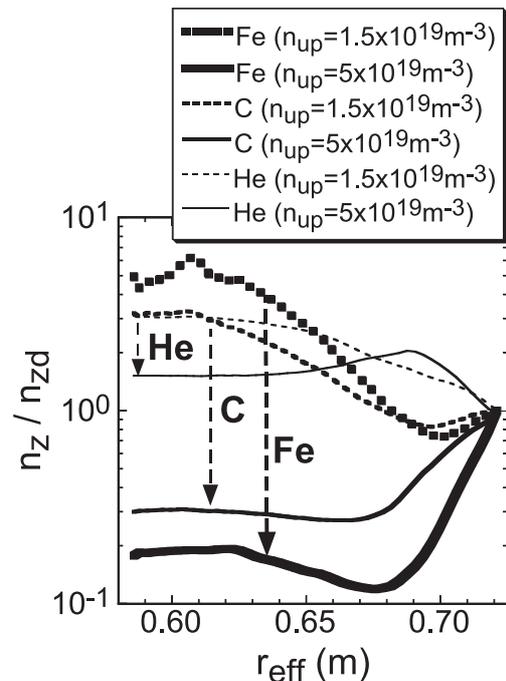


図14 EMC3-EIRENEコードで計算されたエルゴディック層中の不純物（ヘリウム、炭素、鉄）分布。低密度($1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) (破線)、高密度($5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) (実線)の2ケースについて表す。不純物密度はダイバータ直面の密度で規格化。

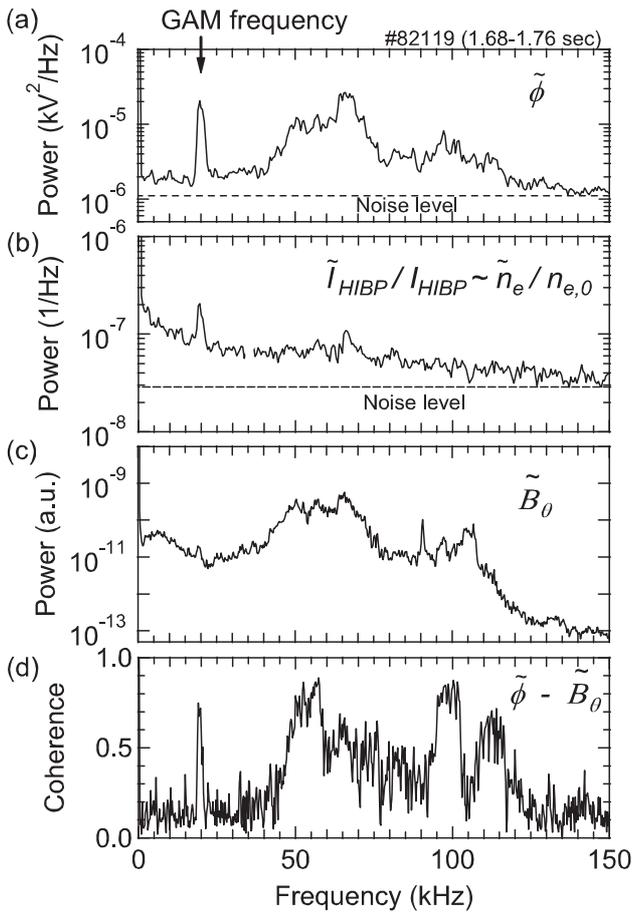


図15 以下の物理量の揺動スペクトル。(a)静電ポテンシャル、(b)規格化された密度揺動に対応する HIBP のビーム強度、(c)磁場、(d)静電ポテンシャル揺動と磁場揺動間のコヒーレンス。HIBP による測定は規格化小半径で 0.15 の位置。参考文献[46]より転載。

位やプラズマのベータ値の変化に伴い、様々な AE モードが同定されてきている。

特に、接線入射 NBI や電子サイクロトロン電流駆動によって中心回転変換を上げ、回転変換分布がプラズマ内部で極小値を持つような、いわゆる反転磁気シア (Reversed Shear: RS) 配位において高速イオン励起の反転磁気シア励起アルフベン固有モード (RSAE) とともに測地的音響モード (Geodesic Acoustic Mode: GAM) が観測されている[46, 47]。図15に HIBP で測定された静電ポテンシャルと密度揺動、および磁気プローブによる磁場揺動のスペクトルを示す。観測された 20 kHz 近傍のピークは GAM 周波数の理論予測と近いこと、磁場揺動との相関から $n=0$ の空間構造を持っていること、HIBP の精度の高い電位分布計測により、この揺動は磁気面の揺らぎではなく、静電ポテンシャルそのものの揺らぎであることが示されている。さらにはこのポテンシャルの揺らぎは径方向に RSAE より内側に局在化しており、このことは径方向にも電場の揺らぎを生み、振動する $E \times B$ フローを誘起することを意味する。以上の理由から観測された揺動は GAM であると結論づけられる。

実験条件を変え、この GAM 振動の周波数の温度依存性を調べたところ、理論からも予測される電子温度の平方根

に比例することが見出された。GAM 振動数はイオンの質量数の関数でもあるので、この周波数測定によって水素同位体比を同定する手法へと展開されることも期待される。

6. 国際的・学際的連携研究

核融合科学研究所は大学共同利用機関であり、LHD は共同利用装置である。核融合科学研究所は、その役割を国際的にも展開し、核融合科学における我が国のハブとして国際的な学術拠点のネットワーク作りに努めている。また、分野の発展には他分野との学際的交流による知の循環が必須であり、長期にわたる研究を支える人材育成の観点も合わせて、幅広い学術基盤上での研究展開が不可欠である。このような国境、学術分野、世代を越えた連携は、これからの核融合科学において特に重要なキーワードである。

核融合科学研究所は法人化後も国を代表して核融合科学に関わる 2 国間協定および国際エネルギー機関 (IEA) 実施協定などの多国間協定の実施機関として当たるとともに、海外の大学・機関との間に 16 の学術交流協定を結んでいる。これらの協定の傘のもとに、LHD を利用した国際共同実験が位置づけられている。前述 [3] の LHD Experiment Technical Guide は英文で作成されており、これまでも、海外からの参加については形態に応じた随時の対応を取ってきたが、平成 23 年 (2011 年) 度の共同研究公募からは海外研究機関所属の研究者も研究代表者として申請できるようにした。最も組織だった共同研究活動として、IEA のステラレータ・ヘリオトロン概念の開発実施協定のもとで行われている調整作業会合 (Coordinate Working Group Meeting: CWGM) 活動がある。ここでは、ヘリカル系の閉じ込めデータベースの作成と公開[48]をはじめとして、H モード、周辺プラズマ乱流、3 次元 MHD 平衡などに活動範囲を広げている。ITPA への協調も閉じ込め関連トピカルグループでの 3 次元物理セッションの企画などを通じて取り組んでいる。

LHD をプラットフォームとした共同研究への参加では滞り型共同研究を促進しており、最近では、マックスプランクプラズマ物理研究所 (ドイツ) や中央環境エネルギー技術センター CIEMAT (スペイン) から高速カメラなどのハードウェアを持ちこんで、大学院生の長期滞在を軸とした組織的かつ継続的な共同研究を進めるケースも複数出てきている。また、プリンストンプラズマ物理研究所 (米国) から大規模な計測器であるイメージング結晶分光器[49]の提供 (平成 23 年 (2011 年) 度より稼働) を受けての共同研究が進められている。また、ITER の ELM 制御をターゲットとして、DIII-D グループとの組織的な双方向での共同実験研究に取り組み始めている。中国、韓国とは超伝導トカマク KSTAR, EAST の稼働により、定常プラズマを中心テーマとして、共同研究が益々、盛んになってきている。

学際的な研究展開については、自然科学研究機構が発足した平成 16 (2004 年) より分野間連携をキーワードとして加速されてきている。特に、機構に所属する 5 研究所を横断するテーマである新しい科学の方法論としての「イメージングサイエンス」への貢献を「磁場閉じ込めプラズマ中の乱

流、磁気島及び磁力線の研究」という切り口から進めている。ここでは、マイクロ波や軟 X 線を計測する素子開発などの入口、構造の再構成など画像処理の中間、そして仮想空間上での 3 次元での可視化表現などの出口にわたって、他分野との交流を通じて、研究の高度化を図っている。

また、プラズマを共通の研究対象を持つ国立天文台との間では、いくつかの具体的な研究課題をあげた共同研究が進められている。ここでは、トピックスとして二つ紹介する。一つ目は太陽コロナの加熱機構の解明を目的とした LHD と太陽観測衛星「ひので」[50]による非平衡プラズマの共同研究である。プラズマパラメータが良くわかっており、なおかつ制御できる LHD のプラズマを利用して、鉄イオンスペクトル線解析を行い、これを太陽活動領域の電子密度分布の評価に応用するなど、多くの成果が上がっており、平成17(2005)年の協力開始以来、20篇の共同論文が発表されている[51]。二つ目は実験室プラズマの自発回転と太陽の差動回転との共通の物理を探る共同研究である。太陽では赤道に近い方が、回転が速いことが知られており、最近の LHD でもプラズマの自発回転が精密に議論されるようになりつつある。このことから、乱流駆動の角運動量輸送をテーマとして議論を進めている。前者もその範疇に入るが、2章で述べた研究テーマグループ「LHD を用いた原子・分子過程研究」では、他にも EUV 光源開発やアインシュタインの A 係数など量子力学上の基本的な物性値の精密な同定のための研究[52]も進められており、核融合科学という分野以外においても LHD という実験装置には非常に高い利用価値があることが示されている。

7. 今後の展開とまとめ

LHD 実験計画は平成10(1998)年の実験開始より、所定の成果をあげ、MHD 不安定性による限界の考え方の見直しを迫る発見や、超高密度プラズマや不純物ホールなどのプラズマ性能の抜本的な向上をもたらす発見が得られてきた。これらの成果をもとに、重点課題にある「炉心プラズマに外挿し得る研究」すなわち、ヘリカル系プラズマが燃えるということを十分な確度を持って学術的に示すことを目的とした新しい段階に進むことが求められる。2030年代での原型炉の稼働を見据えるとき、核燃焼プラズマの実証と定常運転の実証が二大課題として立ち上がる。核燃焼プラズマの点火と制御のミッションは ITER が担っている。一方、定常運転の問題は LHD と JT-60SA が回答を用意しなければならない。LHD ではヘリオトロン磁場によって原理的に定常運転が可能であり、keV 級プラズマの 1 時間保持にすでに成功している[53]。このため、上で述べたが、ヘリカル系プラズマが合理的な運転によって燃焼に至りえることを示すことが必要である。

そのために、加熱設備能力の充実、閉構造ダイバータによる熱・粒子制御、地元との協定締結後の重水素の利用を柱として、LHD アップグレードとも言うべき、新たな段階の計画を準備・検討している。

加熱装置に関しては、中心となる NBI についてはプラットフォームが整い、重水素の利用が可能となれば、正イオ

ン源の加速電圧を増加させることによって、さらなる性能向上が期待できる。ECH についてもジャイロトロン単管で 1.8 MW、1 秒間の発振に平成22(2010)年、成功し、分布制御や物理研究への応用を念頭においた短パルスでの 5 MW 入射や定常 1 MW 運転を可能とすべく整備を進める。ICH については、すでに 0.5 MW、約 1 時間のプラズマ入射や 1.6 MW、5,000 秒の単独発振に成功している。さらに、プラズマ加熱 3 MW、1 時間を目標として、波数制御を可能とするアンテナ(図16)へと改良をはかり、平成22年(2010)年度に 3 年ぶりの実験を再開した。これらの波動加熱によって高いプラズマパラメータ領域での定常運転実験をめざしていく。そこでは、今回詳しく挙げなかったが、プラズマ・壁相互作用の研究[54,55]が益々重要となってくる。これらの定常高性能プラズマと壁との相互作用に研究に関して、LHD は ITER 世代以降のための研究に世界的にユニークな実験環境を提供できると考える。

ダイバータについては LID の原理検証実験や IDB による超高密度プラズマの発見などから、粒子制御の重要性が極めて高いと位置づけられる。5.2 節で少し触れたように、ヘリオトロン磁場はダイバータ磁場構造を本来的に持っており、これを利用したヘリカルダイバータを考慮して、LHD の真空容器は設計・製作されている。これまでは、ダイ



図16 改良された ICH アンテナ。ダブルストラップにより、トロイダル波数を制御することができる。

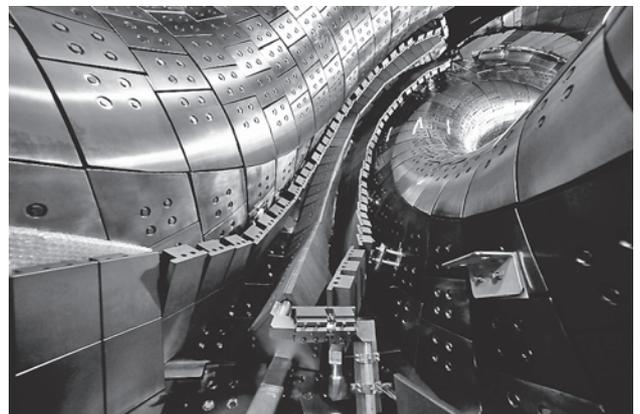


図17 改造されたダイバータ。ヘリカルコイル間の畝に沿って、ダイバータ板が両側に設けられ、その間にドーム構造を持つ。

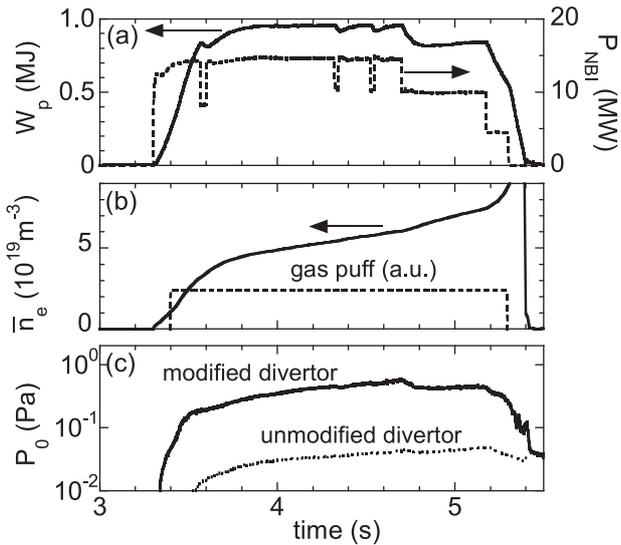


図18 改造されたダイバータ部による中性ガス圧縮効果を示す放電波形。(a)蓄積エネルギー W_p と NBI 加熱電力 P_{NBI} , (b)電子密度とガスパフ, (c)中性ガス圧力, 改造部を実線, 非改造部を点線で表す。

バータ板はプラズマに対向しており、中性化したガスを滞留させるバッフル構造を持たない状態で実験を進めてきた。この状況でのダイバータ機能を実験で把握しつつ、ヘリカルダイバータの設計を進めてきた。平成22年(2010年)度の実験では、中性ガスが詰まりやすいトラスの内側の一部(LHDはトロイダル方向に10の周期性があるが、このうち2か所)について、ダイバータ板上で中性化したガスがプラズマに戻りにくくするためにバッフルやドーム構造を設ける改造を行った(図17)。初期実験結果では、図18に示すように、この改造を施した場所は従来の場所よりも中性ガス圧が20倍まで高まることが確認できた[56]。これらの結果は、設計に用いられた EMC3-EIRENE コードによる予測と良く合致しており、最終的な閉構造ダイバータの設計を固めることができた。平成24年(2012年)度の実験より、トラス内側部の全周に近い領域にわたって排気装置を備えた本格的な閉構造ダイバータ実験を開始する予定で

ある。

三つ目の柱が重水素プラズマである。将来の核融合炉を見通すためには同位体効果を明らかにしていかなければならない。トカマクにおいてはHモードへの遷移が容易となるなど、重水素プラズマの性能が軽水素プラズマの性能を上回ることが広く知られている。この閉じ込め改善は、異常輸送のモデルとして広く受け入れられているジャイロボーム的な記述と質量比依存性においては矛盾しており、未解明かつ、物理モデルの予測の信頼性に決定的な影響を持つ一大課題である。現在、LHDでの重水素実験の前提となる地元の理解に研究所をあげて努力している。この地元の理解の後、所定の手続きと準備に着手する予定である。重水素の利用により、閉じ込め改善が得られれば、現在の装置仕様そのまま、大きなプラズマ性能の向上を図ることができる。5章で紹介した帯状流の理論的考察を発展させた最近の研究[57]は、重水素ではポロイダルマッハ数が大きくなることからより大きな乱流抑制が期待されることを示唆している。

改めて、LHDの今後の位置づけをタイムラインに載せて図19に示す。2030年代での原型炉稼働をめざし、LHD計画は今後10余年でその判断を可能とする学術的に体系化された知見を提供することに全力をあげる。原型炉の判断材料はLHDとともに、ここに示された大型実験計画と相補的に用意されることが必要である。LHDはITER、原型炉、そして核融合エネルギーの実用化に向け、深い科学的理解に基づいた予言能力の高い物理モデルの定量的な成熟度を試す極めて重要なプラットフォームである。LHDを含めたこれらの大型実験計画による今後10余年の研究はプロジェクト間で互恵的に加速し合えるものでなければならない。この原型炉に向けた収斂とともに、この大きな挑戦を支える拡がり学際的に生まれ、人材育成が長期的に涵養されることが不可欠であり、このためにも、大学センターとの連携を中心とした組織的なものから、個々の研究者の自由な発想に基づいたものまで共同研究の果たす役割は極めて大きい。LHD計画はその中核としての役割を果たすものである。最後に、LHDを利用した共同研究へのご支援と

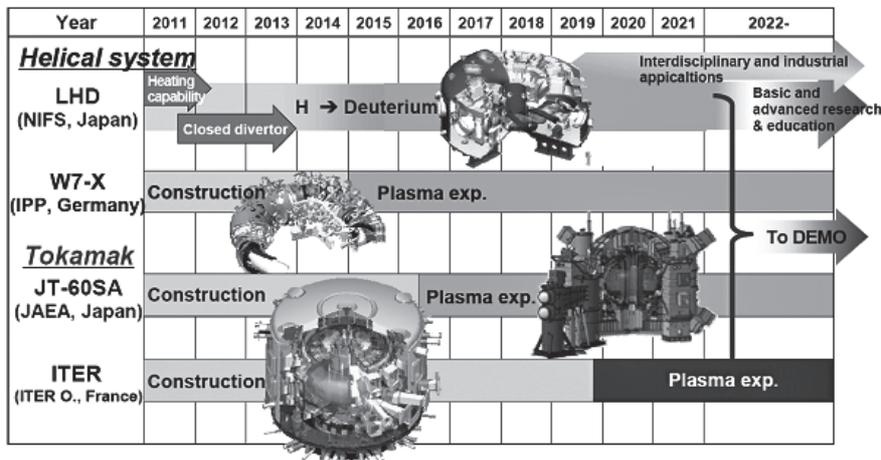


図19 LHDの他、主だった核融合実験プロジェクト(W7-X, JT-60SA, ITER)の今後の予定。

ご参画をお願いするとともに、利用価値を高め、学術的にエクセレントな研究成果を上げるために御叱正を乞う。

謝 辞

本稿は、所内所外を問わず LHD を用いた研究に貢献をされた LHD 実験グループおよび実験を支えた LHD 運転グループの方々を代表して、執筆させていただいた。これらすべての方々の日頃の不断の努力に、心より敬意を表し、感謝申し上げる。秋山毅志氏は LHD 実験グループメンバーであるが、今回担当編集委員として大変お世話になったことを特に感謝したい。

参考文献

- [1] 小森彰夫：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 233 (2006).
 [2] <http://comets.lhd.nifs.ac.jp/>
 [3] <http://www.lhd.nifs.ac.jp/>
 [4] Fusion Sci. Tech. **58**, 1 (2010).
 [5] T. Yamamoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **85**, 637 (2010).
 [6] Y. Takeiri Fusion Sci. Tech. **58**, 482 (2010).
 [7] 下妻隆：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 506 (2006).
 [8] 下妻隆, 長崎百伸：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 368 (2009).
 [9] 武藤敬：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 422 (2006).
 [10] A. Komori *et al.*, in Proc. 15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion Research (Seville, 1994) Vol.2 (Vienna, IAEA) p.773.
 [11] N. Ohyabu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 05502 (2006)
 [12] R. Sakamoto and H. Yamada, Plasma Fusion Res. **4**, 002 (2009)
 [13] H. Yamada *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **49**, B487 (2007)
 [14] R. Sakamoto *et al.*, Fusion Sci. Tech. **58**, 53 (2010)
 [15] 永岡賢一, 横山雅之：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 71 (2010).
 [16] 吉沼幹朗：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 78 (2010).
 [17] K.Y. Watanabe *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 1247 (2005)
 [18] H. Yamada *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **50**, 480 (2010).
 [19] S. Sakakibara *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **50**, 124014 (2008)
 [20] H. Yamada *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **43**, A55 (2001)
 [21] M. Yokoyama *et al.*, Nucl. Fusion **47**, 1213 (2007)
 [22] 井戸 毅, 清水昭博, 西浦正樹：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 507 (2010).
 [23] J. Miyazawa *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 015003 (2008).
 [24] N. Mizuuchi *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 095023 (2009).
 [25] S. Ohdachi *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **50**, 552 (2010).
 [26] O. Motojima *et al.*, Fusion Eng. Des. **83**, 983 (2008).
 [27] O. Mitarai *et al.*, Plasma Fusion Res. **2**, 021 (2007).
 [28] Y. Suzuki *et al.*, Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2006-March 2007, p.183, <http://nifs-repository.nifs.ac.jp/bitstream/10655/454/1/ANREP06-07-183.pdf>
 [29] S. Murakami *et al.*, Nucl. Fusion **42**, L19 (2002)
 [30] K. Saito *et al.*, Annual Report of National Institute for Fusion Science April 2006-March 2007, p.36, <http://nifs-repository.nifs.ac.jp/bitstream/10655/247/1/ANREP06-07-036.pdf>
 [31] 居田克己：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 86 (2010).
 [32] N. Tamura *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **50**, 514 (2010).
 [33] S. Inagaki *et al.*, in Proc. 23rd IAEA Fuosn Energy Conference (Daejeon, 2010) EXC/7-4Ra http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/exc_7-4ra.pdf.
 [34] M. Kobayashi *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 056111 (2010).
 [35] Drapiko, et al., in Proc. 23rd IAEA Fuosn Energy Conference (Daejeon, 2010) EXD/P3-09 http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/exd_p3-09.pdf.
 [36] Y. Feng *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **44** (2004) 57.
 [37] D. Reiter *et al.*, Fusion Sci. Technol. **47** (2005) 172.
 [38] K. Ida, Plasma Fusion Res. **3**, S1003 (2008)
 [39] K. Kawahata *et al.*, Fusion Sci. Technol. **58**, 331 (2010).
 [40] T.H. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 195002 (2008).
 [41] N. Ohyabu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 055005 (2002).
 [42] K. Ida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 045003 (2008).
 [43] 小林政弘, 増崎貴：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 221 (2009).
 [44] 小林政弘他：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 393 (2009)
 [45] 東井和夫他：プラズマ・核融合学会誌 **83**, 883 (2007)
 [46] K. Toi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 145003 (2010)
 [47] T. Ido *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **52**, 124025 (2010).
 [48] <http://ishcdb.nifs.ac.jp/>
 [49] M. Bitter *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10E328 (2010).
 [50] 渡邊鉄哉：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 147 (2008).
 [51] T. Watanabe, J. Phys., **163**, 012002 (2009).
 [52] 門信一郎他：プラズマ・核融合学会誌 **86**, 631 (2010).
 [53] 大藪修義：プラズマ・核融合学会誌 **82**, 429 (2006).
 [54] 芦川直子：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 924 (2008).
 [55] 吉田直亮, 時谷政行：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 929 (2008).
 [56] S. Masuzaki *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 1202007 (2011).
 [57] T.H. Watanabe *et al.*, in Proc. 23rd IAEA Fuosn Energy Conference (Daejeon, 2010) EXC/6-1 http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2010/cn180/cn180_papers/thc_6-1.pdf