



## プロジェクトレビュー

### JT-60 共同研究の進展

木村晴行<sup>1</sup>, 犬竹正明<sup>1</sup>, 菊池 満, 小川雄一<sup>2</sup>, 鎌田 裕, 小関隆久, 内藤 磨,  
高瀬雄一<sup>3</sup>, 井手俊介, 長崎百伸<sup>4</sup>, 諫山明彦, 田辺哲朗<sup>5</sup>, 宮 直之, 中塚正大<sup>6</sup>,  
波多江仰紀, 居田克巳<sup>7</sup>, 竹永秀信

日本原子力研究開発機構, <sup>1</sup>東北大学大学院工学研究科, <sup>2</sup>東京大学高温プラズマ研究センター,

<sup>3</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科, <sup>4</sup>京都大学エネルギー理工学研究所,

<sup>5</sup>九州大学大学院総合理工学研究院, <sup>6</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究中心, <sup>7</sup>核融合科学研究所

(原稿受付: 2006年11月9日)

#### Keywords:

JT-60 Joint Research, tokamak, bootstrap current, center solenoid, electron cyclotron wave, MHD instability control, plasma-wall interaction, advanced laser technology, plasma diagnostics, helical

#### 1. はじめに

JT-60における公募型研究協力(以下, 共同研究<sup>1</sup>)は日本原子力研究開発機構(以下, 原子力機構)の中期計画を踏まえつつ, 同機構の核融合研究施設を利用した研究を幅広い分野の研究者と協力してお互いの長をを活かし共通の目的を持って進めることにより, 双方の研究の一層の発展を図ることを目的として実施されている。本研究協力事業は平成11年度から旧日本原子力研究所(原研)施設利用協議会の下で核融合研究施設を利用する公募型研究協力の一環として開始された。トリチウム安全性試験装置(CATS: Caisson Assembly for Tritium Safety study), 核融合中性子源施設(FNS: Fusion Neutronics Source), MeV級イオン源試験装置(MTF: MeV Test Facility)等の核融合工学研究施設やJFT-2M(課題公募は15年度で終了)と合わせて研究協力の課題が公募され, 同協議会の核融合専門部会(部会長: 濱田核融合科学研究所教授)で課題の選定が行われてきた。

平成17年度下期(原子力機構発足後)は原子力機構核融合研究開発部門で平成18年度の共同研究の課題を公募し, 同部門に設置した核融合研究協力委員会(委員長: 濱田核融合科学研究所教授)で課題の選定を行い, 現在に至っている。

文部科学省(科学技術学術審議会)に設置された核融合研究ワーキンググループによって日本の「核融合研究の重点化」(以下, 重点化)が提言され(平成15年1月), その中でJT-60はトカマク国内共同研究の中核と位置づけられるとともに, 共同企画・共同研究の運用体制を早期に確立

することを強く望まれた。このため, 旧原研核融合研究委員会の活動の見直しを行い, 同委員会を共同企画・共同研究の運用母体と位置づけ, 共同企画・共同研究の方策, 大枠の研究目標の討議と自己評価が行われてきた。

このような重点化以降の共同企画・共同研究の運営体制の構築とともに, JT-60共同研究の研究課題数, 研究協力者数が顕著に増加し, 平成18年度はそれぞれ33件, 165名に上っている。また, 遠隔実験システムの整備, 解析コード群の提供など共同研究の環境の整備も進められている。共同研究の成果の発表件数はJT-60全体の20-30%を占める。具体的には, ブーストアップ電流による中心ソレノイド無し運転, 電子サイクロトロン波によるMHD不安定性制御, プラズマ-壁相互作用, 先進レーザー技術のプラズマ計測への応用, トカマクとヘリカルの比較研究などに, 顕著な成果が上がっている。

我が国のトカマク研究の発展と人材育成の観点から更に多くの研究者, 大学院生が本共同研究に参加されることを期待して, JT-60共同研究の全体像につき解説する。

(木村晴行)

#### 2. 共同企画・共同研究の運営体制

##### 2.1 JT-60 共同企画・共同研究の運営体制の構築

平成15年1月, 文部科学省 科学技術・学術審議会 学術分科会 基本問題特別委員会 核融合研究ワーキンググループによる, 「今後の我が国の核融合研究の在り方について(報告)」がまとめられ, 日本の「核融合研究の重点化」が提言された。その中でJT-60はトカマク国内共同研究の中

1 旧原研では研究協力について「共同研究」と「協力研究」の2つの制度を設けていたが, 原子力機構では平成17年度末で「協力研究」は廃止され「共同研究」に一本化された。本稿では17年度以前についても総称的に「共同研究」と呼ぶものとする。

Progress in JT-60 Joint Research

KIMURA Haruyuki, INUTAKE Masaaki, KIKUCHI Mitsuru, OGAWA Yuichi, KAMADA Yutaka, OZEKI Takahisa, NAITO Osamu, TAKASE Yuichi,

IDE Shunsuke, NAGASAKI Kazunobu, ISAYAMA Akihiko, TANABE Tetsuo, MIYA Naoyuki, NAKATSUKA Masahiro, HATAE Takaki,

IDA Katsumi and TAKENAGA Hidenobu

corresponding author's e-mail: kimura.haruyuki@jaea.go.jp

核と位置づけられた。これを機に同年3月、旧原研核融合研究委員会（委員長：高村名古屋大学教授）の活動の見直しを行い、同委員会を「原研と核融合コミュニティの炉心プラズマに関する戦略的共同企画・共同研究の運用母体」と位置づけ、共同企画・共同研究の方策、大枠の研究目標の討議と自己評価が行われてきた。この際考慮すべき重要な観点として、(1)国内研究者の開発研究への参加の意義と核融合科学研究所が実施している学術共同研究との違い、(2)原子力機構の独立行政法人としての経営権との整合性があった。

最初の観点については、原子力機構はトカマク炉心プラズマ開発の中核的機関と位置づけられており、原子力委員会や科学技術学術審議会が定める開発の方針に従って開発研究を進める必要がある。核融合科学研究所は学術研究の推進のために大学共同利用機関としての役割を果たしてきたが、原子力機構も、その責任をもつ開発研究について国内の研究者に対してオープンであるべきで、大学等の研究者の創意との相乗効果によって開発研究の一層の進展が期待できる。原子力機構には国の負託による開発研究を効果的に進めることが求められることから共同研究の実施は目標の達成に資するものと位置づけることができる。国内研究者の自発的な研究提案を重視しつつ、全体として開発目標に向かって研究開発を進めるには、原子力機構と核融合研究者コミュニティが大枠の研究目標を共同で討議し、それに沿った共同研究テーマを募集し実施することが重要と考えられた。この点が、研究者による自律的な学理の探求を重視すべき学術研究と異なっている。

第2の観点については、共同企画の場としての炉心プラズマ共同企画委員会（旧原研時代は核融合研究委員会）の委員長、JT-60 専門部会（旧原研時代はトラス実験専門部会）の部会長は核融合コミュニティから出し、実施においては原子力機構のライン組織の長（先進プラズマ研究開発ユニット長）が責任者を務め、機構職員と大学等の研究者が共同で実験テーマ班のリーダーを務めることで、整合性をとることが可能と判断した。

平成18年度からは共同企画・共同研究の運営体制の一層の強化を図るため、原子力機構核融合研究開発部門に設置した炉心プラズマ共同企画委員会（委員長：犬竹）において、JT-60 による研究開発等の討議と共同研究の課題の選定を一体的に行うこととなっている。図1に平成17年度上期以前（旧原研）および現在（平成18年度）の共同企画・共同研究の体制を示す。（犬竹正明，菊池 満）

2.2 JT-60 実験テーマ制における共同企画・運営の進展

JT-60 では、原子力機構および大学等からの実験提案に基づいて対象領域毎に研究テーマ班を構成し、原子力機構および大学等からそのリーダーを選び、その下で実験・解析研究について共同で企画・運営している。この共同運営体制は平成14年度から開始し、当初は、いくつかの研究テーマ班のリーダーを大学等の研究者としていたが、現在では、全ての研究テーマ班に、原子力機構と大学等から各々1人ずつ共同リーダーを置き、研究領域全体を共同運営している（図2 (a)）。大学等からのリーダー数は現在6

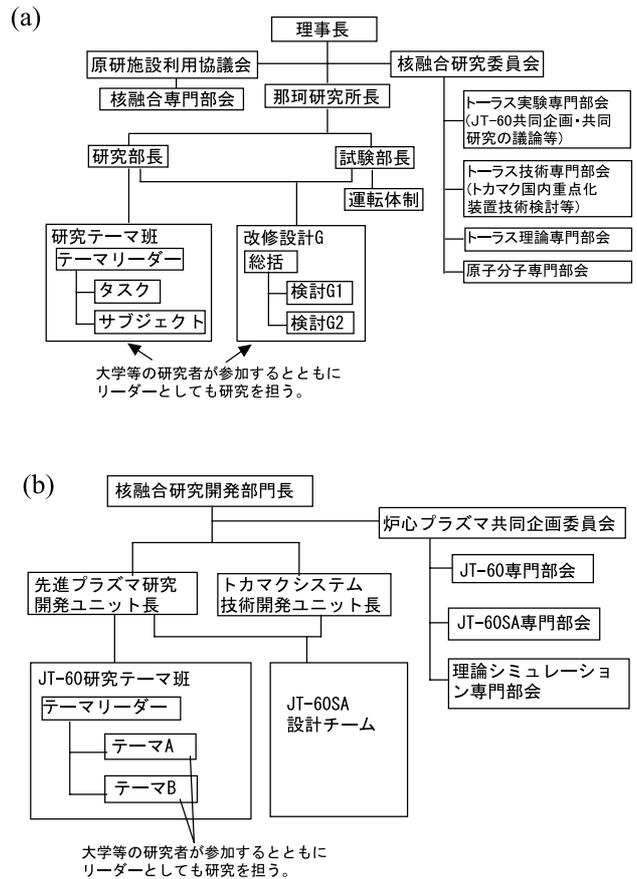


図1 JT-60 共同企画・共同研究の体制 ((a)平成17年度上期以前(旧原研), (b)現在(平成18年度)).

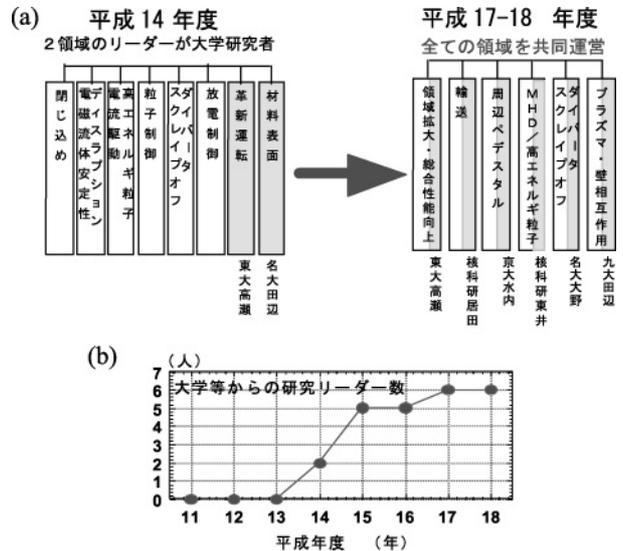


図2 (a)JT-60 研究テーマ班の構成と大学等からのリーダー、(b)大学等からのリーダー数の年次変化。

名である（図2 (b)）。このような共同企画・共同研究の計画および結果に関しては、平成17年度までは核融合研究委員会トラス実験専門部会、平成18年度からは炉心プラズマ共同企画委員会JT-60専門部会において、ITERおよびそれを支援する国際トカマク物理活動等への日本としての貢献を考慮しつつ議論を進め、テーマ班の運営に反映してい

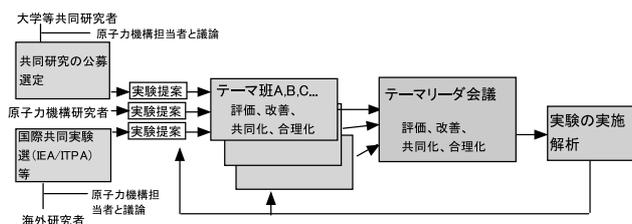


図3 JT-60における実験提案と実施のプロセス。

る。

例えば、平成17年度から18年度にかけての実験計画の立案と実施については、以下のようなプロセスで進めた。図2(a)の研究テーマ班構成の下で、原子力機構および大学等からの共同リーダーが中心となり、原子力機構の中期計画を踏まえつつ、様々な実験提案を吟味・改善し、テーマ制全体で進める6つの重点課題(例：高ベータ長時間維持、自由境界限界を超える高ベータ化)、および各研究テーマ班毎の重点研究課題を定めた。これらをトラス実験専門部会で議論し、具体的コメントを反映させ、年間計画を確定した。実験の実施にあたっては、適宜テーマリーダー会議を開きつつ、JT-60の装置状況に応じて柔軟な運営を行った。

図3に、テーマ制における実験提案の受け入れから実験の実施までのプロセスを示す。国内共同研究の提案に関しては、大学等の研究者と、原子力機構の担当者との間で、JT-60の装置状況や研究計画との整合性を吟味しつつ、最大の成果があるよう、実験提案を改善していく過程が極めて大切である。海外からは、主に国際トカマク物理活動が推進する様々な国際装置間比較実験の提案がなされている。これら、国内・国際共同研究と原子力機構の研究者からの実験提案を、該当する研究テーマ班で評価、改善し、共同化や合理化を行う。そして、これらをテーマリーダー会議でさらに議論し、実験の実施に至るものである。実験の意義や結果の吟味に関しては、厳しい議論が行われ、必要な放電数や実験回数が決められる。そこでは、共同研究者自身の責任あるデータ解析が必須である。例えば、2006年の第21回IAEA核融合エネルギー会議で口頭発表を行った「Evolution of Bootstrap-Sustained Discharge in JT-60U (東京大学, 高瀬他)」[1]の場合、実験の実施・解析の過程を3度繰り返し、その都度担当研究テーマ班での詳細な議論を重ねた。上記のIAEA会議では、合計4件の発表を共同研究者が行ったが、他の共同研究も含めて、JT-60の研究の幅を大きく広げつつ、開発研究を加速するものとなっている。(小川雄一, 鎌田裕)

### 2.3 共同研究の公募, 課題採択

JT-60共同研究の公募は原子力機構のホームページに募集要項を掲載することにより行われている。昨年度に募集された共同研究のテーマは、原子力機構の中期計画を踏まえて、以下の四つの研究課題に沿ったものであった。

- (i) 燃焼プラズマ制御手法の研究
- (ii) 定常高ベータ化研究
- (iii) 炉心プラズマ研究開発のための装置技術開発

### (iv) 炉心プラズマ物理機構解明のためのモデルの開発・検証

これらに対応する具体的な応募課題として、以下の15テーマのいずれかに沿った内容であることを必要とした。

- ・ 高圧力プラズマの定常維持手法の研究
- ・ 高自発電流割合の定常維持手法の研究
- ・ 高密度・高放射領域での閉じ込め改善の研究
- ・ 電流駆動と電流分布制御の研究
- ・ 電流ホールの研究
- ・ コアプラズマの輸送・内部輸送障壁の研究
- ・ 周辺ペデスタル部での輸送およびELMの研究
- ・ MHD不安定性およびディスラプションの研究
- ・ 高エネルギー粒子の挙動の研究
- ・ ダイバータ/SOLプラズマの研究
- ・ プラズマ・材料相互作用の研究
- ・ 先進粒子補給の研究
- ・ 計測器の共同開発および新しい計測データ評価方法の研究
- ・ 加熱装置の開発研究
- ・ 大容量電気エネルギー変換制御技術の開発研究

応募者は申請に先立って研究および技術的な内容について原子力機構の担当者と協議を行い、双方が合意した上で、申請を行うことになっている。応募資格は大学、民間および公的研究機関の研究者並びにこれに準ずる職員等である。なお、大学等の場合、研究代表者は助手以上の職にある者とし、研究協力者には大学院学生を含む。

共同研究の課題選定は原子力機構核融合研究開発部門に設置した核融合研究協力委員会により行われた。核融合研究協力委員会の委員は総数24名、その内の原子力機構外部の委員は委員長を含めて14名であった。応募書類の内容につき上記委員会で審査を行い、その審査結果に基づき核融合研究開発部門長が採否を決定した。

来年度(平成19年度)の課題募集期間は平成19年1月上旬～2月中旬の予定である。(木村晴行)

## 3. 共同研究の進展

### 3.1 研究課題数, 研究協力者数

JT-60共同研究は平成11年度から研究課題数、研究協力者数がそれぞれ、2件、6人でスタートした。その後、研究課題数、研究協力者数は順調に拡大して行った。特に重点化(平成15年)以降、顕著に増加し、平成18年度はそれぞれ33件、165名に上っている。図4、図5はそれぞれ平成11年度からの研究課題数、研究協力者数の増加の様子を示す。図6に研究協力者数の職種別年次変化を示す。重点化後のJT-60共同研究の進展に伴い、参加する大学院生の人数も増加しており、平成17-18年度は約60名に達している。図7に課程別大学院生の人数の年次変化を示す。博士課程と修士課程の比率はほぼ同程度である。(木村晴行)

### 3.2 参加する研究機関

JT-60共同研究に参加した研究機関は平成11年度の開始以来、合計35機関に及ぶ(平成18年度の参加機関数は25)。図8に平成11年度以来これまでに参加した研究機関名を示

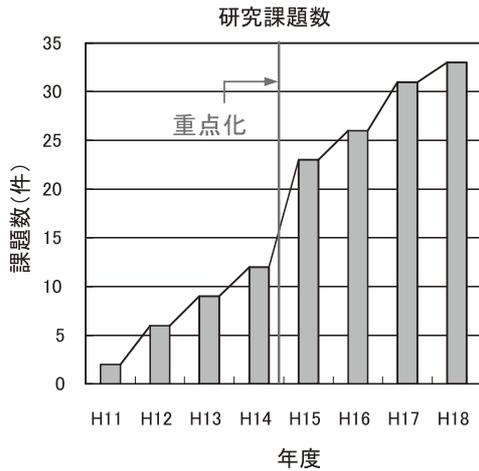


図4 JT-60 共同研究の研究課題数の年次変化。

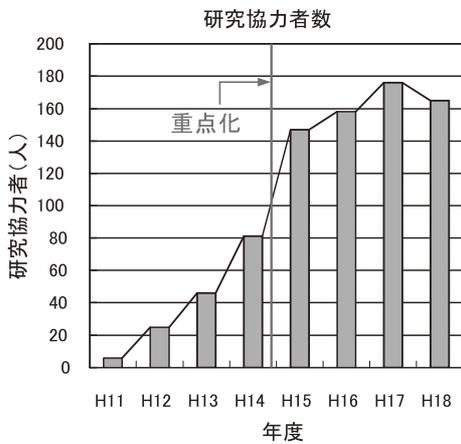


図5 JT-60 共同研究に参加する研究協力者数の年次変化。

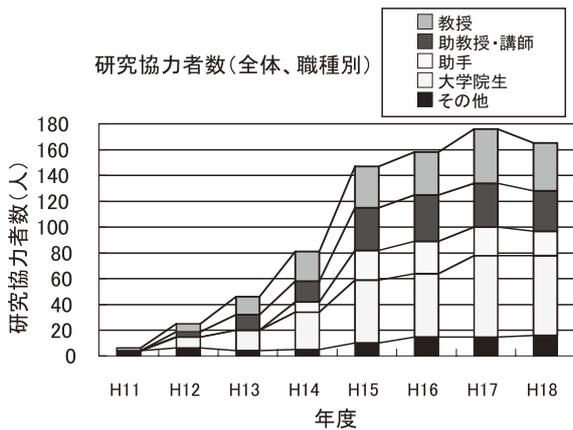


図6 JT-60 共同研究に参加する研究協力者数の職種別年次変化。

す。平成11年度以来の共同研究参加者数の累計は約800名であるが、図9にその研究機関別の内訳を示す。核融合科学研究所が最も多く、次いで、九州大学、京都大学、東京大学、名古屋大学、筑波大学、北海道大学、・・・の順に参加者が多い。(木村晴行)

### 3.3 研究協力分野の変遷

図10はJT-60 共同研究の課題を(i)輸送・粒子補給, (ii)

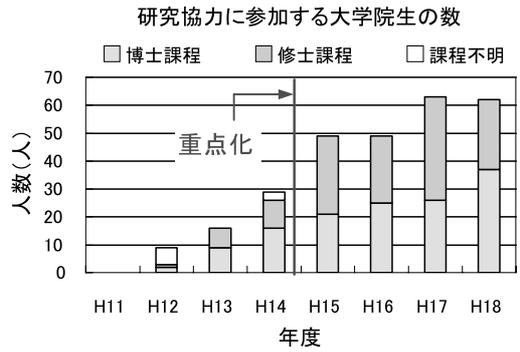


図7 JT-60 共同研究に参加する大学院生数の課程別年次変化。



図8 JT-60 共同研究に参加した研究機関(平成11年度から18年度)。

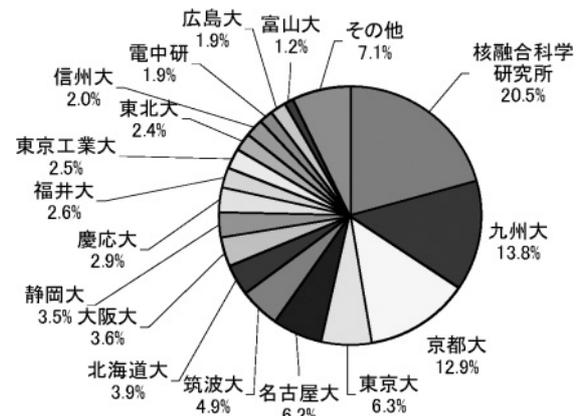


図9 JT-60 共同研究に参加した研究協力者数の機関別内訳(平成11年度から18年度までの累計(約800名)の内訳)。

MHD 不安定性, (iii)加熱電流駆動・高エネルギー粒子, (iv) SOL/ダイバータと熱・粒子, (v)プラズマ-壁相互作用, (vi)モデリング/シミュレーション, (vii)プラズマ計測, (viii)加熱装置の8つに分類し、それぞれの課題数の変遷を示したものである。最近の傾向としてコアプラズマ関連である輸

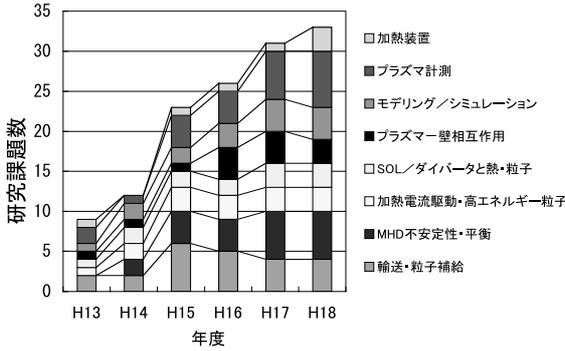


図10 JT-60 共同研究の課題数の研究分野別年次変化。

送・粒子補給, MHD 不安定性, 加熱電流駆動・高エネルギー粒子の研究課題数の和はほぼ一定であるが, プラズマ計測, 加熱装置関係の研究課題が増えている。コアプラズマ関連では MHD 不安定性に関する研究課題が比較的多い。(木村晴行)

3.4 遠隔実験システム

JT-60 では, 研究協力を推進するため, 遠隔地の多数の研究者が効率的に実験に参加できる遠隔実験システムを開発した。従来, 実験の実施には装置のあるオンサイトへの移動が必要でありその効率化が大きな課題となっていた。また, 遠隔地からの実験実施には, 大型装置を保護し安全な運転を担保して, 制御システムへの不正侵入を防止するための高度なセキュリティの確保が必要であった。そこで, 原子力機構が IT Based Laboratory (ITBL) 計画において開発してきたグリッドコンピューティングにおけるセキュリティ技術を用い, 高度なセキュリティの下で遠隔地からでも実験を実施できるシステムを開発した。

システムの構成を図11に示す。JT-60 実験条件作成, 結果表示, 設備状態監視用端末とほぼ同等の情報をウェブ上で提供する遠隔実験管理システム(遠隔実験サーバに搭載)と, 外部からのアクセスに対してネットワークセキュリティを保つ ITBL セキュリティシステムとから構成される。

本システムは, セキュリティを確保しつつ, 遠隔地の大学等の研究者がパソコン等のウェブブラウザを使って JT-60 の実験条件(放電条件)の設定や運転状況の把握ができる環境を提供している。本システムと, TV 会議システム, 遠隔からの実験データ表示・解析ツールを併用することにより, 外部の研究者は所内の研究者とほぼ同等の環境で実験を実施できる。実験運転の安全を確保する観点から, 外部から JT-60 装置へ直接的な運転操作はできないシステム構成となっている。

ITBL のセキュリティシステムにおいては, 利用者を電子証明書で認証し, 遠隔実験サーバと利用者のパソコンとの間の通信データを暗号化し盗聴を防止することにより, 不特定の利用者による実験条件の改ざんや JT-60 制御システムへの不正侵入を防止する。遠隔実験管理システムでは, JT-60 制御システム外のネットワークからのアクセスを遠隔実験サーバまでに限定することにより, JT-60 制御システムへの外部からの侵入を防止しつつ, 実験条件等のデータの送受信を可能とした。外部の研究者が作成・保存した実験条件は, 所内の研究者が作成・保存した実験条件と同様に, JT-60 運転体制の管理下に置かれ, 実験条件の適合性検査を経て実行される。

平成18年6月に当システムを用いて京都大学から JT-60 への遠隔実験を行い, その実行可能性を確認した。また, この開発したシステムは, 今後, JT-60 改造装置 JT-60SA や国際熱核融合実験炉 ITER での遠隔実験の実現に向け

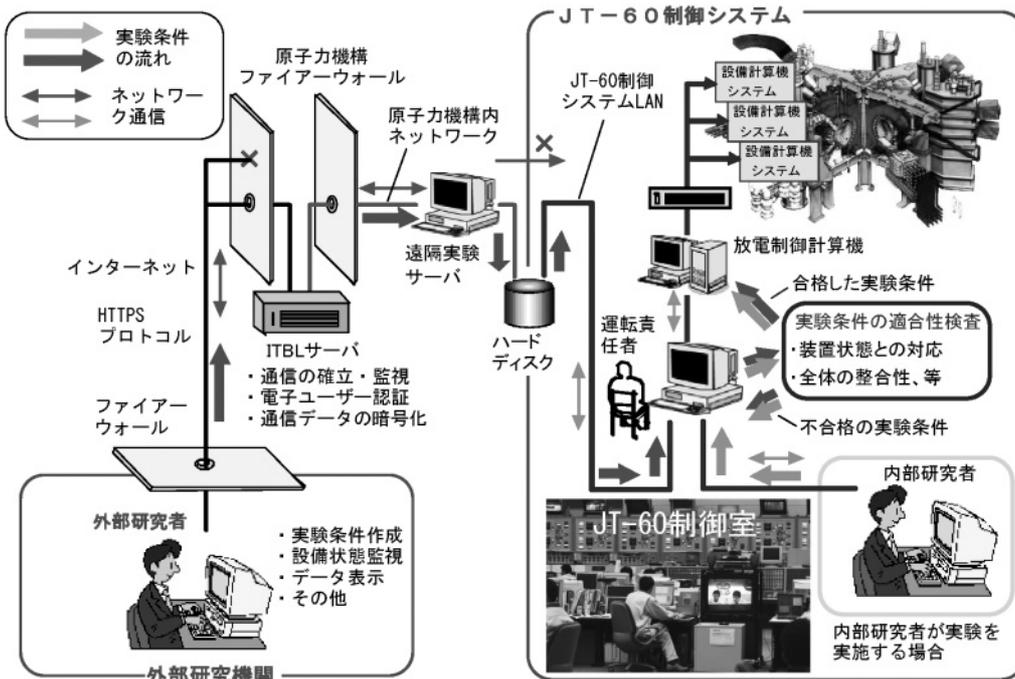


図11 JT-60 遠隔実験システム概念図。

た、技術基盤となる。 (小関隆久)

### 3.5 環境整備 (解析コード群)

JT-60では各計測器で収集されたデータの多くを計測データ処理システムで物理データに変換し計測データベースに登録している。研究者はフロントエンド計算機である解析サーバにログインすることにより、これらの計測データの解析を行うことができる。図12にJT-60における計測データの流れと解析コード群の関係を示す。

解析サーバでは以下に示す解析コード群を使用することができる。但しこれらのグラフィカルインターフェースにはXウィンドウシステムを使用しているため、利用者の計算機ではXウィンドウを使える必要がある。

- ・計測データの時間波形の表示 (DAISY: DATA Illustration SYstem) [2]

DAISYは主に計測データベースに登録された計測データの時間波形を表示するためのコードである。利用者は各計測データの名称またはコード番号を入力することにより、複数の計測データの時間波形表示、それらの波形同士の簡単な演算、微分、平滑化、カーソル位置での数値データの読み出し、外部ファイルへの数値データの書き出し等を行うことができる。また複数のウィンドウを開いてそれぞれ異なるフォーマットで波形を表示することも可能である。表示するデータや縦軸横軸の設定情報等はファイルに保存することができる。

- ・プラズマの最外殻磁気面形状の同定 (CCS: Cauchy-Condition Surface method, FBI: Fast Boundary Identification) [3, 4]

CCS, FBIは磁気計測データからプラズマの最外殻磁気面形状と内部インダクタンス等のいくつかのマクロ量を計算するためのコードである。CCSはコーシー条件面法と呼ばれる新たな解析手法に基づいて計算を行うものであり、必要な係数等のテーブル化により実時間処理も可能でJT-60の制御システムでも用いられている。一方FBIはプラズ

マ電流をフィラメント近似して磁気計測データと整合するように各フィラメント電流を調節するものである。計測器の視野や加熱装置のビームラインなどの表示も可能である。フェライト鋼タイル設置後はCCSによる解析が標準となっている。

- ・プラズマのMHD平衡解析 (SELENE) [5]

このフロントエンドである上記のCCSまたはFBIが出力した磁気計測データおよびマクロ量に基づきグラッド・シャフラノフ方程式を解いてプラズマのMHD平衡を求めるコードである。この結果はMHD平衡データベースに登録される。通常は磁気軸における安全係数を1と仮定して自動的に計算を行うことができるが、MSE計測により局所磁場データが存在する場合には、これを含めたより正確な解析が可能である。

- ・計測データの磁気面へのマッピング (SLICE: experimental data time SLICE monitoring software) [6]

SLICEはMHD平衡データベースに登録されたデータを用いて計測された空間分布データを磁気面量として磁気面上にマッピングするコードである。これにより視野の異なる計測器のデータも統合的に扱うことができる。SLICEでは計測データの各種関数によるフィッティング、線積分量として計測されるデータのアーベル変換等を行うこともできる。またここで得られた結果に基づいて下記のTOPICSコード用の入力データを作成することができる。

- ・粒子軌道追跡モンテカルロコード (OFMC: Orbit Following Monte-Carlo) [7]

OFMCは粒子ビーム加熱、高周波加熱、アルファ粒子による高速イオンの加熱分布、運動量分布等を粒子軌道追跡により解析するコードである。

- ・プラズマ電流解析コード (ACCOMME: Analyzer for Current drive CONSistent with Mhd Equilibrium) [8]

ACCOMMEは定常状態におけるブートストラップ電流や、粒子ビーム駆動電流、高周波駆動電流等の外部駆動電流をMHD平衡と矛盾無く解くための解析コードである。

- ・トカマクプラズマ予測解析コードシステム (TOPICS: TOKamak Prediction and Interpretation Code System) [9]

TOPICSは、実験データに基づく輸送特性解析・プラズマ性能評価から、次期装置・核融合炉におけるプラズマ性能予測まで、トカマクプラズマ特性の広範囲な解析を行える。FBI(or CCS)-SELENEで計算されたMHD平衡データやSLICEで作成された分布データ、OFMCで計算したNBIによる粒子・エネルギー源分布等を、TOPICSで利用することが可能であり、また、TOPICS内部の物理モデルで計算することも可能である。

共同研究でより簡便にTOPICSを使えるようにするために、ウェブブラウザ上でTOPICSを使えるシステムを開発中である。またDAISY, SLICEについても機能は限定されるがウェブブラウザで使えるシステムの暫定版を公開している。 (内藤 磨)

### 3.6 研究発表件数

重点化後、JT-60全体の研究発表件数に占める共同研究

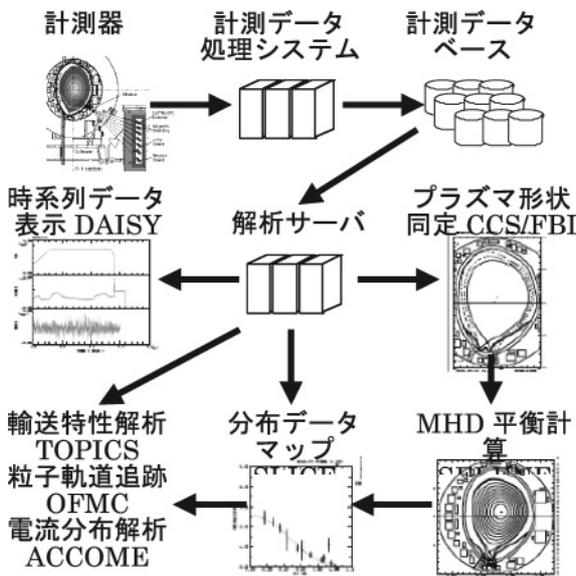


図12 JT-60における実験データ解析の流れ。

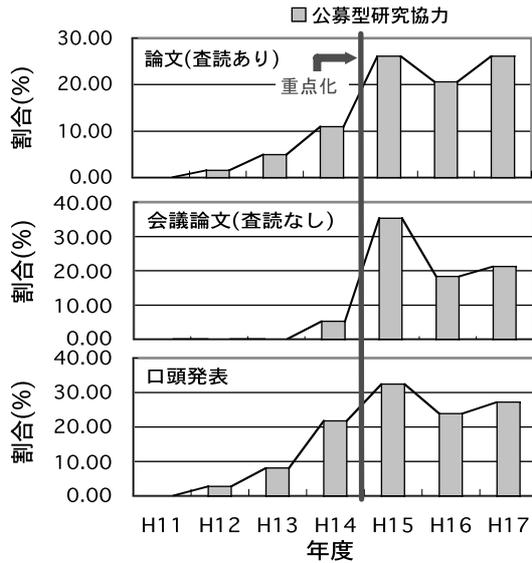


図13 JT-60 全体の研究発表件数に占める共同研究の成果発表の割合。

の成果発表は増加し、図13に示すように、学術誌論文（査読あり）、会議論文（査読なし）、口頭発表に占める共同研究の成果は、それぞれ全体の20-30%を占める。JT-60 全体としてインパクト係数(IF)の高い論文誌に数多く発表しているが、図14に示すように、重点化後、共同研究にかかわる論文発表において、インパクト係数の高い論文誌の占める割合が急増している。IAEA 核融合エネルギー国際会議の発表件数についても重点化後、共同研究の成果に関する発表件数は顕著に増加しており、かつ、成果発表が相手機関の研究者によって行われる比率が高い。平成18年の第21回 IAEA 核融合エネルギー国際会議ではJT-60 共同研究の成果として9件を発表し、内4件の発表が大学等の研究者によって行われた。（木村晴行）

## 4. 共同研究の主な成果

### 4.1 中心ソレノイド無し運転の開発

トカマク方式核融合炉の設計において、中心ソレノイド (CS:Center Solenoid) を用いずにプラズマ電流を立ち上げ、維持することができればより高磁場でコンパクトな核融合炉の実現が可能となる。また外部からの電流駆動だけでなく、自発電流（ブートストラップ電流）を利用して電流を立ち上げる（ブートストラップオーバードライブ）ことができれば、加熱・電流駆動設備の簡素化および循環電力の低減にもつながり、核融合炉の経済性の改善が可能となる。本研究では、CS 無し運転の実証および自発電流による電流立ち上げを目指して、高瀬を中心として平成14年度より共同研究を進めてきた。

平成14年度には、九州東海大学の御手洗の検討をもとに、高周波入射と合わせて垂直磁場コイルおよび三角度制御コイルの電流を時間変化させて磁束をプラズマに注入することにより、プラズマ電流を立ち上げることから始めた。その結果、電子サイクロトロン波 (ECRF) 単独、あるいは低域混成波 (LHRF) と組み合わせて入射中に、垂直磁場コイルおよび三角度制御コイルの電流変化を最適化する

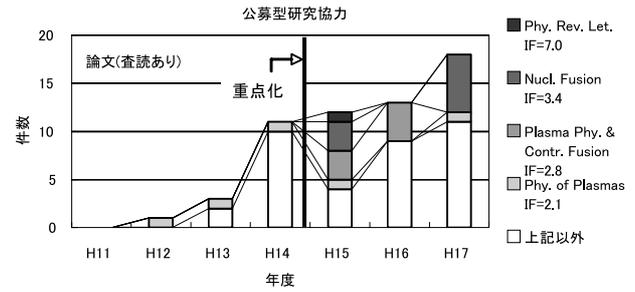


図14 JT-60 共同研究に係る査読付き論文発表件数の年次変化。

ことにより、CS を用いずにプラズマ電流を生成し、立ち上げることに成功した。さらにこの高周波によって立ち上げた低密度プラズマを高密度化し、中性粒子ビーム (NB) で加熱することにより高ベータプラズマへと移行させることに成功した。このプラズマは内部輸送障壁 (ITB: Internal Transport Barrier) と H モードを併せもつ高い閉じ込め性能をもつばかりでなく、90%以上という極めて高い自発電流割合をもつことがわかった[10-12]。この放電の波形を図15に示す。この成果はフランスのリヨンで行われた「第19回 IAEA 核融合エネルギー国際会議」でポストデッドライン口頭発表論文に採用された[11]。

平成15-16年度には、三角度制御コイルのトラス内側に巻いてあるターンも不使用とし、完全なCS 無し状態でのプラズマ電流の立ち上げを実証した。さらに高周波、特に電子サイクロトロン波と垂直磁場の立ち上げの組み合わせによるプラズマ電流立ち上げの詳細なスキャンを行った。これにより、十分な ECRF パワー (JT-60 の場合は約 1 MW) を用いれば、真空容器中にポロイダル磁場のヌル点が無い場合でも垂直磁場の立ち上げとの併用により、プラズマ電流を生成できることを示した。また、共同研究のもう一つの課題であるブートストラップオーバードライブの実証に向けた放電作りを進めた。その結果、過渡的にはあるが、自発電流がほぼ100%あるいはそれ以上であると考えられるプラズマを得た。これらの成果は、ポルトガルのヴィラモウラで行われた「第20回 IAEA 核融合エネルギー国際会議」で発表された[13, 14]。

ここまでの成果を踏まえ、平成17-18年度には垂直磁場の立ち上げも用いず、ECRF のみでプラズマ電流を立ち上げることに新たに挑戦した。この実験には、京都大学の前川らが、低アスペクト比トカマク装置 LATE[15]で行ってきた電流立ち上げの実績を生かして共同研究に参加した。前川らのグループによる真空磁場配位の検討をもとに、新たな垂直磁場コイルと三角度制御コイルの結線を用い、真空磁場配位の最適化を行った。その結果、ECRF パワーのみにより約 18 kA のプラズマ電流を生成することに成功した。一方、ブートストラップオーバードライブ実証研究も、フラックス一定制御等の新たなフィードバック制御を織り込んで進められた。その結果、外部からの磁束の出入りが無い状態で自発電流によると考えられるプラズマ電流の上昇を観測することに成功した。また、プラズマの自律性が強い、自発電流が支配的な放電におけるプラズマの振る舞いを調べた。高自発電流割合プラズマに関する研

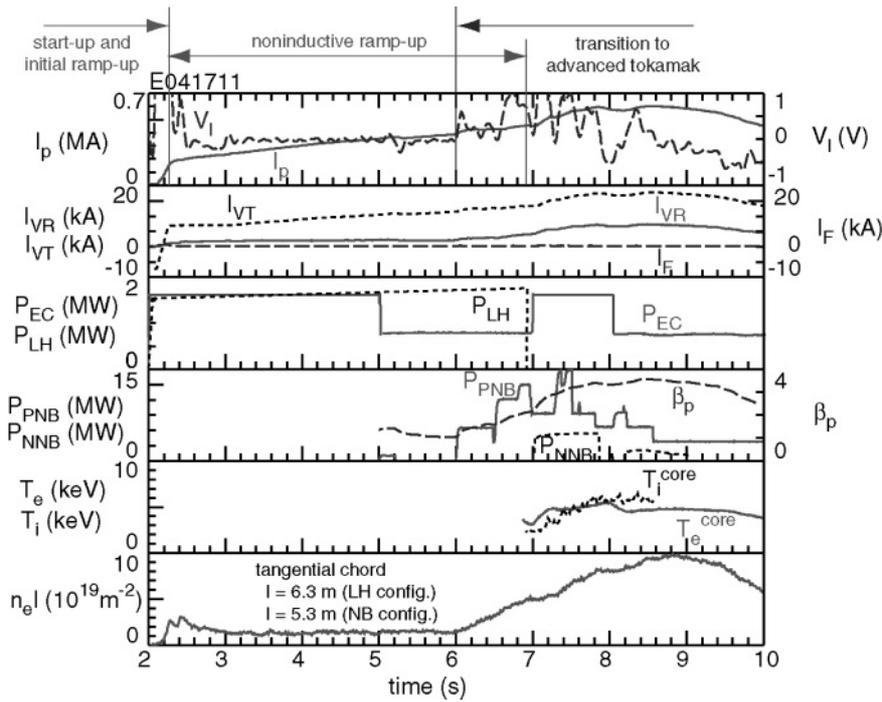


図15 高周波でプラズマを生成し、プラズマ電流を立ち上げ、NB加熱により高密度、高ベータプラズマへと移行させた放電の典型波形。図中の記号の意味は以下のとおりである；プラズマ電流 ( $I_p$ )、一周電圧 ( $V_l$ )、垂直磁場コイル電流 ( $I_{VR}$ )、三角度制御コイル電流 ( $I_{VT}$ )、OHコイル電流 ( $I_F$ )、EC/LH/正イオン源NB/負イオン源NBパワー ( $P_{EC}/P_{LH}/P_{PNB}/P_{NNB}$ )、ポロイダルベータ ( $\beta_p$ )、電子/イオン温度 ( $T_e/T_i$ )、線積分電子密度 ( $n_e l$ )。

究成果は、中国の成都で行われた「第21回IAEA核融合エネルギー会議」で口頭発表された[1]。

本共同研究は、主に大学側による事前の検討と機構研究者の放電開発経験の協調により成果を生み出した成功例であるといえる。  
(高瀬雄一, 井手俊介)

#### 4.2 電子サイクロトロン波によるMHD制御

新古典テアリングモード (NTM: Neoclassical Tearing Mode)はプラズマベータ値を制限する電磁流体力学的不安定性の1つであり、その抑制・安定化が高ベータプラズマを安定に維持するための重要な課題として位置づけられている。NTMは、磁気島内の圧力分布が平坦化するためにブートストラップ電流が流れなくなり、その効果により磁気島の成長が助長される。電子サイクロトロン (EC) 波入射による電流駆動 (ECCD)は局所的に電流駆動を行うことができる特徴を有しており、NTMの発生により欠損したブートストラップ電流を補償することが可能であることから、NTMを安定化する有力な手法と考えられている。JT-60Uの高 $\beta_p$  Hモードにおいては、 $m/n = 3/2$ や $2/1$ のNTMが発生し、高ベータプラズマの長時間維持を妨げる原因となっている ( $m$ はポロイダルモード数、 $n$ はトロイダルモード数)。本協力研究では、ECCDによるNTM安定化の物理機構の解明や安定化手法の確立を目的とし、高 $\beta_p$  H-modeプラズマにおいて発生した $m/n = 3/2$ のNTMの安定化に関する実験およびシミュレーションを行った。

ECCDによりNTMを能動的に安定化する場合、NTM発生位置 (磁気島中心) に高精度でECCDを行う必要がある。ECCD位置が磁気島中心から数cmずれると安定化効果が激減することが指摘されていて、JT-60の実験でも観

測されていた[16]。NTM発生位置は電流分布の変化とともに移動することから、実時間でECCD位置を最適化する必要がある。JT-60では、NTM発生位置を実時間で同定し、EC波入射位置をミラー駆動により最適化するシステムを開発した。このシステムにより $m/n = 3/2$ のNTMを完全に安定化し、ベータ値および閉じ込め性能を改善することに成功した[17]。ミラー駆動によるNTM安定化はITERにおいても想定されていて、この成果はミラー駆動方式を世界で初めて実証するものとして重要である。

さらに、NTM発生前にECCDを行いその発生を抑制するという新しい運転方式の開発も行った。このECCDを早期ECCD (preemptive ECCD)と呼ぶ。図16はECCDによるNTM安定化実験でのプラズマ放電の時間発展例である。同じECパワー (2.3 MW) を入射した場合でも、NTM発生前にECCDを行った場合にはNTMの磁気揺動強度をより効果的に抑えられることが明らかになった[18]。NTMの成長が飽和したときにECCDを行った場合 (飽和期ECCD)と比較すると、同じECパワーに対して磁気揺動強度は小さくなっている。また、早期ECCDの場合、飽和期ECCDの場合の約8割のECパワーでNTMを完全に安定化できることも明らかになった。さらに、磁気島の発生時期も早期ECCDではECパワー増大とともに遅れが観測された。このような早期ECCDの効果を実験的に明らかにしたのは本研究が世界で初めてであり、米国のDIII-D装置の追試においても同様の効果が確認された[19]。また、EC駆動電流分布幅が飽和磁気島幅と同程度の場合、ECCD位置が磁気島幅の半分程度ずれた場合は安定化効果が小さくなり、飽和期ECCDと同様の精度でECCD位置を最適化

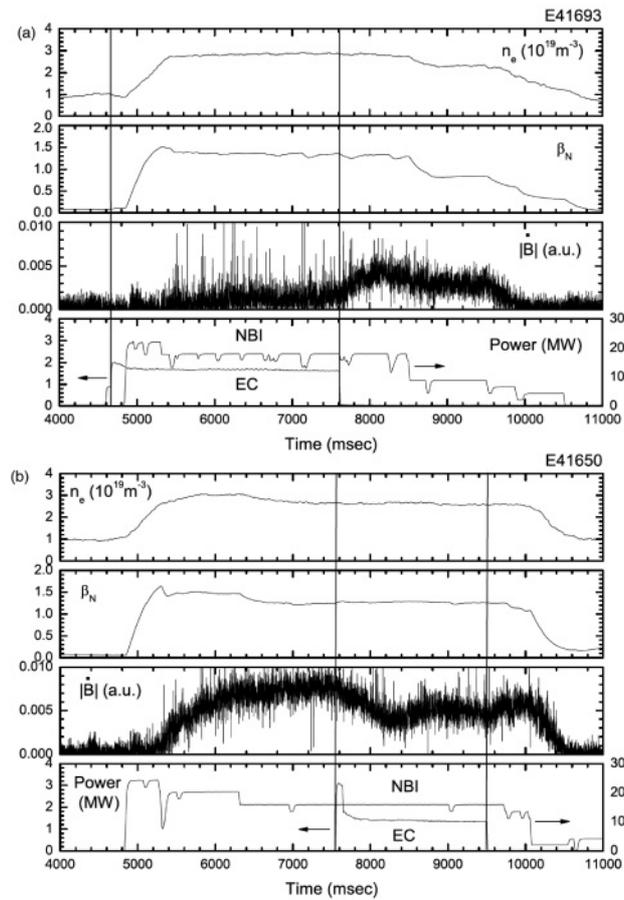


図16 ECCDによるNTM安定化実験, (a) 早期入射, および(b)飽和期入射における放電[18]. 各図上段より, 線平均電子密度( $n_e$ ), 規格化ベータ値( $\beta_N$ ), 磁場揺動強度( $|B|$ ), ECおよびNBパワーである. また, 両放電において, プラズマ電流, トロイダル磁場, 安全係数( $q_{95}$ )はそれぞれ, 1.5 MA, 3.7 T, 3.8である.

する必要があることも明らかになった. また, さらにベータ値の高い領域 ( $\beta_N = 3$ ) において早期 ECCD を行った結果,  $m/n = 3/2$  NTM の発生を抑制し高閉じ込めプラズマ ( $H_{89PL} \sim 2.1$ ) を維持することに成功した[20, 21].

これらの NTM 安定化効果の物理機構を解明するために, NTM を記述する修正ラザフォード方程式を 1.5 次元の輸送解析コード TOPICS に組み込んだ. その結果, 磁気島の時間発展を模擬することが可能となり, 実験で観測される  $m/n = 3/2$  の NTM の時間発展をよく再現できることが明らかになった. また, ECCD による電流分布の変化に起因する有理面の径方向の移動もシミュレーションにより定量的に評価できるようになった結果, 電流分布の時間変化に合わせて ECCD 位置を最適化することが重要であることが明らかになった[21, 22]. (長崎百伸, 諫山明彦)

#### 4.3 プラズマ-壁相互作用

JT-60 におけるプラズマ-壁相互作用に関する共同研究は平成13年度より開始された. JT-60 はトリチウムを分析できる国内唯一の核融合プラズマ実験装置であり, 全国12の大学・研究機関から合わせて53人の研究者, 大学院生が参加し, その得意とする分析技術, 分析装置 (イメージングプレート, 昇温脱離装置等) を持ち込んでプラズマ-壁相

相互作用の研究を総合的に実施した. ここでは, これまでに得られている結果のうち炭素の損耗・再堆積と水素 (トリチウム) の蓄積に関連する結果をまとめた. 詳細は[23]を参照されたい. また表1に得られた結果をJETで得られている結果と比較した[23, 24].

- (1) JT-60内でD-D反応により生成された1 MeVのトリチウム(T)の約半分は軌道損失およびリップル損失機構によりプラズマ対向壁の表面から1  $\mu\text{m}$ 以上の深さに打ち込まれ蓄積されていた. そしてそれらの分布は第1壁水平位置, 内外のダイバータ, およびバップル板そしてダイバータドーム部に多くなっていた[25]. したがってJT-60のトリチウム分布はITER等の燃料として導入されるトリチウムの挙動を反映せず, むしろ高エネルギー粒子の挙動研究に利用できる[26]. もちろん残りの半分はプラズマ温度まで熱化され, それらはプラズマ対向壁表面に入射し, いったんは壁表面に蓄積されるものの, 引き続き多量の重水素の入射により置き換えられてしまうため, プラズマに面するタイル表面近傍にはトリチウムは存在しない.
- (2) 一方D(H)の大半は炭素再堆積層に蓄積されており, その水素濃度は  $(\text{H}+\text{D})/\text{C}$  の原子比で0.03程度であった. この水素濃度は表1からわかるようにJETやTFTRで報告されている1.0~0.4に比べて極めて小さい[27]. これはJT-60が通常300°Cで運転されており, かつダイバータは強制冷却されていないため, タイル表面の温度がさらに上昇しているためであろう.
- (3) ダイバータ領域の炭素の堆積と損耗を詳しい調査により, 外側ダイバータは損耗(最大損耗深さ約70  $\mu\text{m}$ )され, 内側ダイバータ部では再堆積(最大230  $\mu\text{m}$ 程度)していることが見いだされた[25]. トーラス全体の損耗・堆積に外挿すると, 内側ダイバータでは0.55 kgの炭素が再堆積していたのに対し, 外側の損耗は0.33 kgであったので, その差は, 第一壁が損耗されてダイバータ部に堆積したことになる[25]. いずれにしろJT-60におけるこの0.55 kgの体積量は, JETのダストだけでも1 kg(表1参照)が集められているのに比べると非常に少ない.
- (4) JT-60では再堆積や損耗の分布はトロイダル方向にかなり均一であった. JT-60のダイバータは隣り合うタイル間に段差が出ないように配置されており, さらに設置されたあと内部で段差がでないように研磨されている. これによりトロイダル方向のいわゆるエッジ効果が極めて少なく, 炭素の損耗が抑えられていることも損耗/再堆積が少ない原因の一つだと思われる.
- (5) JT-60では, 真空容器中ダイバータ付近はもとより, 排気ダクト等の低温, 遠隔部でもダストの回収はわずかで再堆積もほとんど見られなかった(表1参照)[23, 28]. JETでは真空容器中ダイバータ近傍で約250 g, 全体で1 kgものダストやデブリが回収されているのと比べると非常に少ない. これはJT-60が通常全体を300°Cに保って運転しているため, 再堆積層中の水素濃度が低くまたその構造が黒鉛に近く, かつ基板にしっかり付着しておりはがれてダストになることが少ないためと考えられている

表1 JET MkIIA ダイバータと JT-60 W型ダイバータとの比較 ([23, 24]による)。

	JET MkIIA ダイバータ	JT-60U W型ダイバータ
内側ダイバータでの炭素堆積速度	5 g/h 6.5 × 10 <sup>20</sup> atoms/s	6 nm/s 3 × 10 <sup>20</sup> atoms/s
外側ダイバータでの炭素タイル損耗速度	2.3 nm/s	0.7 nm/s
再堆積層の水素濃度 (D/Cまたは(H+D)/C)	0.4-0.1	<0.05
プラズマに面していない場所での特に堆積の多い所	内側ダイバータの排気口周辺およびクライオポンプ入口のルーバー部	ダイバータ底部
集められた炭素ダスト量	1 kg	7 g
ダイバータ排気口の位置	水平方向内側	底部
トロイダル方向のタイルとタイル間段差	数 mm の段差	段差が出ないように研磨
ダイバータ構造の温度	水冷構造のためタイル温度は 500 K 以下	真空壁温度の 600 K よりやや高い温度

る。

- (6) JT-60 では水素の壁飽和が見られている [29]。水素の蓄積はプラズマに面する部分でのダイナミックなもの、プラズマには直接面しない領域で形成される炭素再堆積に取り込まれていくスタティックなものに分けられる。ダイナミックな水素蓄積は1回の放電中に飽和に達し得るのに対して、スタティックな水素蓄積は、ショットを重ねるにつれ増えていく。このような現象は Tore-Supra で見られている [30]。そこでは、供給する水素の約半分が常に壁のどこかへ排気されていることがわかっている。JT-60 で壁飽和が起こることは、即ちスタティックな水素蓄積が少ない、即ちプラズマに面しないところでの炭素の再堆積が少ない、ということの現れであろう。

以上のように JT-60 中における炭素および水素の輸送・堆積(蓄積)挙動はJETと比べるとかなり異なったものになっている。両者の差の原因として考えられる主なものは、作られるプラズマの差を別にすると、

- (a) ダイバータ構造の違いおよびダイバータ部の排気方法の違い  
 (b) ダイバータタイル表面温度の違い (JET では全体が 270℃程度でダイバータは水冷, JT-60 では全体が300℃でダイバータは水冷されていない)  
 (c) プラズマ対向壁の設置方法の違い (JT-60 では隣り合うタイルの間に段差がないように精度良く削られているが, JET では一枚のタイルが大きく, 隣り合うタイルに段差がある)

等があげられる。これらの結果は、ITER のダイバータの設計や、壁材料の選択に活かされている。また今後はこれらを念頭に、さらなる PMI の研究とデータの集積により、ITER での実験や引き続き DEMO 炉等の設計へ大きな寄与ができると思われる。(田辺哲朗, 宮直之)

#### 4.4 先進レーザー技術のプラズマ計測への応用

JT-60におけるYAGレーザーを用いたトムソン散乱装置

の整備は1993年から始まり、当初のレーザー性能はエネルギー 2 J, 繰り返し 10 Hz (平均出力 20 W) であった。実験側の要請から、長時間分解測定が求められ、その後レーザーの高繰り返し化改造を行った。高出力固体レーザーの高繰り返し化で問題となるのは、励起源であるフラッシュランプのエネルギーの大半が熱としてレーザーロッドに伝わり、熱ひずみによりレーザー光の波面が乱されることである。このことが固体レーザーの高出力化を妨げる原因の一つになっている。たとえば、レーザーロッドの温度分布が屈折率分布を引き起こし、あたかも凸レンズのように振る舞い(熱レンズ効果)、思わぬところでレーザー光が集光してしまい、熱レンズの焦点近傍にある光学コーティングや光学素子が破壊されるのがその一例である。原研側ではレンズ系の組み合わせだけで、熱レンズ効果を補正し高出力化を図ったが、1.5 J, 30 Hz (45 W) まで上げるのが限界で、1997年頃にはこれ以上の高繰り返し化には新しい技術の導入の必要性を感じていた。

この問題を容易に解決してくれるのが、誘導プリラン散乱位相共役鏡(以下、位相共役鏡と略す)であることは知っていた。通常の鏡で反射した光は、単に方向が変わって広がりながら進むが、位相共役鏡で反射した光は位相が時間を遡るようにもと来た道を返り、往路で受けた波面ひずみが復路で打ち消される。位相共役鏡を用いれば波面の乱れを自動補正してくれるので、非常に質の高いレーザー光を発生させ、増幅できる。そこで、原研では SiCl<sub>4</sub> を媒質とするロシア製の位相共役鏡を購入し、高出力化を図ったが、原研のレーザーのパワーレベルは相当に高く、媒質内で絶縁破壊が発生して使い物にならなかった。原研の担当者は位相共役鏡に関する文献を調べるうちに、阪大に優れた位相共役鏡の技術が有ることがわかった [31]。そこで、原研の上司に阪大と協力研究を行いたいと提案したが、所外との積極的な協力研究の体制が整っておらず、その提案は却下された。その後、原研側の方針が変わり協力研究の体制が整い、原研担当者から阪大側へラブコールを送り、2000年から協力研究をスタートした。

原研の YAG レーザーを用いて位相共役鏡の反射率を測った結果、阪大で開発した位相共役鏡は入射エネルギー 1.5 J, 繰り返し 30 Hz の条件で絶縁破壊することなく、98% の高反射率を持つことを確認し、世界最高の反射性能を示すことがわかった [32]。そこで、原研のレーザー装置に位相共役鏡を組み込み、像伝送やセレーテッドアパーチャーといった阪大のレーザー要素技術も導入して、光学レイアウトを改良した結果、平均出力 45 W (エネルギー 1.5 J, 繰り返し 30 Hz) の当初性能から、平均出力で 8 倍を超える、373 W (エネルギー 7.46 J, 繰り返し 50 Hz) の性能を得ることができた(図17参照) [33]。フラッシュランプ励起の Q スイッチレーザーとしては、これも世界最高レベルの性能である。同時にビーム品質(集光輝度)も良くなり、さらに集光性能で 8 倍の増強を見た。結果としてプラズマ中では数十倍の集光出力密度の改良がなされていると思われる。

当初は、レーザーの高出力化を目指して協力研究を進めてきたが、これとは別に位相共役鏡を散乱計測に直接応用

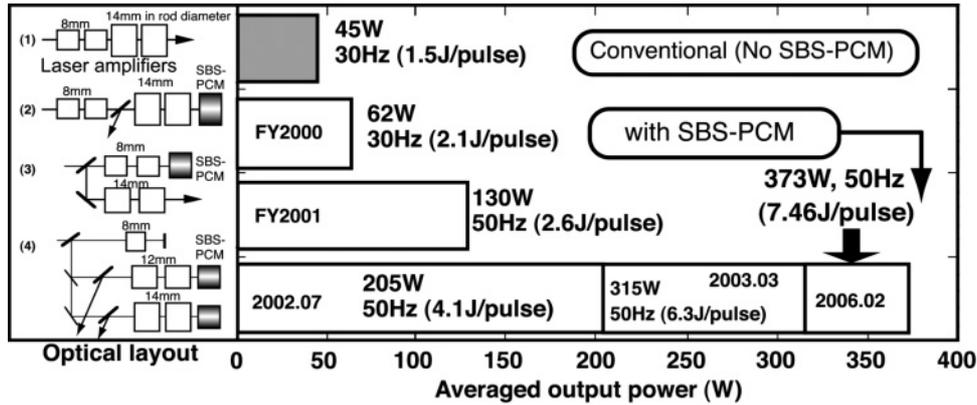


図17 レーザー性能の進展。図の左側の欄にレーザー増幅器の光学レイアウトの変遷(□はレーザー増幅器を表し、レーザーロッドの径も併せて記載した。SBS-PCMは誘導プリラン散乱位相共役鏡を表す)、図の右側の欄にそれに伴う最大平均出力(=出力エネルギー×繰り返し周波数)の変遷をプロットした。2000年から研究協力による既存のレーザー装置の改造を開始した。位相共役鏡を原研のレーザーに組み込み改良を重ねた結果、当初の8倍を超える平均出力、ビーム品質として8倍の集光性向上を得た。

できることを思いついた。プラズマを透過したレーザー光は殆どエネルギー損失を受けていないので、それを位相共役鏡で折り返し、その光を再度散乱計測に再利用し2倍近い散乱光を得る「ダブルパストムソン散乱計測」を考案し、その有効性をJT-60実験で実証した。この計測法では、位相共役鏡で反射されたレーザー光がもと来た道を忠実にたどることから、一度位置合わせをすれば、迷光の増大もなく、アライメントフリーで計測できるメリットがある。さらに、ダブルパストムソン散乱を発展させ、一対の位相共役鏡間に電気光学効果でレーザー光を閉じ込め、数倍以上の散乱光を得る「マルチパストムソン散乱計測」も提案し、両機関共同で特許を取得した[34-36]。

研究開発、装置改造が好調に進んだのには理由がある。那珂研究所のトムソン散乱計測チームには優秀な光学、電子、機械、工作技術職員チームがついており、結構長いレーザー整備期間を持っていた。これは阪大の核融合レーザーチームの仕事の進め方とよく似ている。プラズマ研究者からの依頼をしっかりと把握し、自分達の知恵も入れて実験を遂行してくれるのである。大阪チームは年に2-3度しか出張しないが、レーザー装置改良は年間通して好調に進み、レーザー装置も高い稼働率で稼働していた。また、レーザー稼働上の各種問題点が逐一大阪にも報告され、大阪チームも根気よく解決策を探すのである。2年も経つと原研の研究者の光学研究の力量が格段に上がり、大阪チームは凄く楽になった。その間にも大阪で経験した高出力固体レーザーの開発研究の知恵はそっくり那珂研に伝えられて実行されてきた。

阪大レーザー研におけるレーザー核融合で培われたレーザー技術と、JT-60でのプラズマ計測技術が融合した本協力研究の成果は、当学会でも評価され第10回技術進歩賞を賜った。本協力研究で開発されたレーザーの設計概念はITERの周辺トムソン散乱計測用レーザーに用いられることになっている。現在の共同研究のテーマはITERまたはその先をいく診断用レーザー開発に研究対象が移動し、引き続き研究協力を進めている。(中塚正大, 波多江仰紀)

#### 4.5 トカマクとヘリカルと比較研究

トロイダル系閉じ込め装置における輸送現象の統合的理解を目的として、トカマク装置JT-60とヘリカル装置LHDでの電子系内部輸送障壁(電子系ITB)の形成条件、およびそこでの輸送特性の比較研究を行った。トカマク装置では、弱磁気シアおよび負磁気シアプラズマにおいて、熱・粒子輸送が著しく低減するITBが形成される。ITBを有するプラズマは、優れた閉じ込め性能と高い自発電流割合が得られるため、定常トカマク核融合炉での運転モードに想定されている。そのため、ITBの形成機構や輸送特性に関する研究が重点的に進められている。一方、中心負磁気シアを固有の性質として持つヘリオトロン・トルサトロン型のヘリカル装置では、イオンルートから電子ルートへの遷移に伴い、電場シアの形成と顕著な異常輸送の低減(電子系ITBの形成)が観測され、その物理機構が解明されつつある。両装置に共通した物理機構の包括的解明、および各装置固有の物理機構の体系化は、核融合プラズマの基盤研究に資するばかりではなく、トカマク・ヘリカル双方のプラズマ性能向上に著しく貢献するものである。

最初に、JT-60の負磁気シアプラズマ(プラズマ電流 $I_p = 1.0$  MA, トロイダル磁場 $B_T = 3.7-3.8$  T)およびLHDプラズマ( $B_T = 1.52$  T)において、電子系ITBの形成条件を調べた[37]。両プラズマでは、中心領域に電子サイクロトロン(EC)波加熱を行うことにより、電子温度分布にITBが観測される。EC波加熱パワー( $P_{ECH}$ )を増加させた時の規格化電子温度勾配( $R/L_{Te}$ )の変化を、両プラズマにて系統的に調べた。ここで、 $R$ は大半径、 $L_{Te}$ は電子温度勾配のスケール長(= $-T_e/\nabla T_e$ )である。図18(a)に示すように、LHDでは密度で規格化したEC波加熱パワー( $P_{ECH}/n_e$ )が $1.2-1.4 \times 10^{-19}$  MWm<sup>3</sup>の範囲において、 $R/L_{Te}$ に明確な遷移が観測される。一方、JT-60では $P_{ECH}/n_e$ の増加に対して $R/L_{Te}$ が連続的に増加しており、遷移現象は見られない。 $P_{ECH}/n_e < 5$ の範囲では、 $R/L_{Te}$ の最大値は両装置で同程度である。遷移現象の有無は電子系ITBの形成機構の違いに起因していると考えられる。LHDでは、イオンルートの小さな負電場から電子ルートの大きな正電場への速い遷移が

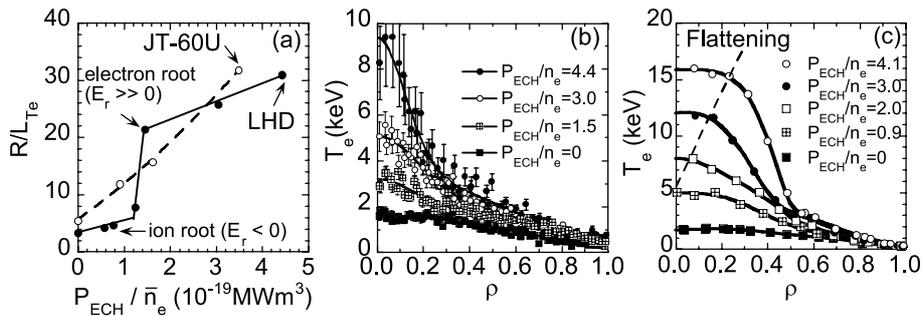


図18 (a)規格化電子温度勾配 ( $R/LT_e$ ) の密度で規格化した電子サイクロトロン波加熱パワー ( $P_{ECH}/n_e$ ) 依存性. (b)LHD および (c) JT-60 の電子サイクロトロン波加熱パワーを変化させた時の電子温度分布の変化[37].

起こることにより電子系 ITB が形成されると考えられる。一方、JT-60 の負磁気シアプラズマでは、負磁気シアの形成そのものが電子系 ITB 形成に関連していると考えられる。このことは、LHD では電場シアが、JT-60 では磁気シアが電子系 ITB 形成に重要であることを示唆している。また、ITB が形成された後の電子温度分布にも、図18(b), (c) に示すように両装置で違いが見られる。JT-60 では、強い ITB の内側で平坦な分布が観測されるが、LHD では観測されない。JT-60 では中心の安全係数が大きくなるのに対して、LHD では中心の安全係数分布が比較的平坦であることに関連していると考えられる。しかしながら、最近の JT-60 の実験において、中心領域で平坦な安全係数分布の場合でも平坦な温度分布が観測されており、両者の違いについてはさらに調べる必要がある。

次に、ITB での電子系の熱輸送特性を明らかにするために、ペレット入射により周辺部にコールドパルスを導入し、その内側領域への伝搬を用いて過渡輸送特性を調べた[38]。LHD, JT-60 共に ITB 領域でコールドパルスによる温度減少が、その外側領域に比べて大きくなることを観測した。この時の電子系の熱拡散係数  $\chi_e$  の  $T_e$  および  $\nabla T_e$  依存性を、非線形熱輸送モデル ( $\chi_e \propto T_e^\alpha |\nabla T_e|^\beta$ ) を用いて調べた。その結果、 $\nabla T_e$  への弱い依存性 ( $\beta \sim 0$ ) と  $\chi_e$  の  $T_e$  に対する負の依存性 ( $\alpha < 0$ ) を明らかにした。特に、JT-60 では、ITB の足部周り (外側領域も含めて) で  $\chi_e$  の  $T_e$  に対する負の依存性が見られている。ITB プラズマでは、観測される領域に違いがあるものの、両プラズマで共通な物理現象が観測されている。ITB 無しプラズマにおいては、LHD では  $\chi_e$  は  $T_e$  に主に依存するのに対して ( $\alpha = 3/2 - 5/2$ ,  $\beta \sim 0$ )、JT-60 では  $\chi_e$  は  $T_e$  と  $\nabla T_e$  の両方に依存しており ( $\alpha = 0.5 - 2$ ,  $\beta = 1.6 - 3$ )、両装置で異なる輸送特性が観測されている。

さらに、輸送特性が変化する過渡状態での輸送解析 (ダイナミック輸送解析) を、ITB が存在する JT-60 負磁気シアプラズマおよび LHD プラズマにて行った[39]。両装置において、 $\chi_e$  が減少した内側の領域で  $\chi_e$  が増加する現象が観測され、弱くて広い ITB と強くて狭い ITB の遷移およびその逆遷移が自発的に起こることを明らかにした。このことは、輸送特性の非局所性およびいくつかの輸送レベルの存在を示すものである。

以上のように、両装置で共通、および異なる物理現象が

明らかになってきており、今後トロイダル系閉じ込め装置における輸送現象の統合的理解を目指してさらに研究を進める必要がある。(居田克巳, 竹永秀信)

## 5. おわりに

平成15年1月の核融合研究ワーキンググループの報告を踏まえ、それまで原子力機構職員がほとんど利用していた世界最高レベルのトカマク型核融合実験装置 JT-60 の運用が原子力機構と国内核融合コミュニティによる共同企画・共同研究に転換して以来4年弱が経過した。この間予算的には減少の一途ではあったが、国内研究者の強い要請を踏まえ最低限の実験運転時間を確保することができ、欧州の主力装置 JET の 1/4 の予算でも多くの国内共同研究論文の投稿により第21回 IAEA 核融合エネルギー会議(2006年)での論文採択数が装置別で最大になるなど、我が国のトカマク共同研究重点化装置としての役割を果たすことができたことは原子力機構の研究実施責任者として望外の喜びである。また、4節で述べた代表的成果以外にも多くの国内研究者が JT-60 共同研究を通じてトカマク研究の最先端で活躍できるようになったことは、旧核融合研究委員会の歴代委員長 (高村秀一名大教授, 後藤誠一阪大教授, 大竹正明東北大教授) と委員各位、並びに旧原研施設利用協議会核融合専門部会、旧核融合研究協力委員会の委員長 (濱田核融合科学研究所教授) と委員各位の尽力の賜物であり、この場を借りて深く謝意を表したい。

JT-60 は、文部科学省の重点化政策によって我が国が保有する唯一の本格的トカマク装置となった。我が国のトカマク研究への貢献と ITER 計画での発言権確保のために JT-60SA への改造の組立てが始まる5年後まで4年間実験運転を継続することが計画されている。多くの研究者が共同研究に応募され、引き続き多くの優れた研究成果を上げられることを期待する。(菊池 満)

## 参考文献

- [1] Y. Takase, S. Ide, Y. Kamada *et al.*, 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu), EX/1-4 (2006).
- [2] H. Haginoya, T. Aoyagi, Y. Watanabe, M. Yamanaka and K. Tani, Outline and Handling Manual of Fusion Experimental Data Monitor System DAISY (version II), JAERI-M 94-040 (1994) [in Japanese].

- [ 3 ] K. Kurihara, *Fusion Eng. Des.* **51-52**, 1049 (2000).
- [ 4 ] S. Tsuji and K. Hayashi, MHD equilibrium analysis method of JT-60 based on magnetic measurements, JAERI-M 86-006 (1986) [*in Japanese*].
- [ 5 ] T. Takeda and T. Tsunematsu, A numerical code SELENE to calculate axisymmetric toroidal MHD equilibrium, JAERI-M 8042 (1979).
- [ 6 ] H. Shirai, K. Shimizu, N. Hayashi, H. Itakura and K. Takase, Analysis of Plasma Parameter Profiles in JT-60 U, JAERI-Data/Code 2000-040 (2000) [*in Japanese*].
- [ 7 ] K. Tani, M. Azumi and H. Kishimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **50**, 1726 (1981).
- [ 8 ] K. Tani, M. Azumi and R.S. Devoto, *J. Comp. Phys.* **98**, 332 (1992).
- [ 9 ] H. Shirai, T. Takizuka, O. Naito, M. Sato, N. Isei, Y. Koide, T. Hirayama and M. Azumi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **64**, 4209 (1995).
- [ 10 ] Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **78**, 719 (2002).
- [ 11 ] Y. Takase, S. Ide, S. Itoh *et al.*, *Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conf.* PD/T-2, IAEA, Vienna (2003).
- [ 12 ] S. Shiraiwa, S. Ide, S. Itoh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 035001 (2004).
- [ 13 ] Y. Takase, S. Ide, S. Itoh *et al.*, *Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf.* EX/P4-34, IAEA, Vienna (2005).
- [ 14 ] M. Ushigome, S. Ide, S. Itoh *et al.*, *Nucl. Fusion* **45**, S48 (2005).
- [ 15 ] H. Tanaka, T. Maekawa, M. Uchida *et al.*, *21th IAEA Fusion Energy Conference* (Chengdu), EX/P6-6 (2006).
- [ 16 ] A. Isayama *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **42**, L37 (2000).
- [ 17 ] A. Isayama *et al.*, *Nucl. Fusion* **43**, 1272 (2003).
- [ 18 ] K. Nagasaki *et al.*, *Nucl. Fusion* **43**, L7 (2003).
- [ 19 ] R.J. La Haye *et al.*, *Nucl. Fusion* **45**, L37 (2005).
- [ 20 ] A. Isayama *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 056117 (2005).
- [ 21 ] K. Nagasaki *et al.*, *Nucl. Fusion* **45**, 1608 (2005).
- [ 22 ] N. Hayashi *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 613 (2004).
- [ 23 ] 田辺哲朗: *プラズマ・核融合学会誌* **82**, 196 (2006).
- [ 24 ] T. Tanabe, *Fusion Eng. Des.* **81**, 139 (2006).
- [ 25 ] Y. Gotoh, T. Tanabe, Y. Ishimoto *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **357**, 138 (2006).
- [ 26 ] T. Tanabe, K. Sugiyama, C. H. Skinner *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **345**, 89 (2005).
- [ 27 ] T. Shibahara, T. Tanabe, Y. Hirohata *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **357**, 115 (2006).
- [ 28 ] J. Sharpe, P.W. Humrickhouse, C.H. Skinner *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337-339**, 1000 (2005).
- [ 29 ] H. Takenaga, T. Nakano, N. Asakura *et al.*, *J. Nucl. Fusion* **46**, S39 (2006).
- [ 30 ] C. Grisola and the Tore Supra team, *J. Nucl. Mater.* **266-269**, 146 (1999).
- [ 31 ] H. Yoshida *et al.*, *Appl. Opt.* **36**, 3739 (1997).
- [ 32 ] H. Yoshida *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 439 (2003).
- [ 33 ] H. Yoshida *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L1038 (2004).
- [ 34 ] T. Hatae *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **80**, 870 (2004).
- [ 35 ] T. Hatae *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 10E508 (2006).
- [ 36 ] 波多江仰紀, 他: 日本国特許 第3699682号 (2005).
- [ 37 ] K. Ida *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **46**, A45 (2004).
- [ 38 ] S. Inagaki *et al.*, *Nucl. Fusion* **46**, 133 (2006).
- [ 39 ] K. Ida *et al.*, *Proc. 21st Int. Conf. on Fusion Energy 2006* (Chengdu, 2006) (Vienna: IAEA) IAEA-CN-149/EX/P4-39.