

## X. プラズマ研究グループ

教授	今井剛、中嶋洋輔、坂本瑞樹
准教授	吉川正志、假家強、南龍太郎
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴
助教	池添竜也
シニアスタッフ	平田久子、大川和夫
大学院生	29名

共同研究者	
准教授	片沼伊佐夫、江角直道（物理工学域）
研究員	市村真、王小龍、市村和也

研究協力者	
技術専門職員	杉山昭彦、和所保規、遠藤洋一、嶋頼子、千勝雅之
研究支援推進員	岡崎昇
大学院生	4名

### 【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施された大学の法人化に伴う筑波大学の「中期計画」に則り、筑波大学が世界に広く貢献できる優れた研究成果の創出の一端を担うことを使命として、下記の様に研究の新展開を図ることを基本方針・基本理念としている。

法人化後の新制度のもと、グループ教職員学生一丸となり研究に邁進し、当該グループとして、数理工学物質科学研究科の中期目標・中期計画の推進はもとより、国立大学法人筑波大学第Ⅱ期中期目標・中期計画の「I 大学の教育研究等の質の向上に関する目標を達成するためにとるべき措置」の2の（2）の「研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置」に、第Ⅰ期に引き続き「双方向型共同研究等の新しい取組みを積極的に支援する。」と明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指すことは、法人化後の一貫した研究姿勢である。

更に、これらの新たな物理究明は、コアの高温のプラズマ現象のみならず、核融合炉に必須の境界プラズマ研究に展開し、また、自ら開発した高電力ジャイロトロンを用いて、イオン閉じ込め電位、電子・イオン温度の上昇に加えて、境界／ダイバータプラズマの制御につながる成果を得ている。

また、上記「筑波大学 中期計画」等に基づき、平成16年度から新たに立ち上った

双方向型共同研究の枠組みを背景に、第Ⅱ期中期計画においても、核融合科学研究所と、筑波大学、京都大学、大阪大学、九州大学の4大学を中心に、近年新たに加わった東北大学、富山大学、更に講座単位の各大学との、共同研究を積極的に推進し、普遍性の高い学術成果と、それに基づく核融合実用への基盤研究を進めている。

学内にあっては、数理物質系のプラズマ研究グループ、並びにシステム情報系のグループをはじめとする連携協力研究・教育、その他の学内の関連グループとの共同研究、更には国内・国外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力の基に、顕著な成果の創造・推進を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、教職員学生一丸となり、日夜努力を積み重ねている。

## 【2】プラズマ研究の研究目的と意義・位置づけ

物理学専攻のプラズマ実験グループが主体となって研究しているプラズマ研究センターでは、「プラズマ物理学、特に電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上、並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、中期計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。本研究目的は、核融合実用に必要不可欠で喫緊の課題である「数億度の高性能プラズマと常温壁の両立の理工学研究」を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行うという、プラズマ核融合分野全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

この研究は、延いては国際熱核融合実験炉 ITER の心臓部である、核融合炉心プラズマの高閉じ込めHモードや、環状型プラズマのエネルギー閉じ込めの改善で注目を集めているドリフト波などの揺動、内部輸送障壁 (ITB) の形成機構とその効果の究明、また、核融合炉の成否を決めるとも言える境界／ダイバータプラズマの制御など先端的な極めて重要な研究課題という意義・位置づけを併せ持っている。これらの重要課題に対し、装置端部を持つミラー型実験装置は、電子を選択的に電子サイクロトロン加熱により高温・高速化し、ミラー端部に対しマイナスの電荷を持つ電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部のプラス電荷を持つイオンの過不足による電位／電場を自在に形成・制御が可能、また、ミラー特有の端損失の制御という、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること」、こうしたミラー装置独自の特色を活かした研究を推進している。

これらの研究を具体的に推進するために、ジャイロトロンやビームプローブといった世界最先端の加熱機器や計測機器の開発研究を進めるとともに、それらを用いた研究により、上記で述べた研究課題に関する物理機構解明に不可欠な、プラズマ半径方向（径方向）の電位分布制御、電場分布の精密な測定による輸送研究、また、ミラー端部で発生する高熱流束によるダイバータ模擬研究が可能となり、学術普遍性の高い、極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された 国際連

合の原子力部門である国際原子力機関（IAEA）の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。また、最近では、電位制御の強力なツールであるミリ波帯のマイクロ波源、ジャイロトロンの開発研究も進展し、当センターのみならず、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）にも大きく貢献し、国際原子力機関（IAEA）の「第23回～25回核融合エネルギー国際会議」で高く評価され、九州大学やプリンストン大学など、他大学や海外との共同研究へと発展しつつある。また、これらの成果の新展開とも言える境界プラズマの研究では、ITERの定常熱流束密度レベルを得、「第24回核融合エネルギー国際会議」等で斯界の注目を浴び、これを応用した共同研究が大きく進展している。

国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持った研究課題を、プラズマグループは推進し、発展・展開を見ている。すなわち、輸送障壁形成の物理機構の解明と境界プラズマ物理の解明は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・高信頼化・核融合プラズマの定常制御のために、必要欠くべからざる研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。

### 【3】研究成果の概要

#### （1）はじめに

物理学域プラズマグループでは、大学の第II期中期目標・中期計画の方針に沿って双方向型共同研究を充実し、大型タンデムミラー装置GAMMA10/PDXを用いた高性能プラズマと低壁熱負荷の両立をめざして「開放端磁場と電位／電場効果を活かしたプラズマ輸送制御と境界プラズマ現象の解明研究」を進展させている。開放端プラズマとなるトーラス系のスクレープオフ層やダイバータ・プラズマを模擬するとともに、能動的な輸送制御で境界プラズマのさまざまな現象、物理解明とそれを通じた熱負荷の軽減法とプラズマ壁相互作用の研究を実施している。平成26年度までに、ITERの定常熱負荷相当 $10\text{ MW/m}^2$ を上回る $11\text{ MW/m}^2$ の端損失熱流束を達成し、端損失プラズマ流の特性を詳細に調べるとともに、本格的なダイバータ模擬実験に向けたV字ターゲット板を持つ閉構造ダイバータ模擬モジュール（D-モジュール）の実験を開始した。水素ガスや希ガスの入射により、著しい密度の上昇と電子温度の低下を観測し、非接触プラズマ制御に向けての実験を進展させてきた。GAMMA10/PDXが、これまでにダイバータ模擬の基礎実験を担ってきた小型線形装置と比べて特徴的な点は、高磁場下において高温のイオン束を発生・制御できることにある。この特徴を活かしてダイバータ開発において最大の課題で

ある非接触プラズマの制御に関するイオン温度依存性等のデータ取得が可能であることが特徴である。これらの模擬実験の基盤となるプラズマ生成に関して、主として用いられる ICRF 加熱アンテナ系やガス入射方法を工夫することにより、端損失イオン束増大の実験を進めている。

プラズマグループのもう一つの特徴である大電力ジャイロトロンに関して、14GHz から 300GHz の広い周波数範囲における MW レベルの開発を進展させている。これまでに、双方向型共同研究における九大応用力学研究所とのセンター間連携を推進し、同研究所の球状トカマク装置 QUEST での電流駆動実験に大きく貢献している。また、プリンストン大学との共同研究に関しても、着実に進展させている。GAMMA10/PDX の実験においては、大電力長パルスジャイロトロンを用いた高熱流束生成に加えて、高繰り返しパルス運転から ELM 熱負荷の模擬による PWI に関するデータ取得を目指している。さらに、イオン流束等の増大と合わせて、東北大学、京都大学、九州大学との連携を進め、プラズマ照射に関する成果も期待できる。

大学の第 II 期中期目標・中期計画の最終年である平成 27 年度は、より詳細な計測・特性評価や物理的解釈を念頭に、各大学の研究者の多様な視点・豊富な経験と双方向型の特長を活かした研究に加え、全国の複数のセンターが連携するネットワーク型の双方向型共同研究もさらに発展させ、核融合炉に向けた必須、かつ緊急の課題を進展させることを本研究の目的とした。

## (2) ダイバータ模擬実験

図1は、GAMMA10/PDX西エンド部の真空容器と設置された昇降式のダイバータ模擬実験モジュール (Dモジュール) の概略図を示している。平成27年度には、上流側の西プラグ/バリア部に設置したICRFアンテナを用いたエンド部へ流出するイオン束の増大やイオンによる熱流束の増大の実験を進めた。図2に写真で示すように、SUS製の容器の前面から端損失プラズマ流が導入されるDモジュール内部には、V字型の0.2mm厚のタングステン製ターゲット板及び、前面の流入するプラズマを冷却し、非接触化を起こす為のガス導入系が組み込まれている。また、V字のターゲット板は、電気ヒータにより最大300℃まで温度を上昇させることができる。

図3に示すように、ターゲット板には、電子温度、密度計測のための多チャンネル静電プロー

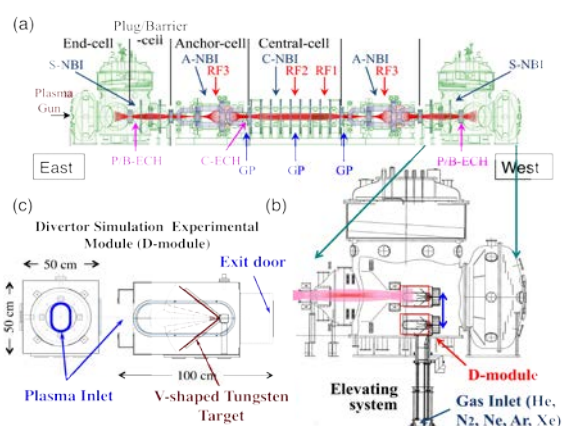


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図, (b) 西側エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール (Dモジュール) の模式図。昇降機構により、従来の配位でのミラー実験が可能である。(c) Dモジュールの概略図。

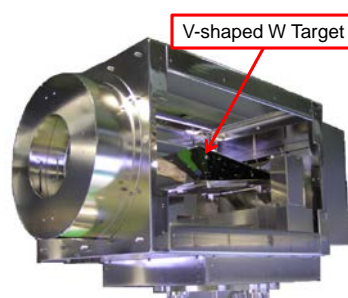


図2 Dモジュールの写真。

ブや多チャンネルカロリメーターが取り付けられている。また、図中に示したように、水素ガスや希ガス導入等による放射冷却や不純物輸送などの周辺プラズマを模擬したプラズマ研究やPWI研究が、制御された形で可能となっている。図4は、希ガス入射時にDモジュール内V字ターゲットのコーナーギャップ間に設置しているプローブとカロリメーターによって測定されたイオン束と熱流束のガス圧依存性を示している。図から、ArガスがNeガスに比べて熱流束及びイオン束の低減に効果的であり、 $N_2$ は低圧力状況下ではArと同等以上の熱流粒子束の低減効果が得られることがわかった。また、図には示されていないが、Xeガスが最も電子温度の低減効果も含め最も非接触プラズマ形成へ効果が高いことが判った。このように様々な放射冷却に有望なガスについて詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

一方、非接触化の進展にともなうターゲット内の密度減少と、観測される $H_\alpha$ 線と $H_\beta$ 線の強度変化が異なることが観測されている。 $H_\alpha$ 線のガス圧力依存性の特徴から分子活性化再結合が主な過程であることが光学的に示唆されている。水素ガスを用いた非接触プラズマ化実験を行った際のDモジュール内のプラズマの電子温度、電子密度、バルマー線強度の中性ガス圧力依存性を調べた実験では、電子温度は、中性ガス圧力とともに減少し、Dモジュール入口付近では、約30eVから約8eV、ターゲットのコーナー付近では約23eVから1eVまで減少している。ターゲットコーナー付近の電子密度は、1~2Paでピークとなり、その後中性ガス圧力とともに減少しており、明確な密度のロールオーバーが観測されている。 $H_\beta$ 線強度の圧力依存性は電子密度と同様であるが、 $H_\alpha$ 線強度は、約7Paまで圧力とともに増加しており、密度の依存性とは違う傾向を示した。これは、分子活性化再結合が起き、 $H_\alpha$ 線強度が選択的に増加したことによると考えられる。

高熱流・流束の増強については、これまでに引き続き、ICRF アンテナ等の改良を進め、東西両アンカー部への高周波入射とセントラル部高周波アンテナとの位相調整を含めた調整等により、エンド部への粒子束、熱流束増大を進めた結果、粒子束としては、最大で $3.3 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ に達している。また、ECH 入射による高熱流束実験では、ICRF 加熱さ

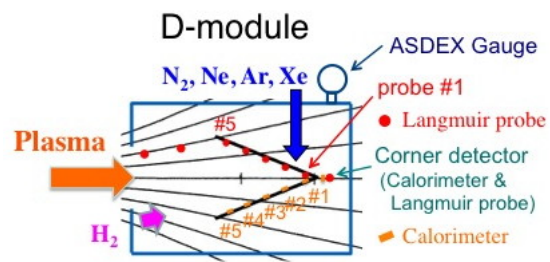


図3 Dモジュール内部のV字ターゲット上、及び周辺に設置された計測器の概略図。

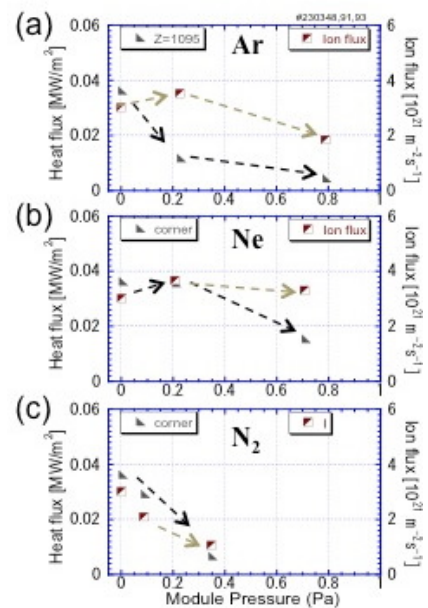


図4 Dモジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) Ar、(b) Ne、(c)  $N_2$ 。



れたプラズマに対して 5ms の短パルス入射による ELM 模擬の実験を行った際に  $15\text{MW}/\text{m}^2$  に到達している。図5はこれまでに得られた端部ミラー出口近傍で測定されたECH印加中熱流束をECHパワーに対してプロットしたもので、パワーの増加に伴い順調に増加していることが判る。

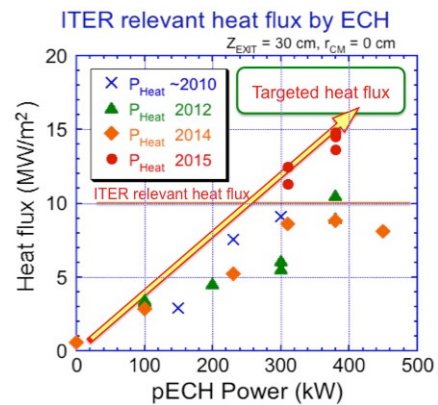


図5 端部ミラー出口で測定した熱流束のECHパワー依存性。

### (3) マルチパス・トムソン散乱計測システム

平成 21 年度から NIFS 等との共同研究を活用して導入したトムソン散乱計測システムの開発をさらに進めている。6 パス以上のマルチパス・トムソン散乱信号を目指してマルチパスシステムの改良を進めた。パス毎にレーザービームパターンの確認を行い、安定したマルチパスを達成できるようにした。本マルチパスシステムをプラズマ電子温度計測に適用した結果を図6に示す。マルチパス・トムソン散乱信号は8 パス以上まで確認できた。青線はシングルパス、緑線はダブルパス、赤線はマルチパスシステムでのトムソン散乱信号を示す。マルチパス・トムソン散乱信号の積分値は、シングルパスの信号積分値の約 6 倍程度あり、測定した電子温度は、 $22 \pm 1 \text{ eV}$  となり、シングルパスで測定した電子温度  $23 \pm 3 \text{ eV}$  に比べ測定精度が上昇した。パス毎の散乱信号強度を求め、電子温度解析を行った結果を図6 (b) に示す。測定した電子温度の 20, 50 ns 間隔での測定ができた。電子温度が時間的に振動している様子が見られた。今後、マルチパス信号の解析方法を構築し、ショット毎に電子温度、密度の時間変化を解析できるようにしていく予定である。

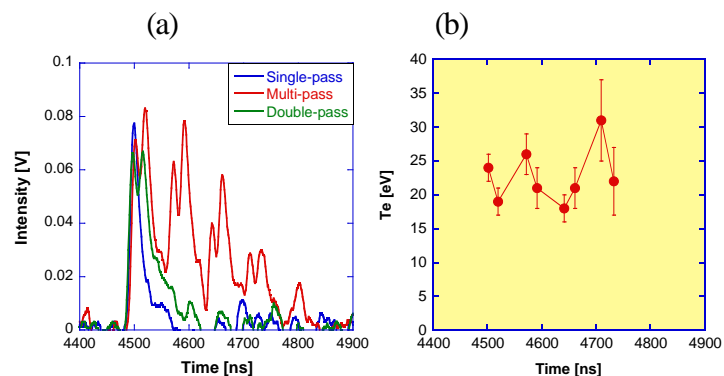


図6 (a) マルチパス・トムソン散乱信号波形。シングルパス信号(青)、ダブルパス信号(緑)、マルチパス信号(赤)で示す。(b) 高速時間分解電子温度測定。

### (4) 大出力長パルスジャイロトロンの開発

筑波大学の大きな特徴である大電力ジャイロトロンに関しては、これまでの NIFS、九大等との共同研究及び JAEA との連携研究をより強化し、14-300GHz と周波数範囲を大きく拡張し開発を進めている。平成 27 年度では、28/35GHz の 2 周波数ジャイロトロンの製作において順調な進展があった。全ての設計が完了し製作が行われ、2016 年 3 月に真空排気を行い来年度 6 月からの試験発振を予定している。また、これと並行して 2 周波数ジャイロトロン用 0.4MW での CW 動作が可能なダブルディスク窓の性能評価も進めている。また、九州大学との共同研究で開発した 28GHz-1MW ジャイロトロンの修理が完

了し、発振試験を行った。試験電源の調整によりビーム電流を 55A まで上げ、1 ショットでのダミー冷却水温度変化の時間積分を行うことで、これまでに得られていた 1.28MW より高い 1.38MW の出力を確認した。発振試験後、長パルス運転のためのガス出しエージングを行い、九大 QUEST の実機装置に据付、調整を行った。今後、QUEST での 2016 年度 ECH 実験が進められる予定である。また、将来の QUEST や GAMMA10 中央部加熱への適用を見込み 14GHz ジャイロトロン設計検討を進めてきた。14GHz と 28GHz の 2 周波数動作が可能な発振モードの組合せが無い場合、14GHz の単一発振として TE<sub>4,2</sub> モードの選択を行い、電子銃、空洞共振器、モード変換器、コレクタ設計を行った。一方、研究の進展に合わせ、QUEST における実験領域の拡大のため、14GHz に加え 28GHz と 14GHz の間の周波数でも発振可能な 2 周波数ジャイロトロンの開発要望もあり、14GHz と同一の出力窓で周波数マッチングの取れる 21GHz 近傍での発振検討を開始した。図 7 に MW ジャイロトロンの開発の現状についてまとめたものを示す。

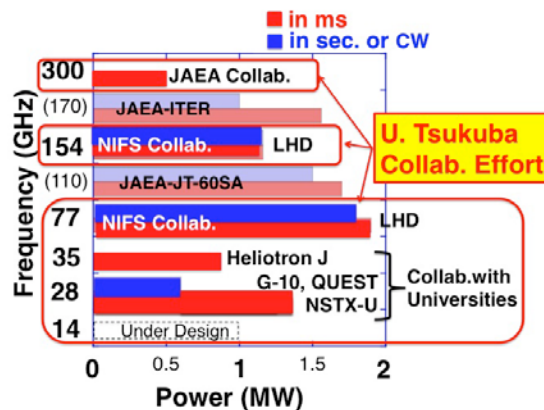


図 7 MW ジャイロトロン開発の現状。筑波大学プラズマ研究センターにおいてで開発されたものを赤枠で示している。

#### (5) 成果発表等

平成 27 年度には、平成 23 年度から筑波大学およびつくば地区で毎年開催している全国のダイバータに代表される境界領域プラズマ、壁材料等に係る多く研究者が参加した研究会（第 1 回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータサブクラスター、第 2 回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター、第 1 回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター）を 7 月にプラズマ研究センターシンポジウムと合同で開催した。また、11 月には、プラズマ・核融合学会第 32 回年会において全 34 件の発表を行った。国内外で開催された国際会議、及びワークショップについては、今年度合計 36 件の講演を行った。

### 【4】 GAMMA 10 における超音速分子性ビームによる粒子供給

#### (1) はじめに

磁場閉じ込め型の核融合プラズマ実験装置において、中性粒子輸送や水素リサイクリング・周辺プラズマ挙動観測はタンデムミラープラズマやダイバータ領域でのプラズマ挙動解明ばかりでなく、プラズマ・壁相互作用からコアプラズマの輸送に至るまでの幅広い情報・指針を与える重要な研究対象である。従来からタンデムミラー型装置 GAMMA 10

では、高密度プラズマ生成・維持が課題であり、超音速分子性ガスビーム入射(SMBI)法を用いたガス供給や、ICRF 周波数帯加熱等の工夫により研究が進められてきた。特に近年、GAMMA 10 装置は端損失粒子を用いたダイバータ模擬装置への改造および実験が進められており、本研究の推進によりパラメータ領域が拡大できれば、主閉じ込め領域のプラズマ性能向上だけでなく、ダイバータ模擬実験への貢献も期待される。

本研究においては、一昨年度よりラバールノズルを用いた SMBI 実験を開始し、指向性の高い粒子供給が可能であることが分かった。本研究の目的は、新たに導入したラバールノズルの効果を、実験とシミュレーションの両面において検証することである。昨年度セントラル部中央に設置されているピエゾバルブタイプのガスパフ (GP#7) を用いて、高密度プラズマ生成を試した。今年度は同 GP 付近に設置されているラバールノズルを用いた SMBI による高密度プラズマ生成実験を行った。この実験によりガスパフ入射やストレートノズルを用いた SMBI との比較のための詳細なデータを得ることを目的とする。

## (2) 実験方法

GAMMA 10 における高速カメラシステムと、今回新たに導入されたストレートノズル付き SMBI の設置の模式図を図 1 に示す。SMBI による水素ガス入射に伴ったプラズマ発光や挙動を観測するため、2 分岐ファイバーを用いることで水平方向、垂直方向の同時測定を可能とした高速カメラシステムを構築している。高速カメラの視野は、SMBI および従来のガスパフの入射領域を、同時に観測できるように設定されている。

図 2 に、セントラル部下部の真空容器内の画像を示す。ラバールノズルはその構造の複雑さのため材質はアルミが選択された。一方、先端部にはステンレスのカバーを取り付けた。これまでの実験では、ノズル無し、ストレートノズル付きと実験状況を変えて行ってきた結果、どちらの実験条件においてもプレナム圧に対して依存性があることが確認されている。

放電シナリオは以下のとおりである。まず GP#1b-#2b により初期ガスを導入し、プラズマガンにより初期プラズマを生成した。その後、密度維持・アンカー部加熱のための ICRF 加熱(RF1)を導入し、同時に GP#3-#4 により密度を維持した。プラズマ密度が安

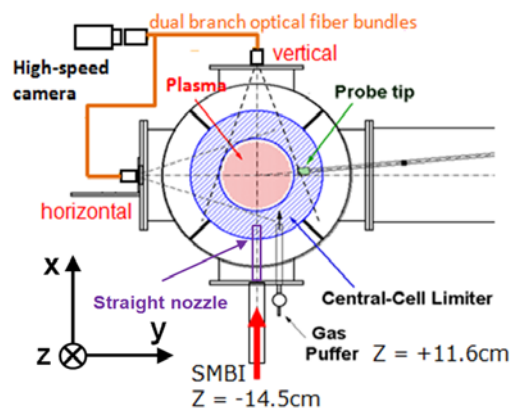


図 1 ストレートノズル付き SMBI と高速カメラの設置位置の模式図

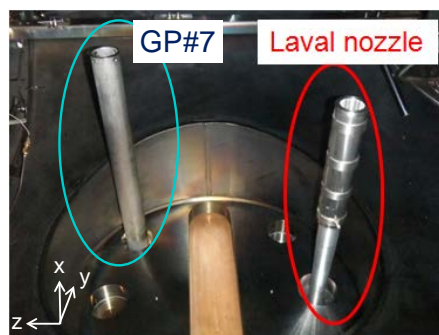


図 2 セントラル部中央付近に設置されている GP#7 および SMBI 用ラバールノズル



定した時点で SMBI を行った。密度計測は多チャンネルのマイクロ波干渉計により行い、トムソン散乱装置による電子温度計測、および  $H_{\alpha}$  線発光強度計測を行った。

### (3) 実験結果

図 3 に、SMBI を用いた高密度放電の電子線密度の時間発展を示す。この放電では ICRF による加熱のみを行っている。SMBI の動作時間は 0.5ms で、プレナム圧を 0.5MPa から 2.0MPa まで変化させて密度の応答を観測した。ターゲットの線平均密度 ( $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  : プラズマ半径を 18cm として算出) に対して、2.0MPa の場合にはピーク値でほぼ倍まで増加していることが観測された。一方でプラズマの蓄積エネルギーは SMBI 入射直後に大幅に低下していることが観測されているため、蓄積エネルギーの低下を抑えた放電シナリオの構築が課題である。

図 4 にプレナム圧に対する SMBI 入射後の密度の増分および  $H_{\alpha}$  線発光強度の増分をプロットする。なお  $H_{\alpha}$  線強度検出器は、ほぼ SMBI の入射軸上に設置されており、SMBI のガスによる発光を直接見込むと考えられる。圧力の増加に伴って、電子線密度も  $H_{\alpha}$  線発光強度もほぼ直線的に増加しており、SMBI の粒子供給数はこの動作範囲ではプレナム圧力に対して線形に増えていることが予想される。

SMBI には指向性の高いガス供給が求められるため、ノズル形状に対する指向性の特性を調べることは、SMBI 入射の基礎特性を得る上で重要である。GAMMA10 では 2 方向からプラズマの発光を同時に観測できるシステムが構築されており、SMBI による発光強度の空間広がりから、指向性を評価している。図 5(a) に GAMMA10 セントラル部の水平方向視線、垂直方向視線から高速カメラで同時に観測した SMBI 入射中の発光イメージを示す。図中右側の垂直方向視線からのイメージの点線上の広がりから半値全幅を評価し、指向性の指標とした。図 5(b) に今回取得したラバールノズルの半値全幅のプレナム圧依存性を示す。比較のため以前取得したストレートノズルのデータもプロットする。全体的にストレートノズルの場合の広がりにはラバールノズルと比べて 50%ほど大きく、ラバールノズルがより指向性の高い粒子補給をしていることが読み取れる。一方でプレナム圧力に対する依存性はほぼ同じであり、1MPa を超えるとほとんど変化しないことがわかった。

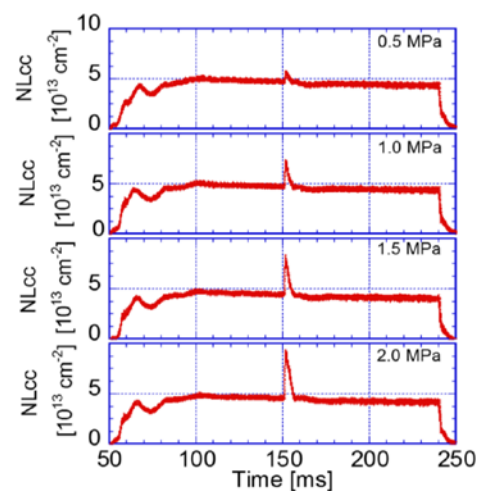


図 3 SMBI 導入実験におけるセントラル部電子線密度 (NLcc) 時間発展。プレナム圧を 0.5MPa から 2.0MPa まで変化させその応答を調べた。

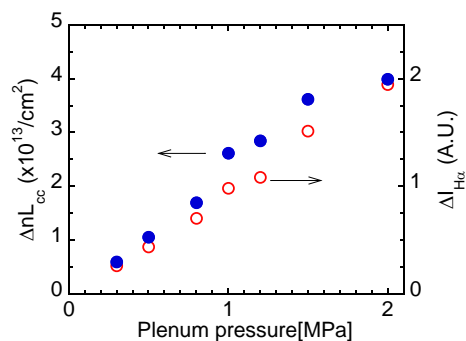


図 4 SMBI プレナム圧に対するセントラル部電子線密度および  $H_{\alpha}$  線発光強度の増加分の依存性。

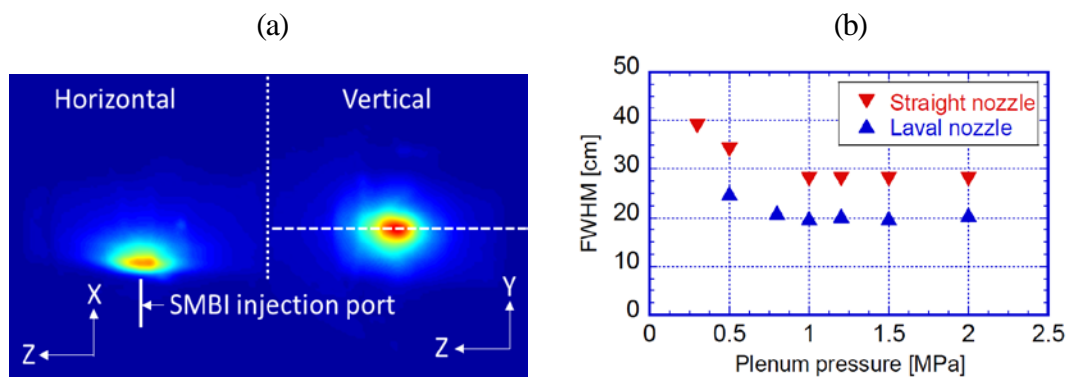


図5 (a) 水平方向および垂直方向から同時撮影した SMBI 入射中の発光イメージ、(b) 発光の空間広がり、プレナム圧に対する依存性。

#### (4) まとめ

今回、SMBI 機器の改良により、ラバールノズルを用いた SMBI 実験を安定的に行えるようになった。ラバールノズルの粒子補給特性はストレートノズルのそれと比べると指向性が高い事が示された。一方で SMBI 入射時に大きなセントラル部蓄積エネルギーの低下が観測されたため、今後は ICRF や ECH 加熱の組み合わせにより、蓄積エネルギーの悪化を抑えた放電シナリオの構築を目指す。

### 【5】タンデムミラー端部を用いたダイバータ模擬研究

#### (1) はじめに

核燃焼プラズマの定常維持の為に、高熱流束に耐えるダイバータの開発が急務の課題となっている。開放端磁場配位は、ダイバータと共通する磁力線の構造をしており、タンデムミラープラズマにおいて、軸方向閉じ込め電位の無いプラズマ周辺部はトーラスプラズマの SOL 領域に、ミラー端部はダイバータ板前面の開いた磁場領域に酷似している。本研究の目的は、タンデムミラープラズマ閉じ込め装置ガンマ 10 のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、実験的及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによ

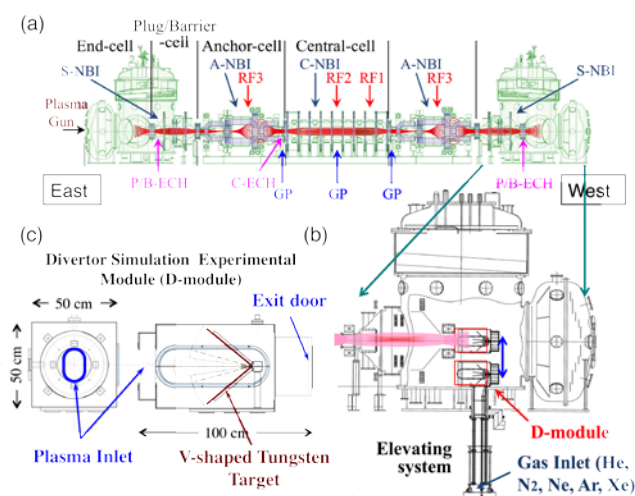


図1 (a) ガンマ 10/PDX 全体図、(b) 西エンド部真空容器、(c) 昨年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール。

て、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

## (2) 実験装置

図1に西エンド部真空容器と昨年度稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール（Dモジュール）の配置を示す。平成23年度までに設置した計測器は、端部ミラーコイルの中心から中心軸外側に向かって30 cmの位置（ $Z_{\text{EXIT}} = 30$ ）にあるカロリメータと方向性プローブの複合計測器、複数のターゲット及び計測器を備えて、 $Z_{\text{EXIT}} = 70$  cm

に設置されている回転式ターゲットアセンブリ、エンドタンクに設置されている端損失イオンエネルギー分析器（ELIEA）などある。また、ターゲット材とプラズマとの相互作用光は、高速カメラを用いて計測されている。

平成24年度から稼働を開始したDモジュールの概略図と写真を図2に示す。本モジュールは、SUS製の断面 $50 \times 48$  cm、長さ70 cmの直方体の容器で、前方にある $\phi 20$  cmの円形ポートから、端損失プラズマ流が導入される。容器内部には、V字形の2枚のタンダステン製ターゲット（ $30 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ ）が設置されており、V字形開口部の角度が15度から80度まで可変となっている。ターゲットの表面及びV字コーナー部には、静電プローブとカロリメータのアレイが設置されており、端損失プラズマ流の粒子束、熱流束が測定される。また、後部にはガス排出口が設置され、扉の開き角度を変えることにより、容器内部の中性粒子圧力を制御できるようになっている。

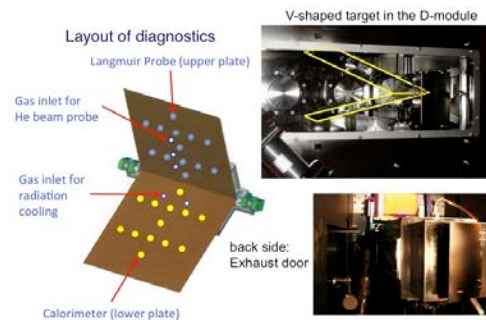


図2 ダイバータ模擬実験モジュールの概略図と写真。

## (3) 実験結果

今年度はアンカー部に設置したICRF波動による追加熱用アンテナを用いた更なる端損失イオン流の大幅な増強を図った。図3は典型的な高周波波動（ICRF）生成プラズマ（セントラル部  $2\text{--}3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、イオン温度5 keV）に対し、東西に設置している両アンテナを用いて追加熱を行った場合の、各部のプラズマ密度と端損失イオン流の時間変化を示す。図から判るように、東西アンカー部加熱時に両アンカー部の線密度が3倍近く増加しており、それに伴ってセントラル部プラズマ線密度も  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  台に上昇している。その結果、西側ELIEAによる端部イオン流は約2倍以上に増加している。更

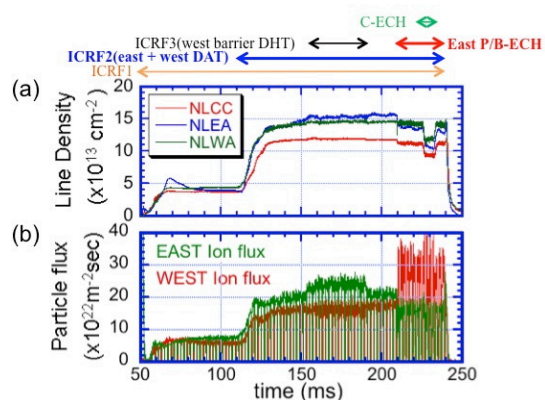


図3 プラズマ追加熱を用いた高粒子フラックス生成実験アンカー部。(a) セントラル部及びアンカー部プラズマ線密度、東西エンド部で測定したイオン流束の時間変化。

に東側のプラグバリア ECH を重畳することにより、セントラル部の密度に顕著な変化は無いにも拘わらず、西側の粒子束は2倍程度増加し、 $3.3 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の粒子束が達成された。これは、東側のECHにより生成された電位により端損失粒子が反射された為と、アンカー部とセントラル部電位が上昇した為に、西側へ向かう端損失イオンが加速されたためと推察される。また、セントラル部プラズマ電子密度と端損失粒子束密度との関係を調べたところ、粒子束密度は、すでにセントラル部の密度に対し、線形的に増加することが判っており、ECH印加による粒子束増加の顕著な効果が確認された。

また、ECH 入射による高熱流束実験では、ICRF 加熱されたプラズマに対して 5ms の短パルス入射による ELM 模擬の実験を行った際に  $15 \text{ MW/m}^2$  に到達した。端部ミラー出口においてカロリメータにより熱流束を測

定したところ、ECH パワーの増加に伴い順調に増加していることが認められた。以上のことから、隣接するミラーセルにおけるプラズマ追加熱の有効性が示され、ICRF 並びに ECH を用いた更なる高粒子束密度発生への見通しを得ることが出来た。

Dモジュールに水素や希ガスを導入して、放射冷却を増加させることにより、RF 生成プラズマの非接触プラズマ化へ向けた実験が行われた。図4は、希ガス入射時にDモジュール内V字ターゲットのコーナーギャップ間に設置しているプローブとカロリメータによって測定されたイオン束と熱流束のガス圧依存性を示している。図から、Ar ガスが Ne ガスに比べて熱流束及びイオン束の低減に効果的であり、 $\text{N}_2$  は低圧力状況下では Ar と同等以上の熱流粒子束の低減効果が得られることがわかった。また、図には示されていないが、Xe ガスが最も電子温度の低減効果も含め最も非接触プラズマ形成へ効果が高いことが判った。このように様々な放射冷却に有望なガスについて詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

以上の他にもDモジュール内に導入した不純物の上流（セントラル部）へ向かう不純物の輸送についての分光計測に基づく計測やなど、様々なダイバータ模擬実験が行われ、興味深い結果が得られた。

#### (4) まとめ

ダイバータ実験装置 (E-Div.) を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げ、ガンマ 10 端部ミラー出口において、本共同研究の課題についての実験を開始した。その結果、ICRF を用いたアンカー部加熱と ECH パルスの重畳による端損失粒子束

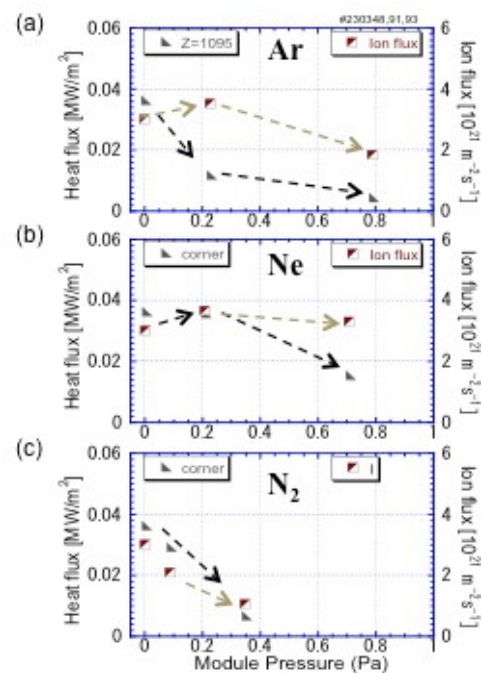


図4 Dモジュール内プラズマパラメータの導入不純物ガス圧依存性 (a) Ar、(b) Ne、(c)  $\text{N}_2$ 。



密度の大幅な増加に成功し、 $3.3 \times 10^{23} \text{ H/m}^2$ の粒子束を達成した。また、熱流束ではECHの短パルス入射により、 $15 \text{ MW/m}^2$ を越える高熱流束を達成した。また、Dモジュールを用いた本格的ダイバータ模擬実験では、種々の放射冷却用ガスの非接触プラズマ化への効果が検証され、Xe ガスが最も効果が高く、窒素ガスも効果的であることが認められた。今後は更に熱流・粒子束密度の強化に向けてプラズマ生成・加熱の最適化を推し進めると共に、ダイバータ模擬実験、プラズマ壁相互作用並び非接触プラズマの特性、定常維持に関する機構解明へ向けて研究を進めてゆく。

## 【6】 GAMMA 10 E-div 領域における多流体コードによる数値シミュレーション解析

### (1) はじめに

直線型装置は、定常状態での実験が可能である事や、磁場構造が単純な為、観測ポート設置の利便性が非常に高い事などの環状装置には無い有利な特徴がある事から、直線型装置を使用した周辺プラズマ研究が、広く世界中で行われている。これらの直線型装置は、トカマク装置に匹敵する粒子束で研究可能である PSI-II の様に、其々の特徴を生かした研究を行っている。そこで、数値計算シミュレーションによって、プラズマにどの物理過程が強く影響を及ぼしているのかを評価する事が非常に重要となる。筑波大学に設置されているタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の西エンド部においても、ダイバータ模擬実験が行われている。

本研究の目的は、他の直線型装置と比較してイオン温度が非常に高いプラズマで実験可能である GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、新たに構築した数値計算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、高イオン温度プラズマ下におけるプラズマ挙動を解明する事である。また、高イオン温度プラズマに不純物粒子や中性粒子の外部ガスパフを行った際の背景プラズマ挙動並びに、ターゲット板への熱・粒子負荷について数値計算コードを用いて評価する事である。これにより、GAMMA 10/PDX で行われているダイバータ模擬実験で現れる物理機構に対する理解や、トカマク、及びヘリカル型装置における周辺プラズマ挙動の研究に大きく貢献できる。

### (2) メッシュおよび物理モデル

本研究で開発した流体コードは、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。図 1 に GAMMA 10 プラグバリア部及びエンド部の真空容器プラズマ形状の概略図と同部に設定した数値シミュレーション計算空間のメッシュ構造を示す。

GAMMA 10/PDX は、セントラルセル、アンカーセル、プラグ・バリアセルとエンドセルの4つのセルによって、構成されている。プラズマは、主としてセントラルセルにおいて生成され、ロスコーンに落ち込んだ荷電粒子がセントラルセルから、各セルを経由してエンドセルに流出する。GAMMA 10/PDX では、この端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っている。その為、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメ



ッシュを作成する必要がある。また、エンド部に存在するプラズマは、セントラルセルから流出したプラズマであるので、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つと仮定した。ターゲット板は、計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定した。一方、プラズマ内中性粒子のモデルとしてバックグラウンドの ( $3 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ ) を与え、 $\text{H}_2$  原子については、ターゲット面上でのリサイクリングを想定した  $10^{18} \text{m}^{-3}$  台の高い密度からプラグバリアに向かって指数関数的に減少する分布を与えた。Ar 粒子については、エンド部において一様で、プラグバリアに向かって減少する分布とした。以上の様に、GAMMA 10/PDX の磁力線構造と各境界条件を、新たに開発した数値計算コードに適用させた上で、テスト計算を行った。その結果、非線形性が強い系で計算される全ての変数について、より良い収束性が確認されたことから、開発した本計算コードは、GAMMA 10/PDX の環境下においても、正しく稼働している事を確認している。

### (3) 計算結果

図2は計算結果の一例を示す。Ar 中性粒子密度を上述条件でシミュレーション空間内に満たした場合のプラズマ電子密度と温度の空間分布のシミュレーション結果を示す。この計算では、水素の中性粒子密度は  $0.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$  に固定されており、アルゴンは  $1.8 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$  である。イオン温度、電子温度の上流側境界条件がそれぞれ 100 eV, 30 eV に設定されているが、エンド部ターゲット上で Ti は数 10 eV, Te は 10eV 以下に低下しており、不純物ガス入射に起因する放射冷却効果の有意な効果として考えられる。

図3は、上記と同様の条件で入射 Ar 密度に対するターゲット上における各種プラズマパラメータのシミュレーション解析結果の依存性を示す。Ar の入射量の増加に伴い電子

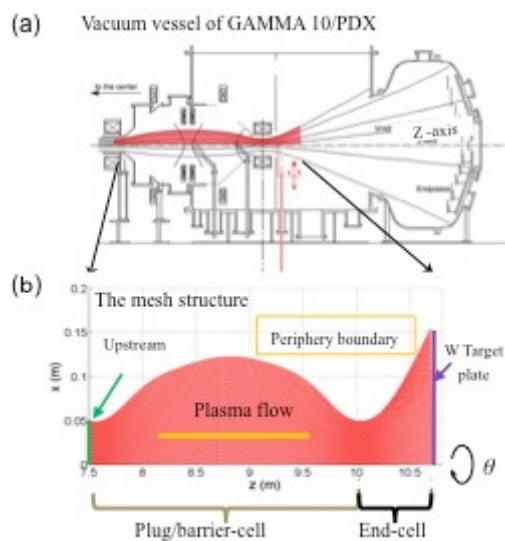


図1 GAMMA 10 エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a)エンド部真空容器とプラズマ形状, (b)同部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状と今回計算を行った領域

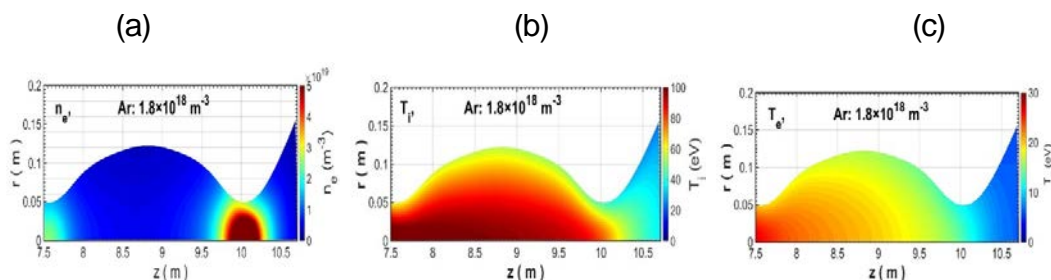


図2 Ar 中性粒子密度を  $1.8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、水素を  $0.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  と与えた場合のプラズマ密度・温度の空間構造のシミュレーション結果

温度が低下してゆく傾向が認められ、不純物ガスによる放射冷却効果が現れている。一方電子密度は、Ar 密度と共に増加し、 $1.2 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$  以上で飽和する傾向を示しており、ロールオーバーの傾向を示唆している。しかしながら、この密度・温度領域では、まだ3体再結合が支配的では無いため、更なる電子温度の冷却が必要となる。

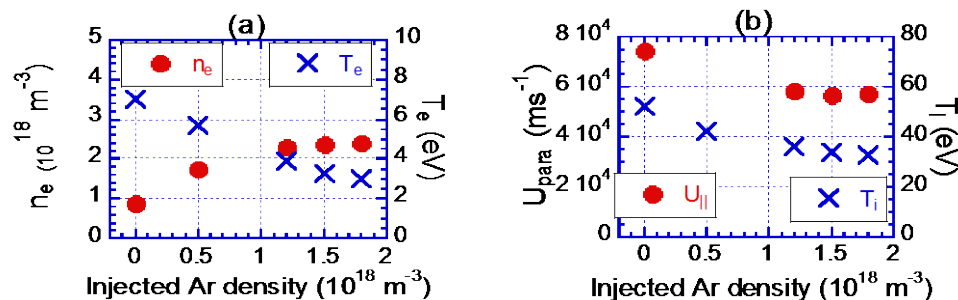


図3 ターゲット上のプラズマパラメータに対する入射 Ar 密度の依存性。(a) 電子密度、温度、(b) 磁力線に沿ったイオンの速度とイオン温度

#### (4) まとめ

多流体数値計算コードを用いて、GAMMA 10 エンド部におけるプラズマ流の挙動を調べている。Ar ガスの入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた初期的な特性が明らかになってきた。今後は、再結合過程など、より詳細な原子分子過程を考慮した計算を進めてゆく。

### 【7】エンド領域を活用した水素リサイクリング研究

プラズマ・壁相互作用と水素リサイクリングの理解は、核融合プラズマを安定して定常維持するための重要な課題である。本研究の目的は、プラズマ閉じ込め領域を有する開放端磁場配位GAMMA10/PDXの特長を活かして、タングステンにおける水素リサイクリング現象に関して包括的に研究を進めることである。

ダイバータ模擬実験装置(D-module)は、直方体のステンレス製容器 (0.5m x 0.5m x 0.7m) と V 字ターゲットから構成され、ステンレス容器前部には  $\phi 0.16\text{m}$  相当のプラズマ入射孔が開いている。側面には石英窓が取り付けられており、V 字ターゲット部のプラズマを観測する。V 字ターゲットのプラズマ対向面には厚さ 0.2mm のタングステン板 (0.3m x 0.35m) が取り付けられている。V 字ターゲットの開き角は遠隔操作にて、 $15^\circ$  から  $80^\circ$  まで変えることが可能である。今回は  $45^\circ$  にて実験を行った。D-module 入口部の 2 箇所に水素ガス供給用のノズルがあり、V-字ターゲットに向けて水素ガスを供給することが可能となっている。D-module 内のプラズマ特性を評価するために、D-module 入口付近に 2 個と上側ターゲット板に 13 個の静電プローブが設置されている。

水素ガスはプラズマ生成の約 300ms 前からプラズマ消滅直後まで供給した。ASDEX ゲージで測定された D-module 内の圧力は、プラズマ点火前にはほぼ一定となり、プラズ

マ生成により大きく増加することが分かった。これは、D-module 入口からプラズマが流入することにより、供給された水素ガスの D-module 外への流出が妨げられたことよると考えられる。ターゲット板上の電子温度は中性ガス圧力とともに減少し、D-module 入口付近では、約 30eV から約 8eV、ターゲットのコーナー付近では約 23eV から 1eV まで減少した。ターゲットコーナー付近の電子密度は、D-module 内圧力とともに増加して 1~2Pa でピークとなり、その後減少した。この密度の振る舞い (density role over) は、ターゲット板前面でプラズマが非接触化したことを示している。また、ターゲット板前面のプラズマからのバルマー線強度 ( $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ ) 測定からプラズマの非接触化は、分子活性化再結合に起因していることが明らかとなった。

## 【8】照射損傷タングステンの水素吸蔵に関する研究

タングステンは ITER のダイバータ板材料として使用され、原型炉のプラズマ対向壁材料の候補であり、その水素同位体吸蔵特性の研究は、これまで各国の研究機関で精力的に行われてきている。タングステンは水素を吸蔵しにくい材料であるが、中性子照射による材料内欠陥の生成により水素吸蔵特性変化が大きく変化することが知られている。本研究では、中性子照射に対する代替照射として重イオン ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 照射を用いて、照射損傷タングステンの水素吸蔵特性の変化を明らかにし、中性子損傷効果を考察することを目的としている。

タングステンへの重イオン照射の効果をより明確にするために、本研究の試料としては残留ひずみの少ない再結晶タングステンに重イオン照射を行った。重イオンのエネルギーは 2.4 MeV、フラックスは  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$  である。3つの損傷レベル (0.1, 0.4, 4 dpa) での重イオン照射した試料と未照射試料の4枚の試料に対して小型 PWI 模擬実験装置 APSEDAS を用いて重水素プラズマ照射を行った。重水素プラズマの試料へのフラックスは約  $3.7 \times 10^{21} \text{ D/m}^2\text{s}$ 、フルエンスは  $2 \times 10^{25} \text{ D/m}^2$  であった。また、照射イオンエネルギーは約 30eV であり、プラズマ照射中の試料表面温度は約 480K であった。重水素プラズマ照射後に、試料を昇温脱離試験装置に移し、900℃まで昇温して重水素の昇温脱離特性を調べた。重イオンを照射していないタングステン試料の昇温脱離スペクトルには、約 560K と約 740K にピークが存在した。一方、重イオン照射した試料では、上記とほぼ同じ温度に2つのピークが存在するが、さらに 840K 付近に新しいピークが存在することが分かった。これは、別のタングステン試料に重イオン照射をして TEM 観察した結果から、ナノボイドに起因するピークであると考えられる。また、試料中の重水素リテンションは、0.4dpa までは損傷レベルとともに増加するが、0.4dpa 以上ではリテンションが飽和していることが分かった。これは、重イオン照射によって発生した損傷 (空孔やボイド等) が高密度になり、新たに導入された損傷が相殺されてしまうためであると考えられる。

## 【9】 GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの開発

タンデムミラーGAMMA 10/PDX では、高出力マイクロ波による電子加熱を行って高電位生成を行い、磁場に加えて電位でもプラズマを閉じ込めることによってプラズマ性能を向上させている。そして、主閉じ込め領域であるセントラル部への電子直接加熱を行うことによって、電子温度を上昇させる実験を行っている。この電子温度を直接計測するためにトムソン散乱計測システムを導入してきた。これまでに空間 5 点、1 時刻の電子温度・密度計測ができるようにトムソン散乱計測システムを改良してきたが、本年度は、空間測定点の増加、多時刻計測を可能とし、電子温度、密度の径方向 6 点、100 ms 間隔での時間変化計測を 1 プラズマショットで調べることに、及びダイバータ模擬部のトムソン散乱計測システムの構築を目的とした。当該年度は、空間多点計測のためのプラズマ径方向外側のトムソン散乱信号の増強のための集光ミラーの設置、分光器、計測オシロスコープの増設、多時刻計測のための解析プログラムの構築、ダイバータ模擬部トムソン散乱計測システムの開発を進め、エンド部へのレーザー光の導入のための光路の設置を行った。

図 1 にトムソン散乱計測システムを示す。メインの集光ミラーの上部に、追加集光ミラーを設置した。この追加集光ミラーの効果に関して調べるため、GAMMA 10 本体内に窒素ガスを封入して Raman 散乱計測を行った。図 2 に  $X = -10, -15, -20$  cm の測定位置での追加集光ミラーの有無による散乱信号の変化を示す。(a), (b), (c) に  $X = -10, -15, -20$  cm の位置での計測結果を示す。 $X = -10, -15, -20$  cm の位置で、追加ミラーにより、散乱信号は、1.1, 1.5, 2.4 倍に増加することが分かった。さらに、トムソン散乱に適用したところ、 $X = -10, -15$  cm の位置で 1.2, 1.9 倍になっていることが分かった。これにより、径方向下側の散乱信号の増加が見込めることになった。

このシステムを用いて、径方向分布の多時刻計測を行った。図 3 に反磁性量 (赤点線)

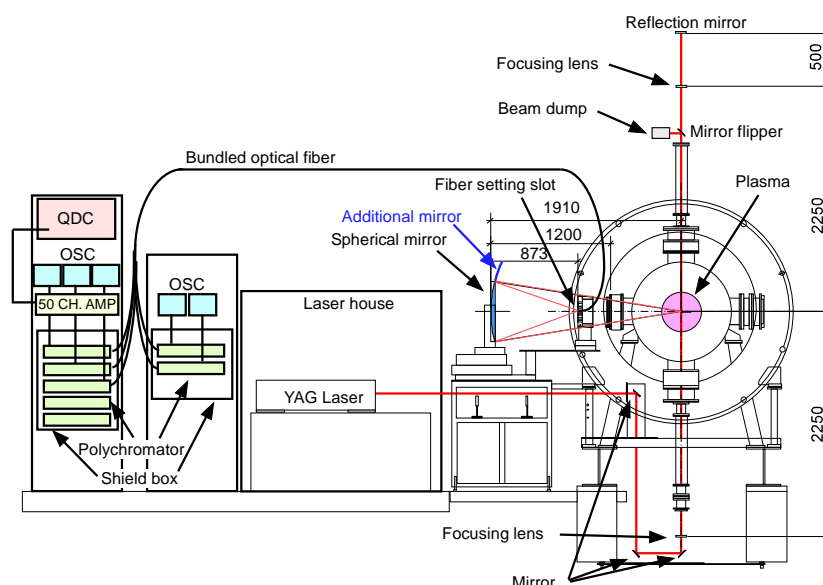


図 1 : トムソン散乱計測システム概略図

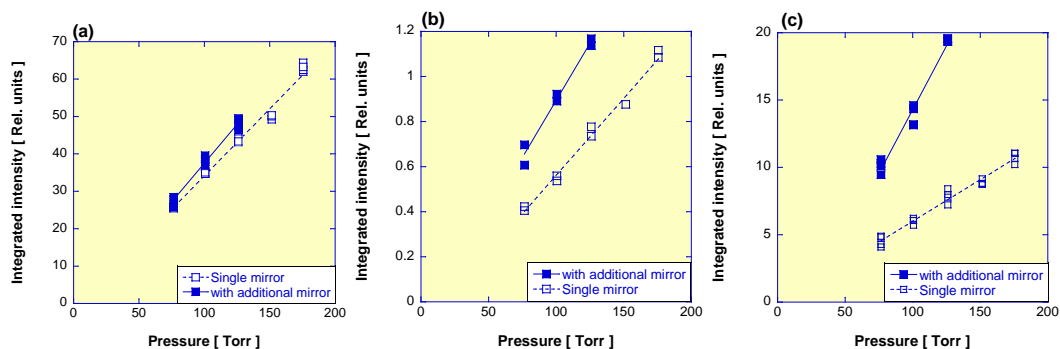


図2：追加ミラーの有無による Raman 散乱信号の変化。

と電子線密度 (青実線) の時間変化を示す。  
 $t = 60, 160$  ms の 2 時刻に YAG レーザーが入射し、電子温度、密度の径方向分布を計測した。図 4 (a), (b) に電子温度、密度の径方向分布を示す。プラズマ 1 ショットで径方向 6 点、2 時刻の電子温度、密度計測が可能となった。また、プラズマ中心部で、 $t = 60$  ms の場合、電子温度と電子密度は、 $32$  eV と  $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  であり、 $t = 160$  ms の場合、 $55$  eV と  $1.9 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  であった。

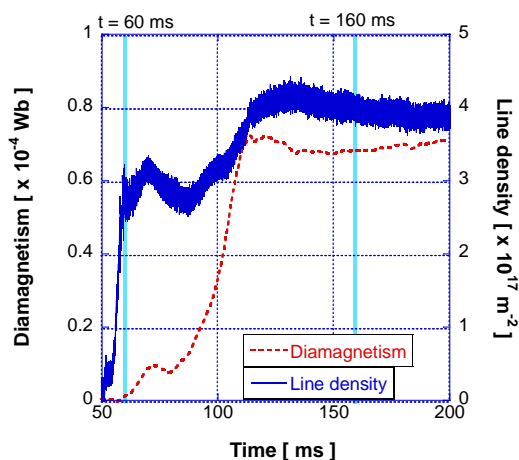


図3：反磁性量と電子線密度の時間変化

一方、ダイバータ模擬部トムソン散乱計測システムについては、セントラル部からエンド部までレーザーを伝送する光路を設置し、エンド部真空容器内に集光ミラーを設置した。また、集光した光伝送用の光ファイバーに関しても真空排気の問題ないことを確認した。今後、レーザー光の光路と集光光

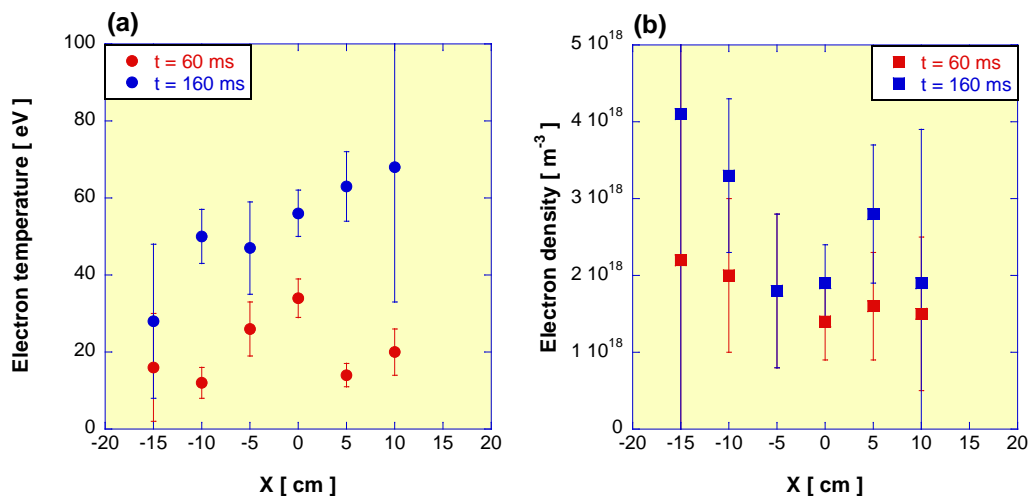


図4： $t = 60$  ms (赤) と  $t = 160$  ms (青) の (a) 電子温度分布と (b) 電子密度分布



学系の調整を行っていく予定である。

本年度は、6 パス以上のマルチパス・トムソン散乱信号を目指してマルチパス・システムの改良を進めた。パス毎にレーザービームパターンの確認を行い、安定したマルチパスを達成できるようにした。本マルチパス・システムをプラズマ電子温度計測に適用した結果を図5に示す。マルチパス・トムソン散乱信号は8 パス以上まで確認できた。青線はシングルパス、緑線はダブルパス、赤線はマルチパス・システムでのトムソン散乱信号を示す。マルチパス・トムソン散乱信号の積分値は、シングルパスの信号積分値の約6 倍程度あり、測定した電子温度は、 $22 \pm 1$  eV となり、シングルパスで測定した電子温度  $23 \pm 3$  eV に比べ測定精度が上昇した。パス毎の散乱信号強度を求め、電子温度解析を行った結果を図6に示す。電子温度の30, 50 ns 間隔での測定ができた。電子温度は、測定時間内でほぼ一定であることがわかった。今後、マルチパス信号の解析方法を構築し、ショット毎に電子温度、密度の時間変化を解析できるようにしていく予定である。本マルチパス・トムソン散乱システムにより、当初の目的であった、散乱信号の増加、電子温度計測精度の向上が達成できた。

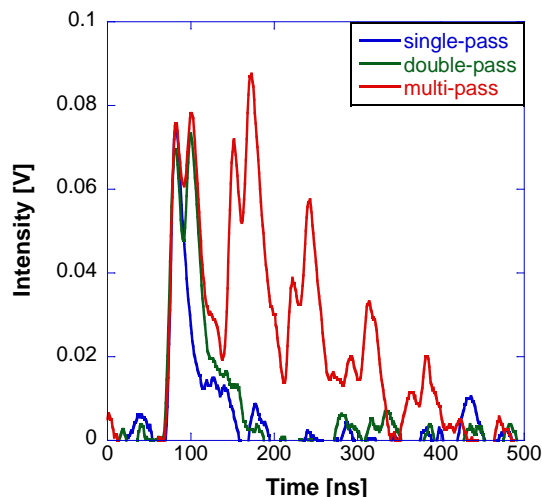


図5：マルチパス・トムソン散乱信号波形。シングルパス信号（青）、ダブルパス信号（緑）、マルチパス信号（赤）で示す。

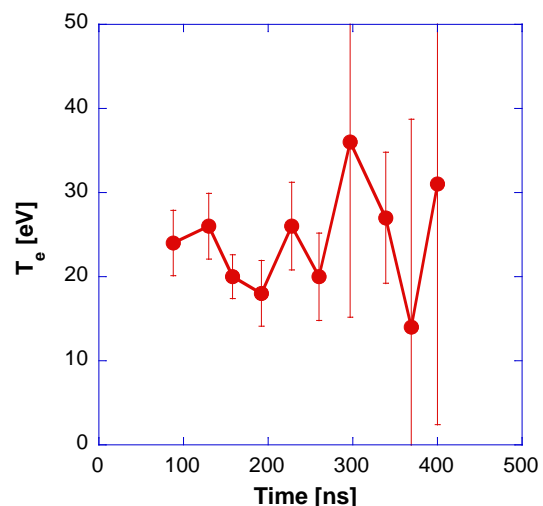


図6：高速時間分解電子温度測定

## 【10】 GAMMA 10/PDX 境界プラズマの放射スペクトルの研究

分光モデルである衝突・輻射モデルは、核融合プラズマ分光診断のための揺動が強力なツールとなる。しかし、プラズマ放射実験データとモデル計算結果との比較はまだ十分とはいえず、分光診断に直結したモデル構築が重要である。GAMMA 10/PDX では、境界プラズマ模擬のためのダイバータ模擬実験・モジュールを組み込み、境界プラズマ研究を本格化させている。本研究では、境界プラズマからの放射スペクトル、主に水素、ヘリウム、炭素、酸素からの放射に着目して衝突・輻射モデルを構築し、既存の計算機コード、プラズマ分光測定結果との比較を行い、分光診断のためのモデル構築、及び分光

測定データの解析方法の改良を目的としている。

本年度は、オランダ DIFFER 研究所にある直線型ダイバータ実験装置 Pilot-PSI のプラズマの2次元  $H\alpha$  線放射輝度分布を  $H\alpha$  線波長フィルター付きの高速カメラによって測定し、 $H\alpha$  線放射強度の揺動スペクトル解析を行った。その結果、電子線密度揺動スペクトルと同様の約 10 kHz の揺動が観測された。図1に測定した  $H\alpha$  線放射輝度の2次元分布、図2に揺動スペクトルを示す。Pilot-PSI プラズマからの  $H\alpha$  線放射は主に再結合放射によるものと考えられており、観測されたイオン起因によるものか電子起因による放射かを今後確認していく必要が有る。そのためにも、時間発展型の衝突・輻射モデル計算を進めていく必要が有る。

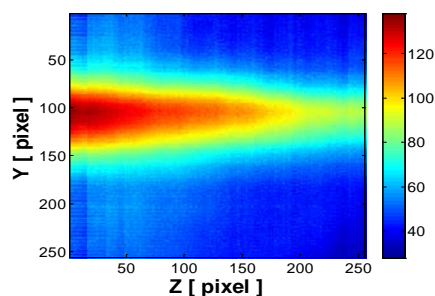


図1：高速カメラによる2次元  $H\alpha$  線放射輝度分布

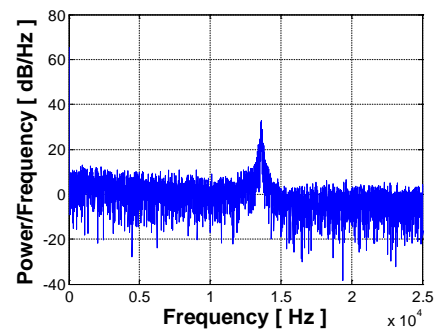


図2：揺動スペクトル解析結果

## 【11】高周波を用いた初期プラズマ生成と加熱、及び加熱プラズマの巨視的・微視的挙動の解析

イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波を用い、プラズマ中の電位形成やプラズマ閉じ込め物理、また、開放端磁場配位を利用したダイバータ模擬実験等の境界プラズマ研究における標的プラズマ生成、イオン加熱の実験を進めている。さらに、高性能プラズマを制御する上で不可欠なプラズマの巨視的・微視的挙動についての研究を並行して進めている。平成27年度は、アンカー部加熱の高効率化のためにセントラル部とアンカー部に設置したアンテナを同一周波数で駆動し、そのアンテナ間の位相差を制御する実験に関して、東西アンカー部同時入射による両アンカー部の高密度化とセントラル部の密度上昇の実験結果についての考察を進めた。また、アンカー部・バリア部に設置したアンテナを用いたプラズマ制御実験に併せて3次元波動励起コード解析を行った。更に、励起 ICRF 波動や温度非等方性により自発励起されるアルベンイオンサイクロトロン (AIC) 波動の特性を計測するため、マイクロ波反射計を利用した波動計測を行った。

### (1) 東西アンカー部同時加熱実験

アンカー部加熱強化を目的として、東西両アンカー部のセントラル側アンテナ (EAI-DAT, WAI-DAT) とセントラル部 Type-III アンテナとの位相差制御実験を進めている。特に東西アンカー部の同時加熱実験において、東西アンカー部の密度上昇に伴い従来の

2倍以上セントラル部密度が上昇し、端損失粒子束も増大することが観測されている(図1)。東西アンカー部同時加熱時(110–240 ms)に、西バリア部アンテナ(WB-DHT) ICRF 追加加熱(150–190 ms)、東プラグ/バリア電子サイクロtron加熱(ECH)による追加加熱(210–240 ms)を行ったところ、WB-DHT アンテナにより東側で従来の約3倍の端損失粒子束、東の ECH 加熱により今までの最大値となる  $3.3 \times 10^{23} \text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$  の端損失粒子束が得られた。

このセントラル部高密度化の要因の一つとして、東西アンカー部における電位形成がセントラル部の閉じ込めを改善することが示唆された。図2にセントラル部線密度と東西アンカー部の(a)低密度側、(b)高密度側の線密度との関係を示す。図中の●(赤丸)は東西アンカー部同時加熱による実験点、●(青丸)は東西アンカー部のどちらか一方のみに位相差制御を適用した加熱、または追加加熱をしていない実験点を表している。セントラル部線密度と低密度側アンカー部線密度(図2(a))に正の相関があることが分かる。即ち、アンカー部の密度上昇による電位形成に伴いセントラル部の高密度化が促されたことが示唆された。

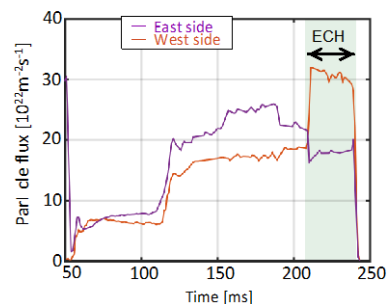


図1 両アンカー加熱時の端損失粒子束

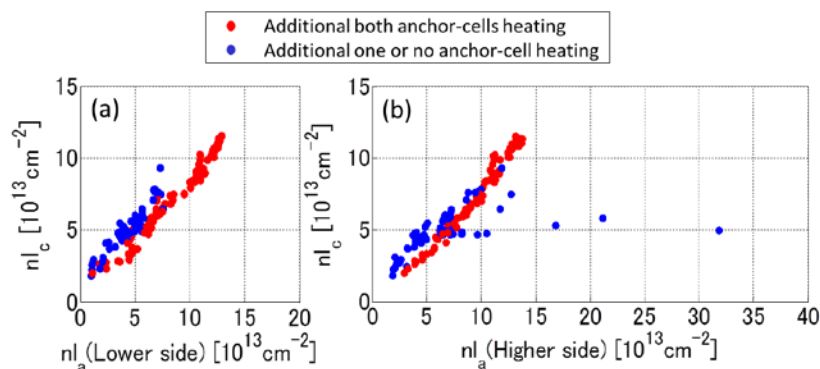


図2 セントラル部線密度と(a)低密度側アンカー部線密度、(b)高密度側アンカー部線密度との関係

## (2) アンカー部及びバリア部の ICRF アンテナを用いたプラズマ制御実験

アンカー部は極小磁場配位のためイオンサイクロtron共鳴層は楕円体形状であり、共鳴層の大きさは印加周波数に依存する(図3(a))。有限要素法による3次元波動解析コードを用いてアンカー部における ICRF 吸収電力の半径方向周波数依存性を求めたところ(図3(b))、印加周波数が小さくなるほどイオンサイクロtron共鳴層は半径中心部に向かうことから、吸収電力の半径方向分布も周波数減少に伴い中心部で増大することが計算された。このことから、アンカー部アンテナ駆動周波数を変更することにより、プラズマパラメータの径方向分布制御が可能であることが示唆された。実際、EAI-DAT に 9.4 MHz の ICRF 波動を入射すると、セントラル部径方向中心部と周辺部で密度の上昇と

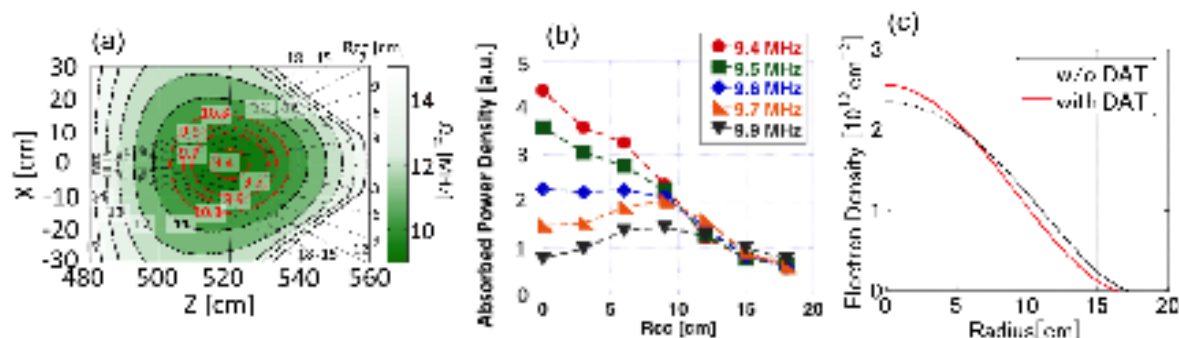


図3 (a)アンカー部の ICRF 波動周波数に対するイオンサイクロトロン共鳴位置とセントラル部ミッドプレーンにおける半径位置  $R_{cc}$  から引いた磁力線形状。(b)波動解析コードによるアンカー部吸収電力密度の周波数依存性。(c)EAI-DAT アンテナに 9.4MHz の ICRF 波動を印加した時のセントラル部径方向密度分布変化。

減少が観測された(図3(c))。更に、効率的な中心部の加熱に伴い径方向電位分布の変化も観測された。

アンカー部に ICRF 波動加熱を行うことにより励起される波動と加熱効果を検証するため、西側アンカー部にマイクロ波反射計を設置した。プローブ周波数を放電毎に変更することにより、位相信号の時間変化からカットオフ層の径方向変動長が得られた。これは密度分布形状の変化に相当し、マイクロ波干渉計で計測された密度の線積分量が ICRF 追加熱により増減するのに対応して密度の増減が確認された。また、高周波波動に起因する揺動強度のアンカー部径方向分布が得られた。今後、セントラル部とアンカー部における高周波密度揺動の差異からセントラル部からアンカー部にかけての波動の空間構造の検討を進める。

端損失プラズマ制御のために設置したバリア部アンテナについては、波動解析コードを用いて効率的な ICRF 波動励起の検討を行うとともに、バリア部でより効率的にプラズマ生成を行うため、Type-III アンテナの設計・設置を行い、次年度の実験に備えた。

### (3) 端損失高エネルギーイオンに対する自発励起 ICRF 波動の効果

ダイバータ模擬研究においては端損失エネルギー制御が不可欠であり、その輸送機構を解明し、制御に関する知見を得る必要がある。端損失粒子には keV オーダーの高エネルギーイオンが含まれ、その軸方向輸送には強い温度非等方性に起因して自発励起されるアルベンイオンサイクロトロン(AIC)波動が関係している。高エネルギーイオンがその波動と相互作用すると考えられるセントラル部において、マイクロ波反射計を用いた高温プラズマ内部における波動計測を行い、これまでに AIC 波動間の差周波波動が特にコア領域において非線形的に励起されていることが確かめられている。しかし、波動粒子相互作用を詳細に調べるためには、波動の強度分布や位相分布の全体像を知る必要がある。そこで、本年度は反射計の調整、データ解析の改良を進め、MHz 帯の高周波成分に対して有意義な測定が可能であることを示す結果を得た。

図4に、セントラル部磁力線方向に0.6m離れた2組の送受信アンテナを設置し、AIC



波動に伴う密度揺動を測定した結果を示す。図4 (a)は反射計出力の周波数スペクトルの時間発展であり、色の濃いピークがAIC波動に対応し、時間的に周波数や強度が変化している。図4 (b)は、ほぼ同じ磁力線上の0.6 m離れた位置で計測した密度揺動の間のコヒーレンスの時間発展である。AIC波動の周波数においてコヒーレンスが強い時間帯も存在するが、安定していない。反射波に含まれる振幅・位相変調成分をヘテロダインシステムにより分離し、それぞれのコヒーレンスの時間発展を図4 (c), (d)に示した。振幅変調成分のコヒーレンスは低くノイズレベルであるが(図4 (c))、振幅変調成分のパワースペクトルにはAIC波動成分が確かに存在することから、振幅変調を引き起こす機構が磁力線方向に離れた位置ではコヒーレントに生じず、ランダムな位相で起こることを示唆している。一方、反射計で本来評価したい位相変調成分から求めたコヒーレンス(図4 (d))は高く、時間的に安定している。これらの結果は、GAMMA 10においてグローバルに励起されるAIC波動のコヒーレントな波動構造を、開発したマイクロ波反射計を用いて有意義に調べることができることを示している。AIC波動間の差周波波動が非線形的に励起されることが示唆されているより内側領域ではAIC波動構造が単純ではなく、2点相関で求めた位相差が時間的にも複雑な振る舞いを示すことがわかってきており、今後その詳細を粒子との相互作用に着目して整理する。

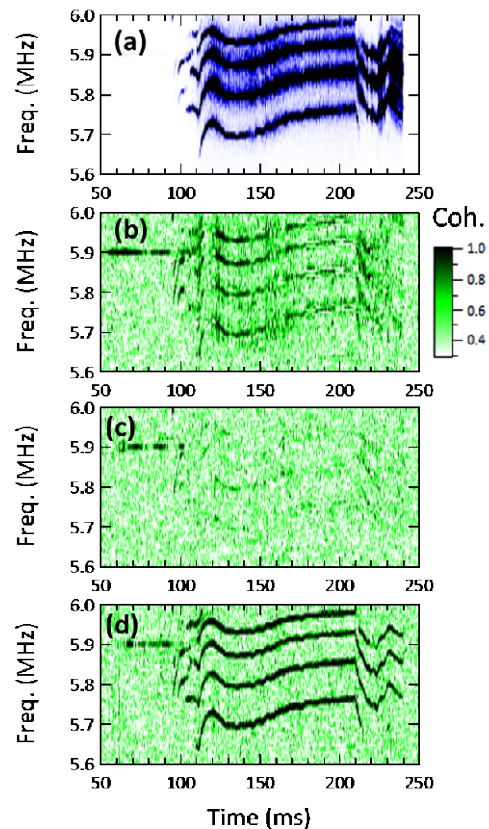


図4 AIC 波動に起因する密度揺動の(a)スペクトル、磁力線方向に0.6 m離れた二点間の反射計信号の(b)コヒーレンス、(c)振幅成分のコヒーレンス、(d)位相成分のコヒーレンスの時間発展。

## 【12】ガンマ10 セントラル部及びプラグ部におけるECH アンテナの開発

ガンマ10において、電子サイクロトロン加熱(ECH)は、高いプラズマ閉じ込め電位の生成及び高い電子温度の達成に、本質的なツールである。主要閉じ込め領域であるセントラル部では、クーロン・ドラッグによるイオンエネルギー損失の低減、高電子温度の安定維持などが重要な研究課題である。また、電位生成領域であるプラグ部では、ミラー端部への強い電子流束を発生させることがわかっており、ECH パワー変調入射する事で、ダイバータ模擬研究に向けた間欠的なELM様高熱流負荷を生成することを重要な研究課題の一つと位置付けている。



セントラル部では、吸収位置制御の観点から、これまでのアンテナ系と比較して、共鳴層での放射分布形状がブロードとなるアンテナ・ミラーの設計(M5、電力密度の1/e 半径が約8 cm、伝送効率95%)を実施し、ガンマ10 実験に適用した(図1)。ブロード・アンテナ系 M5 の場合は、他のアンテナ系でプラズマの回転等の不安定が見られた入射パワーと同等レベルのパワー入射でも、プラズマの回転等は見られずに安定に入射する事が出来、ECH 印加時の不安定性の抑制に効果があったと考えられる。しかしながら、反磁性量の増加は、10-20%程度とそれ程大きくはなかった(図2)。また、トムソン散乱により計測した電子温度は、他のアンテナ系で得られた電子温度と比較して高くはなかった。以上より、偏波制御がし易く高電子温度が得られた直接入射型をベースに、高電子温度と安定入射を両立できるように新しいアンテナを設計(M6)した。その結果、電力密度の1/e 半径が5 cm、伝送効率95%のアンテナ系を設計できた(図3)。

プラグ部では、既存の500 kW ジャイロトロンを用いた ECH システムにおいて、入射パワー変調実験を行い、熱流データ及び端損失電子データの蓄積を行った。特に、径方向分布のデータ取得を詳細に行った。図4に、ガンマ10 西側プラグ部及びエンド部の概略図を示す。プラグ部 ECH のパワー変調によるプラズマ応答を、端損失電子、端損失イオンを計測できる静電エネルギー型分析器(LED, ELIEA)を用いて解析した。熱流は、可動型カロリメーターにより計測した。その結果、380 kW 5 ms のプラグ部 ECH 入射で、 $0.05 \text{ MJ/m}^2$ を超えるエネルギー密度が得られた。ITER のType I ELM のエネルギー密度は、 $0.2 \sim 2 \text{ MJ/m}^2$ と想定されており、それと比較すると1 オーダー程度低いが、入射パワーの増大に伴い、エネルギー密度が、飽和することなくおおそ線形に増大することが明らかとなった。これに基づき、中心軸上のECH パワー放射分布を、1 オーダー程度以上高くする必要があると考察し、ECH パワー放射分布のビーム半径を局在化させるミラー設計を行った。その結果、マイクロ波放射パワー密

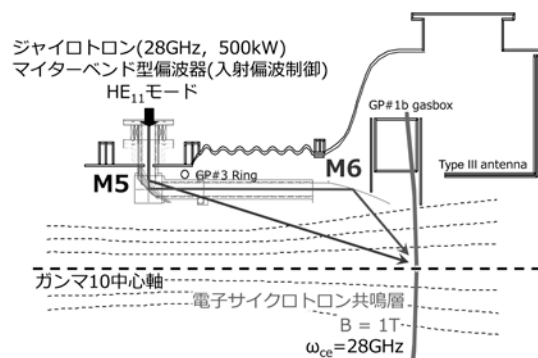


図1 セントラル部 ECH アンテナ配位。

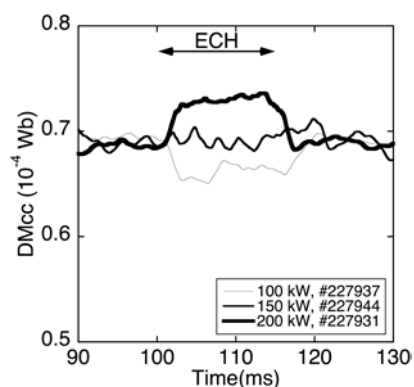


図2 M5 アンテナによる ECH 印加時の反磁性量の時間変化。

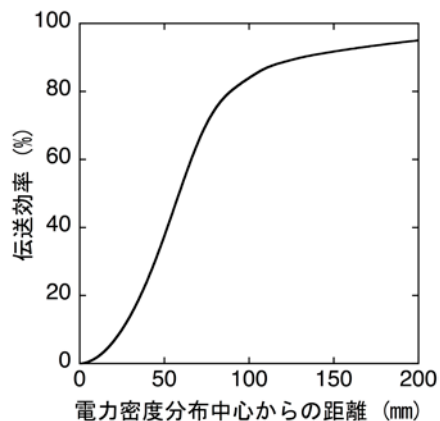


図3 新アンテナ(M6)の伝送効率。

度分布の  $1/e$  半径を、現有のミラーアンテナの 6.3 cm から 4.0 cm に局在化させたミラー形状が得られた(図5)。

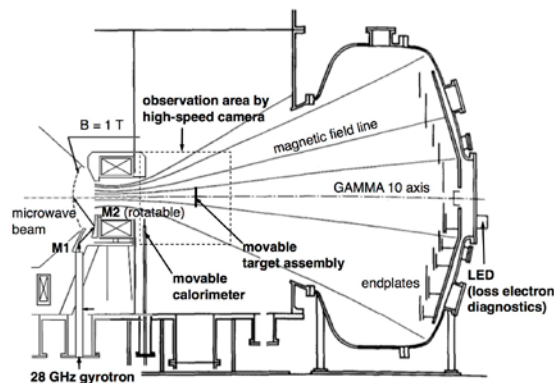


図4 西側プラグ部及びエンド部断面概略図。

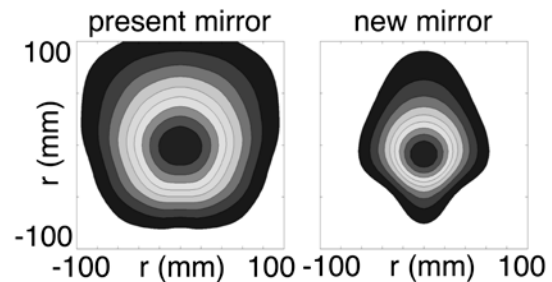


図5 放射パワー密度分布の  $1/e$  半径が、現有の 6.3 cm と 4.0 cm に局在化させたミラー形状の、放射分布計算結果。

### 【13】核融合に向けた大電力ジャイロトロンの開発

#### (1) はじめに

タンデムミラーGAMMA10/PDX では、プラグ部及びセントラル部電子サイクロトロン加熱(ECH)によるプラズマ閉じ込め性能の研究と改善に加え、基幹研究の新展開として開始されたダイバータ模擬研究の高度化に向け、ECH システムの大電力化、長パルス化を進めている。ECH/ECCD(電子サイクロトロン電流駆動)用大電力マイクロ波源である大電力ジャイロトロンの開発は、プラズマ研究センター(PRC)における研究開発の大きな柱の一つと成っており、共同研究として、核融合科学研究所(NIFS)のLHD用、九州大学のQUEST用、プリンストン大学のNSTX-U用、京都大学のHeliotron J用ジャイロトロンの開発も進めているところである。さらに、日本原子力研究開発機構(JAEA)との共同研究として DEMO 炉用 300GHz ジャイロトロンの開発も開始した。

2015年度においては、GAMMA10/PDXのみならず、QUEST、NSTX-U、Heliotron JにおけるECH/ECCD用として使用可能な、28/35GHzの2周波数で動作可能なジャイロトロンの設計を完了し、ジャイロトロンの製作を行った。ジャイロトン搭載前に、主要コンポーネントの一つであるダブルディスク窓の性能試験を行った。一方、NIFSとの共同研究では、154GHzと116GHzの2周波数で動作可能な2周波数ジャイロトロンの設計を開始した。更に、JAEAとの共同研究による300GHzジャイロトロンの開発を継続し、空洞共振に出力窓の反射が大きく影響することを明らかにした。

#### (2) 28/35GHz 2周波数ジャイロトロンの開発

PRCでは28GHz-1MWジャイロトロンを開発し、最大出力で1.2MW、長パルス運転で0.6MW-2sを達成した。本ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学のQUEST装置に適用され、60kAのプラズマ電流立上や、8.2GHzのカットオフ密度より高い  $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  を

超えるオーバードレンスプラズマの生成等の成果を得た。2015 年度の QUEST 実験適用前に発振調整を行い 1.38MW の出力を得た。図 1 に、これまでに得られていたデータも含めた出力と効率のビーム電流依存性を示す。出力アップの要因は、電源調整によりビーム電流 55A まで出力調整が可能となったことによる。

次のステップとして、GAMMA10 におけるダイバータ模擬実験において、より高い熱流束を生成するために GAMMA10 用 28GHz-2MW-3s のジャイロトロンの開発を進めている。このジャイロトロンは、共同研究を有効に進めるため、QUEST で必要とされる動作性能 28GHz-0.4MW-CW（連続動作）、NSTX-U で必要とされる動作性能 28 GHz-1.5~2 MW-3s、Heliotron J で必要とされる動作性能 35 GHz-1 MW-0.5 秒を 1 本のジャイロトロンで動作可能な、28 GHz/35 GHz の 2 周波ジャイロトロンである。

2015 年度は、重要なコンポーネントの一つである出力窓の性能試験を、ジャイロトン管搭載前に行った。2 周波数ジャイロトロンの出力窓は、0.4MW での CW 動作が可能なサファイア製ダブルディスク窓である。ダブルディスク窓は、サファイア・ディスク厚や冷却媒体であるフロリナートの流路ギャップにより周波数帯域特性が変わるため、製造、組立精度により設計値よりずれる可能性がある。そのため、ジャイロトンへの搭載に先立ち、窓の製作、性能評価試験を行った。スペーサーの厚みを 1mm 間隔で 5 パターン変えることで、窓反射率のフロリナート流路ギャップ依存性を測定した。低電力試験では、入射波源として 2mW のガン発振器を用いた。放射アンテナとして HE<sub>11</sub> モード変換器を用い円形コルゲート導波管でガウシアンビームを放射した場合と、矩形ホーンアンテナで TE<sub>01</sub> モードを放射した場合の測定を行った。受信アンテナとしては矩形ホーンアンテナを用いパワーメータで電力の測定を行い、窓有無での受信電力の違いより窓の反射率を算出した。加えて、受信アンテナの代わりに RF 吸収体を置きその温度上昇を IR カメラで計測、窓有無での温度上昇分布の面積積分値の比より反射率の違いを算出した。大電力試験では、28GHz ジャイロトロンで 600kW の出力を出し、ジャイロトン出力窓にダブルディスク窓を取付けた場合の出力を測定することで反射率を算出した。図 2 に低電力試験の結果を、図 3 に大電力試験の結果を計算値と共に示す。測定法により反射率の絶対値

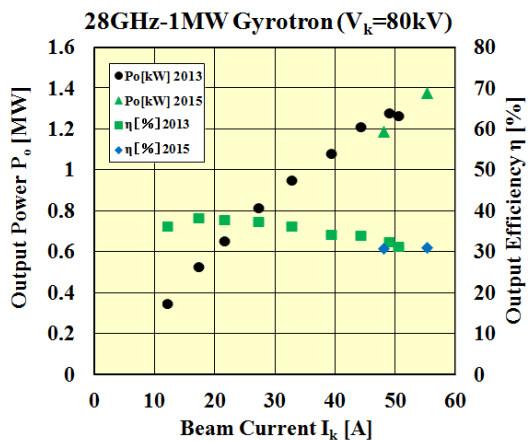


図 1 28GHz-1MW ジャイロトロンの出力と効率のビーム電流依存性

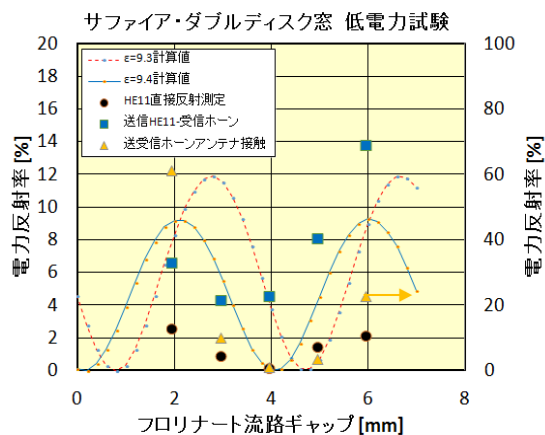


図2 ダブルディスク窓電力反射率のフロリナート流路ギャップ依存性 (2mW 低電力試験)

が違う要因として、屈折の影響や、反射波や位相ずれによる干渉の影響が考えられる。これらの結果より、サファイアの28GHzの誘電率は9.4に近いこと、フロリナート流路ギャップは4mm付近に最適値があることが確認できた。実機搭載後に出力が最大となる様に流路ギャップの微調整を34.8GHz発振の場合も合わせ行う予定である。

また、ダブルディスク窓での効率的な面冷却を行うためには、均一な流れと流速の確保が重要であり、2種類の流路形状において

フロリナート流れ試験を行い、その形状を決定した。窓以外のフロリナート循環システムの圧力損出を減らし、更に流速を上げる改良が必要な事を確認した。実機試験では、窓温度を測定し、必要な対策をしつつCW化を目指す予定である。

ジャイロトロンは設計を完了し、製作組み立てを行い、排気ベーキングまで完了した。今後、耐電圧、耐水圧試験等を実施し、2016年6月より発振試験を開始する予定である。

### (3) 154/116GHz 2周波数ジャイロトロンの設計

NIFS とのジャイロトロン共同研究において、2014年度までに開発した3機の77GHzジャイロトロンと2機の154GHzジャイロトロンは、LHD実験に供されている。全入力電力は5.4MWに達し、LHDにおける電子系内部輸送障壁(electron ITB)実験等に大きく貢献している

2015年度は、LHDにおけるプラズマ実験領域拡大のため、154GHzと116GHzの両方で動作可能な2周波数ジャイロトロンの設計を開始した。154GHzと115.5GHz近傍の両周波数に対し、同一電子銃で良い電子ビームパラメータが得られるか、同一空洞共振器で発振可能か、同一放射器で同じ放射角を持つか、同一出力窓でマッチングが取れるか、同一コレクタで低熱負荷運転が可能か、を検討し空洞発振モードの組み合わせを154GHzで $TE_{38,9}$ モード、116GHzで $TE_{27,1}$ モードに決定した。両モードのピッチファクタ $\alpha=1$ における発振出力のビーム電流依存性を図4に示す。空洞共振器のQ値を下げ、ビームで電流10A程度の低電流では発振しないが、50A以上の大電流での発振効率を上げ、2MW以上の発振が可能な設計としている。

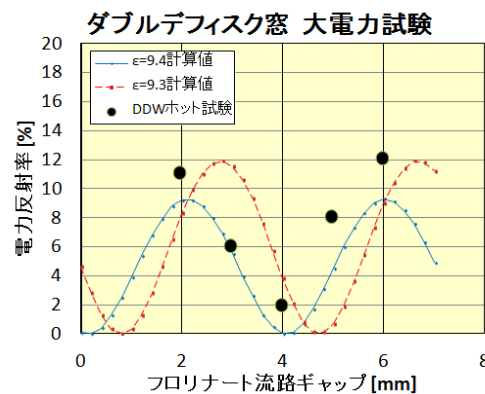


図3 ダブルディスク窓電力反射率のフロリナート流路ギャップ依存性 (600kW 大電力試験)

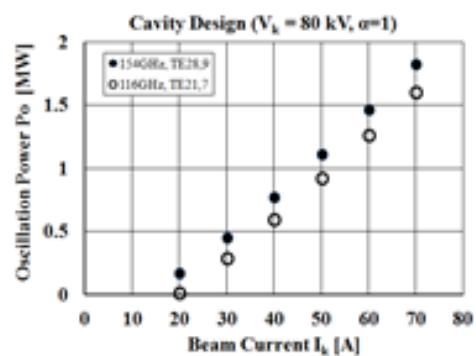


図4 154/116GHz ジャイロトロンの発振電力のビーム電流依存性 ( $\alpha=1$ )

### (4) 300GHz ジャイロトロンの開発

日本原子力研究開発機構(JAEA)との共同研究として、核融合発電に向けた Demo 炉用

300GHz帯ジャイロトロンの開発を進めている。

2015年度の動作試験においては、空洞磁場強度とガン磁場強度に関する発振モードマップを詳細に調べ、競合モードである $TE_{30,19}$ モード(301.8 GHz)の発振が、主モードである $TE_{32,18}$ モード(299.84 GHz)の発振を妨げていることを確認した。出力窓に $SiO_2$ 板を付加することで出力窓の周波数特性を調整することで、窓での反射はにより空洞の実効Q値が変わり、発振特性に影響していることを確認した。この反射の影響は、大電力、長パルス化に向け必須となるモード変換器を内蔵し、出力伝送系の工夫により除去できると考える。出力としては、299.84 GHz ( $TE_{32,18}$ )で522 kW、295.65 GHz ( $TE_{31,18}$ )で542kW、301.8 GHz ( $TE_{30,19}$ )で528kWが得られた。300GHz帯における500kWを超えるmsオーダーの発振は、世界で最初の成果であり、Demo炉の300GHz-MW-CWジャイロトロン開発に向けての大きなステップである。

## 【14】核融合アーカイブズにおける筑波大学プラズマグループとしての活動

核融合研究界においてミラー研究の拠点と目されており、広く関連史料の保管に努めているが、学界からも歴史資料の保存の必要性が求められている。筑波大学プラズマグループは平成17年度より核融合科学研究所アーカイブ共同研究に加わったことで、一層体系的に整理保管する体制が整った。登録管理システムは核融合科学研究所の書式に倣った。原則公開できる紙史料は随時増え、現在も新たに加わった史料の登録を続けている。測定機等ハードウェアのアーカイブについては京都大学を手本に検討している。収集も併行して行って、整理している。歴史資料保存に対する大学の意識の高揚を望む。

平成26年11月以来毎年大学の「筑波大学アーカイブズ設置に向けて法人文書管理に関するアンケート」への物理学専攻の回答に寄与した。

歴史資料の利用は検索調査、利用が2百数十件あった。12月4日核融合科学研究所主催の共同研究会に出席し発表、さらなる情報収集を行った。

## 〈論文〉

01. T. Yoshida, N. Ezumi, K. Sawada, Y. Tanaka, M. Tanaka and K. Nishimura,  
Energy Density Dependence of Hydrogen Combustion Efficiency in Atmospheric Pressure Microwave Plasma,  
Fusion Science and Technology **67**, 3 (2015) 650-653.
02. Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Ichimura, Y. Hosoda, M. Iwamoto, K. Shimizu, K. Hosoi, K. Oki, M. Yoshikawa, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, X. Wang, M. Ichimura,  
Recent results of divertor simulation experiments using D-module in the GAMMA 10/PDX tandem mirror,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 28-35.
03. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, T. Okada, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, T. Oi, K. Ichimura, Y. Nakashima,  
Extension of Operational Regimes with ICRF Heating on GAMMA 10/PDX,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 63-69.
04. K. Oki, M. Sakamoto, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, R. Nohara, K. Nojiri, A. Terakado, M. Mizuguchi, K. Ichimura, H. Takeda,



- Electron Temperature and Density Distributions in a Divertor Simulation Experimental Module with Gas Injection in GAMMA 10/PDX,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 81-86.
05. Masayuki Yoshikawa, Xiaolong Wang, Masahiro Morishita, Yoriko Shima, Masayuki Chikatsu, Junko Kohagura, Mizuki Sakamoto, Ryutaro Minami, Masaki Iso, Yousuke Nakashima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ryo Yasuhara, Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Takashi Minami,  
Development of Thomson Scattering System in GAMMA 10,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 99-104.
  06. K. Nojiri, M. Sakamoto, K. Oki, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, A. Terakado, R. Nohara, M. Mizuguchi, T. Imai,  
RELATION BETWEEN ELECTRON DENSITY AND TEMPERATURE OF DIVERTOR SIMULATION PLASMA AND UPSTREAM PLASMA IN GAMMA 10/PDX,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 120-124.
  07. H. Tanaka, M. Sakamoto, K. Furutachi, K. Oki, M. Mizuguchi, Y. Nagatsuka, M. Yoshikawa, R. Nohara, M. Yoshikawa, J. Kohagura,  
CORRELATION ANALYSIS OF 3-4 KILOHERTZ CORE AND EDGE DENSITY FLUCTUATIONS IN THE GAMMA 10 TANDEM MIRROR DEVICE,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 125-129.
  08. K. Shimizu, Y. Nakashima, Y. Hosoda, K. Ichimura, H. Takeda, M. Iwamoto, K. Oki, M. Sakamoto, T. Imai and M. Ichimura,  
SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS IN THE EXPERIMENTS OF GAS INJECTION TO THE DIVERTOR SIMULATION EXPERIMENTAL MODULE OF GAMMA10/PDX,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 130-135.
  09. S. Sumida, M. Ichimura, T. Yokoyama, M. Hirata, R. Ikezoe, Y. Iwamoto, T. Okada, K. Takeyama, S. Jang, M. Sakamoto, Y. Nakashima, M. Yoshikawa, R. Minami, K. Oki, M. Mizuguchi, K. Ichimura,  
High-Density Plasma Production in the GAMMA 10 Central Cell with ICRF Heating on Both Anchor Cells,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 136-141.
  10. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, T. Kato, M. Uehara, R. Goto, K. Tsumura, Y. Endo and M. Ichimura,  
Design of Mirror Antenna and MW Gyrotron for Control of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 142-146.
  11. T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Kato, H. Idei, K. Hanada, H. Zushi, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura,  
Development of 28 GHz gyrotron for cooperative ECH study,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 147-151.
  12. T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,  
Internal Measurement of Propagation of ICRF Waves by Using Reflectometers on GAMMA 10,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 161-165.
  13. X. Wang, S. Kanno, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Y. Shima, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Oki, T. Imai, M. Ichimura, Y. Nagayama, D. Kuwahara, A. Mase,  
A Novel Frequency-Multiplied Interferometer System with 1-D Horn-Antenna Mixer Array in the GAMMA 10/PDX End Divertor Module,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 178-184.
  14. T. Yokoyama, M. Ichimura, A. Fukuyama, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, Y. Iwamoto, T. Okada, K. Takeyama, S. Jang,  
Analysis of Wave Excitation of the Phase-Control ICRF Antennas with Three-Dimensional Full Wave Code on GAMMA 10,  
Fusion Science and Technology **68** (2015) 185-189.
  15. Kensuke OKI, Mizuki SAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA, Motoki YOSHIKAWA, Kunpei NOJIRI, Ryo NOHARA, Akihiro TERAKADO, Masayuki YOSHIKAWA, Junko KOHAGURA, Hisato TAKEDA, Kazuya ICHIMURA, Tsuyoshi IMAI and Makoto ICHIMURA,  
Measurements of Electron Temperature and Density Distribution on a V-Shaped Target of a Divertor Simulation Experimental Module in GAMMA 10/PDX,  
Plasma and Fusion Research **10** (2015) 1402071.
  16. Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, K. Oki, M. Sakamoto, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai,

- M. Iwamoto, Y. Hosoda, I. Katanuma, T. Kariya, S. Kigure, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, S. Takahashi, M. Yoshikawa, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, T. Shikama, M. Shoji, A. Tonegawa, Y. Ueda,  
Progress of divertor simulation research toward the realization of detached plasma using a large tandem mirror device,  
*Journal of Nuclear Materials* **463** (2015) 537-540.
17. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Morishita, M. Chikatsu, Y. Shima, J. Kohagura, R. Yasuhara, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, I. Yamada, H. Funaba, K. Kawataha, and T. Minami,  
Electron Temperature Measurements by the use of Multi-Pass Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,  
*Journal of Instrumentation* **10** (2015) T08003.
  18. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, A. Mase and M. Yoshikawa,  
Miniaturized Wilkinson Power Divider with Extra Coupled Line Section for Compensation,  
*Microwave and Optical Technology Letters* **57**, 8 (2015) 1869-1873.
  19. A. Kuzmin, H. Zushi, I. Takagi, SK, Sharma, A. Rusinov, Y. Inoue, Y. Hirooka, H. Zhou, M. Kobayashi, M. Sakamoto,  
Global gas balance and influence of atomic hydrogen irradiation on the wall inventory in steady-state operation of QUEST tokamak,  
*Journal of Nuclear Materials* **463** (2015) 1087-1090.
  20. Gen MOTOJIMA, Naoaki YOSHIDA, Takanori MURASE, Hirohiko TANAKA, Suguru MASUZAKI, Ryuichi SAKAMOTO, Masayuki TOKITANI, Kenji MATSUMOTO, Mitsutaka MIYAMOTO, Miyuki YAJIMA, Mizuki SAKAMOTO, Hiroshi YAMADA, Tomohiro MORISAKI and LHD Experiment Group,  
Preliminary Examination of Reflection Coefficient Measurement of RGB Lights on the First Wall in LHD,  
*Plasma and Fusion Research* **10** (2015) 1202074.
  21. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Okada, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, S. Jang, K. Takeyama, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, and X. Wang,  
Wave excitation by nonlinear coupling among shear Alfvén waves in a mirror-confined plasma,  
*Physics of Plasmas* **22** (2015) 090701.
  22. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, T. Kato, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, Y. Mitsunaka,  
Development of gyrotrons for fusion with power exceeding 1 MW over at wide frequency range,  
*Nuclear Fusion* **55** (2015) 93009.
  23. Ida, K; Nagaoka, K; Inagaki, S; Kasahara, H; Evans, T; Yoshinuma, M; Kamiya, K; Ohdach, S; Osakabe, M; Kobayashi, M; Sudo, S; Itoh, K; Akiyama, T; Emoto, M; Dinklage, A; Du, X; Fujii, K; Goto, M; Goto, T; Hasuo, M; Hidalgo, C; Ichiguchi, K; Ishizawa, A; Jakubowski, M; Kawamura, G; Kato, D; Morita, S; Mukai, K; Murakami, I; Murakami, S; Narushima, Y; Nunami, M; Ohno, N; Pablant, N; Sakakibara, S; Seki, T; Shimozuma, T; Shoji, M; Tanaka, K; Tokuzawa, T; Todo, Y; Wang, H; Yokoyama, M; Yamada, H; Takeiri, Y; Mutoh, T; Imagawa, S; Mito, T; Nagayama, Y; Watanabe, KY; Ashikawa, N; Chikaraishi, H; Ejiri, A; Furukawa, M; Fujita, T; Hamaguchi, S; Igami, H; Isobe, M ; Masuzaki, S; Morisaki, T; Motojima, G; Nagasaki, K; Nakano, H; Oya, Y; Suzuki, C; Suzuki, Y; Sakamoto, R; Sakamoto, M; Sanpei, A; Takahashi, H ; Tsuchiya, H; Tokitani, M; Ueda, Y; Yoshimura, Y; Yamamoto, S; Nishimura, K ; Sugama, H; Yamamoto, T; Idei, H; Isayama, A; Kitajima, S; Masamune, S ; Shinohara, K; Bawankar, PS; Bernard, E; von Berkel, M; Funaba, H; Huang, XL ; Ii, T; Ido, T; Ikeda, K; Kamio, S; Kumazawa, R; Kobayashi, T; Moon, C ; Muto, S; Miyazawa, J; Ming, T; Nakamura, Y ; Nishimura, S; Ogawa, K; Ozaki, T; Oishi, T; Ohno, M; Pandya, S; Shimizu, A; Seki, R; Sano, R; Saito, K; Sakaue, H; Takemura, Y; Tsumori, K; Tamura, N; Tanaka, H; Toi, K; Wieland, B ; Yamada, I; Yasuhara, R; Zhang, H; Kaneko, O; Komori, A,  
Overview of transport and MHD stability study: focusing on the impact of magnetic field topology in the Large Helical Device,  
*Nuclear Fusion* **55**, 10 (2015) 104018.
  24. M. Yoshikawa, H. V. D. Maiden, R. AL, K. Bystrov, J. Vernimmen, J. Kohagura, Y. Shima, X. Wang, M. Ichimura, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,  
Preliminary Measurements of Low Frequency Fluctuations by a Microwave Interferometer System and a Fast Camera in Pilot-PSI Device,  
*Plasma and Fusion Research* **10** (2015) 1202088.
  25. X. Wang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, R. Ikezoe, M.Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, Z. Ma, I. Sakagami and A. Mase,

- A Narrow Band-pass Filter Type Wilkinson Power Divider for I-Q Demodulator in Microwave Interferometer System,  
Journal of Instrumentation **10** (2015) C11005.
26. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, R. Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, and T. Minami,  
Radial Electron Temperature and Density Measurements Using Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,  
Journal of Instrumentation **10** (2015) C11006.
27. J. Kohagura, X. Wang, S. Kanno, M. Yoshikawa, D. Kuwahara, Y. Nagayama, Y. Shima, M. Chikatsu, K. Nojiri, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, and A. Mase,  
Development of microwave interferometer system for divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,  
Journal of Instrumentation **10** (2015) C12024.
28. D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase and S. Shinohara,  
Development of local oscillator integrated antenna array for microwave imaging diagnostics,  
Journal of Instrumentation **10** (2015) C12031.
29. Junko KOHAGURA, Tokihiko TOKUZAWA, Masayuki YOSHIKAWA, Kohei NARITA, Mizuki SAKAMOTO and Yousuke NAKASHIMA,  
Doppler Reflectometer System for Measuring Rotation Velocity of Fluctuation in GAMMA 10,  
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2402022.
30. Tomohiro KATSURA, Takahiro WAKAIZUMI, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA and Yousuke NAKASHIMA,  
Studies on the Axial Position of the Decelerator in Traveling Wave Direct Energy Convertor,  
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2405013.
31. Masaki HAMABE, Hiroaki IZAWA, Hiromasa TAKENO, Satoshi NAKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA,  
Studies on the effect of radio frequency field in a cusp-type charge separation device for direct energy conversion,  
Plasma and Fusion Research **11** (2016) 2405028.

## 〈学位論文〉

### 学位論文（修士）[数理物質科学研究科]

01. 磯 将貴 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた GAMMA10 プラズマの揺動相関解析
02. 上原 真 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX セントラル ECRH のプラズマ加熱特性とアンテナ改良研究
03. 菅野 傑 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験におけるマイクロ波イメージング干渉計を用いた線電子密度計測
04. 清水啓太 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験における分光計測を用いた不純物の挙動解析
05. 白石智洋 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX 西プラグ部における位相イメージング干渉計を用いたプラズマ電子密度計測
06. 寺門明紘 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマへの水素ガス供給による非接触プラズマ生成時のバルマー線強度空間分布計測
07. 野尻訓平 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX における水素ガス追加供給によるダイバータ模擬プラズマの非接触化時の静電プローブ計測
08. 岩本嘉章 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA10 アンカー部高周波加熱時のセントラル周辺部浮遊電位解析
09. 岡田拓也 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
マイクロ波反射計を用いた高温ミラープラズマ中の高周波波動伝搬計測
10. 隅田脩平 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]  
GAMMA 10/PDX におけるアンカー部高周波加熱を用いたプラズマ高密度化
11. 小田弦之介 [修士（工学），数理物質科学研究科物理学専攻]

学位論文 (学士) [理工学群]

12. 新井瑞穂 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX における D-module へのガス入射時のセントラル部のプラズマ電子密度測定
13. 宮本泰平 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬部における Thomson 散乱計測システムの導入
14. 板垣惇平 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA10 アンカー部における高周波加熱時の密度変動及び揺動計測
15. 伊能俊太郎 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10 セントラル部に長期設置されたセントラル部に長期設置されたタングステ試料の重水素吸蔵特性評価
16. 江橋優斗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
28/35GHz 2 周波数ジャイロトロン用ダブルディスク出力窓の性能評価試験
17. 大久保克朗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA10 セントラル部周辺領域プラズマにおける高速駆動プローブを用いた分布測定
18. 小野寺悠斗 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
波動計算コードを用いた GAMMA10/PDX バリア部高周波アンテナの検討
19. 梶野悟史 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA10/PDX セントラル ECRH アンテナの改良研究
20. 横土敬幸 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX エンド部における不純物ガス入射時のプラズマ分光計測
21. 根本紀也 [学士 (理学), 理工学群物理学類]  
GAMMA 10/PDX におけるセントラル部 H $\alpha$  線計測器を用いた非接触プラズマ生成時のコアプラズマへの影響の研究

<講演>

01. X. Wang, Z. Ma and I. Sakagami,  
A compact and harmonic suppression Wilkinson power divider with general pi type structure,  
IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Phoenix, AZ, USA, 2015.5.17-2015.5.22).
02. M. Sakamoto, H. Tanaka, A. Terakado. R. Ohyama, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Tokitani,  
Impact of Surface Modification on Hydrogen Isotope Retention in Tungsten,  
15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications  
(Aix-en-Provence, France, 2015.5.18-2015.5.22).
03. M. Sakamoto, R. Ohyama, A. Rusinov and N. Yoshida,  
Impact of surface modification (He bombardment and W deposition) on hydrogen isotope retention in tungsten,  
21st ITPA meeting on SOL/divertor physics (Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA,  
2015.6.9-2015.6.12).
04. Yasuhisa Oda, Tsuyoshi Kariya, Ryutaro Minami, Ryosuke Ikeda, Ken Kajiwara, Koji Takahashi, Kazuo Hayashi,  
Tsuyoshi Imai, Keishi Sakamoto,  
Progress of 300 GHz high order mode gyrotron development,  
40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Hong Kong, 2015.8.23-2015.8.28)  
TS-68.
05. H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Ii, R. Makino, S. Kamio, S. Ito, S. Kobayashi, Y.  
Mizuno, K. Okada, T. Mutoh, T. Kariya, R. Minami, T. Imai,  
ECRH system upgrade for high temperature plasma in the LHD,  
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
06. T. Numakura, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, M. Uehara, K. Tsumura,  
Code Development for the Calculations of the Multi-frequency Oscillations in the Cavity of the Future High-Power  
Gyrotrons,  
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
07. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y.  
Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki,  
F. Sano, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka,



- Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons in University of Tsukuba,  
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas 2015 (Tokyo, 2015.8.31-2015.9.2).
08. Y. Nakashima and GAMMA 10 group,  
Recent results of divertor simulation experiments in the GAMMA 10/PDX tandem mirror,  
5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (Juelich, Germany,  
2015.9.7-2015.9.9) I-5.
  09. K. Ichimura, Y. Nakashima, M. Fukumoto, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ichimur R. Ikezoe,  
M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai,  
Analysis of neutral particle recycling and pumping in detached plasma experiments in the D-module of GAMMA  
10/PDX,  
5th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (Juelich, Germany,  
2015.9.7-2015.9.9) III-1.
  10. M. Sakamoto, H. Tanaka, S. Ino, H. Watanabe, M. Tokitani, R. Ohyama, A. Rusinov and N. Yoshida,  
Hydrogen isotope retention in W irradiated by heavy ions and helium plasma,  
IAEA 2nd Research Coordination Meeting of Coordinated Research Project on Plasma-Wall Interaction with  
Irradiated Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Devices (Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,  
2015.9.8-2015.9.11).
  11. I. Katanuma and G. Oda,  
Particle simulation on the growth of plasma blob in an open system,  
15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Nara, Japan, 2015.9.9-2015.9.11) P1-07.
  12. Naomichi Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S.  
Masuzaki, Y. Nakashima,  
Anisotropy of Ion Temperature Measured by using Ion Sensitive Probe,  
International Workshop on Electric Probes in Magnetized Plasmas (IWEP2015) (Sozopol, Bulgaria,  
2015.9.16-2015.9.18) O1- Fri. 18 SEP.
  13. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, R.  
Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, T. Minami,  
Radial Electron Temperature and Density Measurements Using Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,  
2015.9.27-2015.10.1) C4.
  14. D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi,  
A. Mase, S. Shinohara,  
Development of local oscillator integrated antenna array for microwave imaging diagnostics,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,  
2015.9.27-2015.10.1) T8.
  15. X. Wang, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, R. Ikezoe, M. Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, Z. Ma, I.  
Sakagami and A. Mase,  
A Narrow Band-pass Filter Type Wilkinson Power Divider for I-Q Demodulator in Microwave Interferometer  
System,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,  
2015.9.27-2015.10.1) P1.01.
  16. H. Funaba, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Hayashi, M. Yoshikawa, T. Minami and LHD Experiment Group,  
Data processing for real-time measurement of electron temperature and density by Thomson scattering in the long  
pulse plasmas on LHD,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,  
2015.9.27-2015.10.1) P1.08.
  17. J. Kohagura, X. Wang, S. Kanno, M. Yoshikawa, D. Kuwahara, Y. Nagayama, Y. Shima, M. Chikatsu, K. Nojiri, M.  
Sakamoto, T. Imai, Y. Nakashima, A. Mase,  
Development of microwave interferometer system for divertor simulation experiments in GAMMA 10/PDX,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,  
2015.9.27-2015.10.1) P2.18.
  18. T. Tokuzawa, Y. Kadoya, M. Tani, K. Yamamoto, M. Hangyo, H. Kitahara, J. Kohagura, M. Yoshikawa, H. Idei, M.  
Nishiura, K. Tanaka, I. Yamada, and K. Kawahata,  
Application study for magnetically confined fusion plasma diagnostics using pulsed terahertz waves,  
17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Gateaux Kingdom Sapporo, Hokkaido, Japan,

- 2015.9.27-2015.10.1) P2.20.
19. Naomichi Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, K. Narita, M. Sakamoto, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Nakashima,  
Ion temperature measured by probes in the D-module plasma of GAMMA 10/PDX,  
Fusion Research (PMIF 2015) (Juelich, Germany, 2015.10.7-2015.10.9) III-2.
  20. K.Hanada, H.Idei, N.Yoshida, H.Zushi, K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, M.Hasegawa, O.Watanabe, T.Onchi, A.Kuzmin, H.Watanabe, K.Tokunaga, A.Higashijima, S.Kawasaki, H.Nakashima, T.Nagata, T.Kariya, T.Imai, A.Ejiri, O.Mitarai, A.Fukuyama, Y.Takase, X.Gao, H.Liu J. Qian, M.Ono, R.Raman,  
Recent progress on non-inductive current drive and particle balance control towards steady-state operation on QUEST,  
18th International Spherical Torus Workshop (Princeton University, 2015.11.3-2015.11.6).
  21. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka,  
Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons for Present ST and Fusion Experiments in University of Tsukuba,  
18th International Spherical Torus Workshop (Princeton University, 2015.11.3-2015.11.6).
  22. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, K. Oki, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Ichimura, K. Shimizu, M. Fukumoto, D. Kato, H. Sakaue, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Imai, M. Ichimura,  
Hydrogen recycling in the divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) I-7.
  23. J. Kohagura, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa, Y. Nakashima,  
Doppler reflectometer system for measuring plasma rotation velocity in GAMMA 10,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-19.
  24. Masaki HAMABE, Hiroaki IZAWA, Hiromasa TAKENO, Satoshi NAKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA,  
Studies on the effect of radio frequency field in a cusp-type charge separation device for direct energy conversion,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-38.
  25. Tomohiro KATSURA, Takahiro WAKAIZUMI, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA,  
Studies on the Axial Position of the Decelerator in Traveling Wave Direct Energy Converter,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-39.
  26. M. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashia, Y. Nakano, N. Nishinob, K. Hosoi, K. Ichimura, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, A. Terakado, M. Yoshikawa, J. Kohagura, R. Ikezoe, X. Wang, M. Ichimura, T. Imai,  
Effect of Laval Nozzle in the GAMMA 10 SMBI Experiments,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P1-71.
  27. H. Takeda, Y. Nakashima, A. Hatayama, M.S. Islam, K. Ichimura, M.M. Islam, K. Shimizu, T. Fukui, M. Sakamoto, T. Imai,  
Numerical Simulation Study of Plasma Flow in the GAMMA10/PDX End-cell Using a Fluid Code,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-08.
  28. Md. Shahinul ISLAM, Yousuke NAKASHIMA, Hiroto MATSUURA, Kazuya ICHIMURA, Md. Maidul ISLAM, Keita SHIMIZU, Kazuma FUKUI, Masato OHUCHI, Kunpei NOJIRI, Akihiro TERAOKADO, Naomichi EZUMI, Mizuki SAKAMOTO and Tsuyoshi IMAI,  
Study of Heat and Particle flux in the case of Gas Injection in the D-module of GAMMA 10/PDX,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-15.
  29. K. Ichimura, Y. Nakashima, M. M. Islam, M. S. Islam, K. Shimizu, K. Fukui, M. Ohuchi, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Yoshikawa, N. Ezumi, M. Sakamoto, M. Ichimura and T. Imai,  
Study of the axial plasma confinement for high particle flux operations in GAMMA 10/PDX,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-16.
  30. Masayuki Yoshikawa, Ryuya Ikezoe, Kouichi Ohta, Xiaolong Wang, Junko Kohagura, Yoriko Shima, Masayuki Chikatsu, Kazuya Ichimura, Mizuki Sakamoto, Makoto Ichimura, Tsuyoshi Imai, Ryutaro Minami, Kouhei Tsumura, and Yousuke Nakashima,  
Direct observation of electron heating by electron Landau damping of Alfvén ion cyclotron waves with Thomson scattering system in the tandem mirror GAMMA 10/PDX,  
25th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, 2015.11.3-2015.11.6) P2-71.

31. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Okada, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Iwamoto, S. Sumida, K. Takeyama, S. Jang, T. Oi, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,  
Excitation of low-frequency waves via coupling between slow Alfvén waves in the GAMMA 10 tandem mirror,  
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Savannah, US, 2015.11.16-2015.11.20) NP12.00042.
32. T. Okada, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, Y. Iwamoto, S. Jang, J. Itagaki, Y. Onodera, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,  
Measurement of the ICRF wave propagation in the internal region of plasmas by using reflectometers on GAMMA10,  
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Savannah, US, 2015.11.16-2015.11.20) NP12.00043.
33. X. Wang, Z. Ma, I. Sakagami, M. Yoshikawa and A. Mase,  
Wilkinson Power Divider with Band-pass Filter Response and Easy Structure,  
Asia-Pacific Microw. Conf. (Nanjing, China, 2015.12.6-2015.12.9) TU2E-5.
34. H. Idei, K. Hanada, H. Zushi, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, T. Onchi, O. Watanabe, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, T. Togashi, A. Ejiri, Y. Takase, A. Fukuyama, H. Igami, S. Kubo, S. Ide, S. Kawasaki, T. Nakashima, A. Higashijima,  
Non-inductive Plasma Current Start-up and Sustainment with Microwave and Millimeter-wave in QUEST,  
10th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Gandhinagar, 2015.12.14-2015.12.18).
35. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, Y. Nakashima, T. Shimoizuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, K. Takahashi, H. Idei, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi and Y. Mitsunaka,  
Development of Over 1 MW Gyrotrons and ECH Systems in University of Tsukuba,  
Japan-Korea Workshop on "Physics and Technology of Heating and Current Drive" (Hitachi, Japan, 2015.12.22-2015.12.23).
36. Y. Nakashima and GAMMA 10 group,  
Progress of Detached Plasma Characterization Using a Large Tandem Mirror (Comparison of N<sub>2</sub> and Ne seeding),  
22nd ITPA meeting on SOL/divertor physics (Frascati, Italy, 2016.1.25-2016.1.28).

## 〈解説・紀要等〉

01. N. Ezumi, K. Sawada, N. Ohno, H. Tanaka, M. Kobayashi, S. Masuzaki,  
Investigation of Spatial Profile of the LHD Detached Plasma,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 9.
02. Nagasaki, K., Osakabe, M., Seki, T., Igami, H., Yoshimura, Y., Idei, H., Takase, Y., Saito, K., Okada, H., Mutoh, T., Kasahara, H., Ichimura, M., Ikezoe, R., Murakami, S., Seki, R., Kubo, S., Shimoizuma, T., Takahashi, H., Imai, T., Kariya, T., Nishiura, M., Nagaoka, K., Tokuzawa, T., Kumazawa, R., Kamio, S., Takeiri, Y., Ii, T., Tsumori, K., Nakano, H., Ikeda, K., Kisaki, M., Ejiri, A.,  
Exploration of Advanced Plasma Heating Scenarios in the Large Helical Device,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 126.
03. Mutoh, T., Saito, K., Kamio, S., Seki, R., Watanabe, T., Tsujii, N., Shinya, T., Nishiura, M., Ikezoe, R.,  
Workshop on "Development and Reactor Application of ICRF Heating Device",  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 194.
04. M. Yoshikawa, K. Ohta, X. Wang, M. Chikatsu, J. Kohagura, Y. Shima, T. Imai, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Minami, R. Yasuhara, K. Kawahata, I. Yamada, H. Funaba,  
Development of the Multi-pass Thomson Scattering System GAMMA 10 Tandem Mirror,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 207.
05. Sakamoto, M., Nohara, R., Yoshikawa, M., Terakado, A., Nojiri, K., Oki, K., Nakashima, Y., Ichimura, M., Imai, T., Kato, D., Sakaue, H.,  
Impact of Excited States of Reflected Hydrogen Atoms on Hydrogen Recycling,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 207.
06. N. Ezumi, K. Sawada, Y. Tanaka, M. Tanaka, S. Takayama, K. Nishimura,  
Hydrocarbon Combustion in Atmospheric Pressure Plasma,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 336.
07. M. Yoshikawa, A. Sugiyama, Y. Washo, I. Katanuma, Y. Shima, Y. Nakashima, H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, Y. Nagayama,  
Data Transfer and Direct Data Acquisition from GAMMA 10/PDX to LHD Virtual Laboratory via SNET,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 449.

08. Ichimura, M., GAMMA 10/PDX Group,  
Study of Boundary Plasmas in Making Use of Potential and Heat-flux Control Effect of High Power Gyrotrons  
Coinciding with their Development and Open Magnetic Field Configuration,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 454.
09. Ando, A., Suzuki, K., Ichimura, M., Ikezoe, R., Yokoyama, T., Iimura, T., Saito, Y.,  
Plasma Flow Measurement at Peripheral Region with ICRF Heating in GAMMA10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 455.
10. M. Fukumoto, H. Kubo, Y. Nakashima, K. Ichimura, M. Sakamoto,  
Effect of Neutrals on Decrease in Heat and Particle Loads on the V-shaped Target in GAMMA10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 456.
11. H. Tanaka, M. Sakamoto, M. Mizuguchi, K. Oki, M. Yoshikawa, K. Nojiri, R. Nohara, A. Terakado, J. Kohagura, M. Yoshikawa, N. Ohno, Y. Tsuji,  
Extraction of Spatial Plasma Structures by Analyzing Fluctuations in Core and Edge of GAMMA 10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 457.
12. M. Yoshikawa, K. Nagasu, Y. Shimamura, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, T. Imai, M. Ichimura, Y. Nakashima, T. Minami, K. Kawahata, I. Yamada, H. Funaba,  
Development of Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 458.
13. H. Matsuura, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, S. Nagaoka, M. Shoji,  
Development of the Monitoring System for Divertor Heat Flux Distribution,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 460.
14. Minami, R., Imai, T., Kariya, T., Numakura, T., Nakashima, Y., Sakamoto, M., Oki, K., Kato, T., Kubo, S., Shimozuma, T., Yoshimura, Y., Igami, H., Takahashi, H.,  
Experimental Study on Generation of High Heat Flux by ECH Modulation for ELM Simulation Experiments,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 461.
15. Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, R. Ikezoe, K. Oki, M. Sakamoto, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, J. Kohagura, T. Numakura, M. Hirata, R. Minami, K. Hosoi, H. Takeda, S. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, N. Ohno, Y. Ueda, N. Asakura, H. Kubo, M. Fukumoto, A. Hatayama, A. Tonegawa, N. Nishino, S. Kado, H. Matsuura, T. Shikama, S. Nagata, A. Okamoto, A. Sagara, Y. Hirooka, S. Masuzaki, M. Shoji,  
Study of Divertor Simulation Using End-region of a Tandem Mirror – Mechanisms of Radiation Cooling Divertor and Plasma Detachment –,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 462.
16. Y. Nakashima, M. Sakamoto, M. Hirata, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, S. Nagata and T. Shikama,  
Plasma irradiation effects on hydrogen behavior in nuclear fusion materials,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 463.
17. D. Kuwahara, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Morikawa, Y. Hasegawa, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, N. Ito, Y. Kogi, A. Mase,  
Development of 1-Dimensional Antenna Array for Microwave Imaging Interferometer in GAMMA 10 Divertor Simulation Experiments,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 464.
18. Y. Hirooka, H. Zhou, Y. Nakashima, M. Sakamoto,  
Effects of Particle Control in the End Region on the Central Plasma Characteristics in GAMMA-10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 465.
19. Shinohara, S., Kuwahara, D., Ishii, T., Otsuka, S., Nakagawa, T., Kishi, K., Sakata, M., Tanaka, E., Hada, T., Ichimura, M., Ikezoe, R., Yokoyama, T.,  
Generation and Control of High-Density Flow in Open System Plasma,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 467.
20. H. Takeno, S. Nakamoto, J. Miyazawa, T. Goto, Y. Nakashima, I. Katanuma,  
Experimental Verification of Constant Deceleration of TWDEC for its Miniaturization,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 469.
21. Fukuyama, A., Ichimura, M., Yokoyama, T., Hirata, M., Ikezoe, R.,  
Wave Excitation in the Anchor Cell of GAMMA 10 with Nonaxisymmetric Configuration,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 470.



22. Ikezoe, R., Ichimura, M., Hirata, M., Iwamoto, Y., Okada, T., Sumida, S., Mutoh, T., Seki, T., Saito, K., Kasahara, H., Watanabe, T.,  
Effect of Spontaneously Excited ICRF Waves on the End-loss Energetic Ions in GAMMA 10,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 473.
23. H. Watanabe, M. Sakamoto, M. Tokitani,  
Study on Hydrogen Retention and Hydrogen Recycling in Radiation Damaged Tungsten,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 474.
24. T. Tokuzawa, Y. Nagayama, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, A. Mase,  
Developments of Advanced Microwave Diagnostics for Future Fusion Plasma Reactor Approaching by  
Time-Domain Spectroscopy Technique,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 475.
25. S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, N. Kenmochi, T. Harada, M. Kurimoto, N. Nishino, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, M. Shoji,  
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas — Analysis of Neutral Behavior and Optimization of Particle Fueling in Open Magnetic Field Plasmas —,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 476.
26. Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, M. Iwamoto, Y. Hosoda, K. Shimizu, M. Yoshikawa, J. Kohagura, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, N. Nishino, M. Shoji, T. Morisaki, J. Miyazawa,  
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas (Fueling Optimization Using H  Measurements in Heliotron J),  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 487.
27. Kariya T., Imai T., Minami R., Numakura T, Kato K., Zushi H., Hanada K., Idei H., Nagasaki K., Saito T., Tatematsu Y., Yamaguchi Y., Kubo S., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi, H.,  
Cooperative 28 GHz ECH study for high density plasma heating and development of 14 GHz and 28 GHz/35 GHz gyrotron,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 511.
28. Sakamoto, M., Watanabe, H., Yoshida, N., Tokitani, M.,  
Microstructure and Thermal Desorption of Deuterium in Irradiated Pure Tungsten,  
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2014 - March 2015**, (2015) 535.
29. 江角直道,  
LHD 非接触プラズマの空間特性の理解,  
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 3.
30. 坂本瑞樹,  
水素リサイクリングに対する反射水素励起状態の影響,  
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 168.
31. 江角直道,  
マイクロ波大気圧プラズマによる炭化水素の燃焼,  
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 182.
32. 江角直道,  
「境界領域プラズマ挙動の理解とその制御」研究会,  
平成 26 年度核融合科学研究所一般共同研究成果報告書 (2016) 371-377.
33. 三好昭一、板倉昭慶、平田久子  
筑波大学プラズマ研究センター設立の経過、  
平成 27 年度第 2 回自然科学系アーカイブズ及び核融合アーカイブズ研究会 (平成 27 年 12 月 4 日、核融合科学研究所) .