

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
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴、南龍太郎
助教	池添竜也
技術専門職員	大川和夫
シニアスタッフ	平田久子
大学院生	26名

共同研究者

教授	市村 真、(物理工学域)
准教授	片沼伊佐夫(物理工学域)
研究員	大木健輔、王 小龍

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
研究支援推進員	千勝雅之
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、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、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・研究協力の下に、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、端部での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、第24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。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ようとしている。

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。

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。

【3】研究成果の概要

筑波大学プラズマ研究センターでは、第2期中期目標・中期計画の大学の方針に沿った「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」をテーマとして掲げ、実験的、また、理論的研究を推進している。タンデムミラー装置における電位・電場形成による磁力線方向、磁力線に直角方向の輸送改善を基盤とし、ヘリカルやトカマク装置などのダイバータを模擬する実験を含む境界プラズマの研究、また、プラズマと壁との相互作用 (PWI)

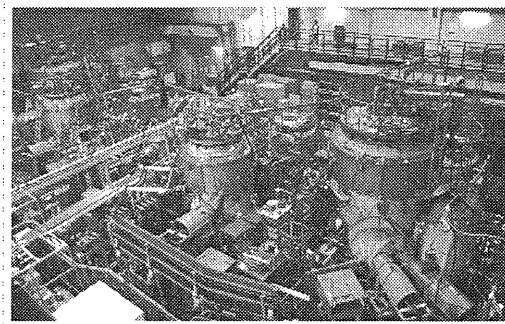


図1 世界最大のミラー型閉じ込め装置である筑波大学プラズマ研究センターのGAMMA10タンデムミラー写真

や材料へのプラズマ照射の研究も積極的に進めている。図1に、最近のGAMMA 10/PDX 装置の写真を示した。ミラー磁場配位におけるプラズマの特長である端損失粒子を活用することにより、数億度のコアプラズマと数万度の境界プラズマ双方の物理を理解し、その制御に貢献することを目指している。平成25年度には、九州大学より小型のプラズマ壁相互作用 (PWI) 実験装置 APSEDAS を移設し、GAMMA10/PDX 装置と相補的に実験を進めることが可能となった。開放端プラズマとなるトラス系の周辺プラズマやダイバータ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、物理の解明とそれを通じたプラズマ壁相互作用の研究を推進している。また、これまでに電位制御の道具として開発し、筑波大学プラズマ研究センターの大きな強みとなっているジャイロトロンは、将来の核融合炉における加熱装置として最も有望視されている。現在、核融合科学研究所、日本原子力研究開発機構、東芝電子管デバイス社との共同研究のもと、14 - 300GHz の広い周波数帯において、マルチ MW ジャイロトロン、マルチ周波数ジャイロトロン開発を進めている。

これまでに、ダイバータ模擬研究では、ITER の定常熱負荷相当の 10 MW/m^2 以上の熱流束を達成し、端部からの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字ターゲットを持つ閉構造ダイバータ模擬実験モジュール (D-モジュール) を導入し、初期実験を順調に開始した。H25年度は、D-モジュール実験を進展させるとともに、ダイバータ部の計測充実と加熱系の拡充を行った。また、高温壁実験を念頭とした標的のタングステン板の高温化を進めている。ジャイロトロン開発では、九州大学とのセンター間連携を推進、球状トカマク装置の電流駆動実験に筑波大学のジャイロトロンを提供し、これまでの電流値を大幅に超える電流駆動に成功した。九州大学ばかりでなく、米国プリンストン大学や京都大学との共同研究を進めているところである。

双方向型共同研究を活用し、各大学の研究者の多様な視点・豊富な経験に加え、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目標としている。

(1) ダイバータ模擬実験モジュール

図2、3には、平成24年度にGAMMA10/PDX に設置した西エンド部ダイバータ模擬実験モジュール (D-モジュール) の挿入位置とその形状の模式図と概略図 (写真) を示した。このD-モジュールは真空中で上下移動が可能であり、実験に使用しないときには、これまでの配位での実験が可能である。ステンレス製のモジュールの入口から図2に示したように端損失プラズマ流が導入される。

図3に示すように、D-モジュール内部にはV字型のターゲット板が組み込まれ、V字の角度の調整や、その後部の仕切りの開閉を真空中で行うことができる構造となっていて、プラズマのダイバータ板への入射角度やモジュール内の排気速度を変えることが可能である。ダイバータ板内に設置された導入口からの希ガス入射等による放射冷却を利用した非接触ダイバータ実験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、PWI 研究が可能となっている。V字のターゲット板には、0.2mm厚のタングステン板が取り付けられており、電気ヒータにより最大 300°C まで温度を上げることができる。ターゲット板には、プラズマの電子温度、密度計測のため、多チャンネル静電プローブが取り付けられている。また、分光測定を用いて、ターゲット板付近の空間における温度と密度を評価している。モジュール内部への水素ガスや希ガス入射により、密度の増大と電子温度の低下が観測されている。

図4に、通常の実験時と水素ガス、アルゴンガス入

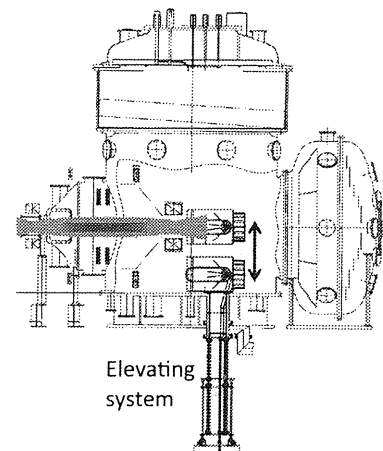


図2 西エンド部真空容器とダイバータ模擬実験モジュール

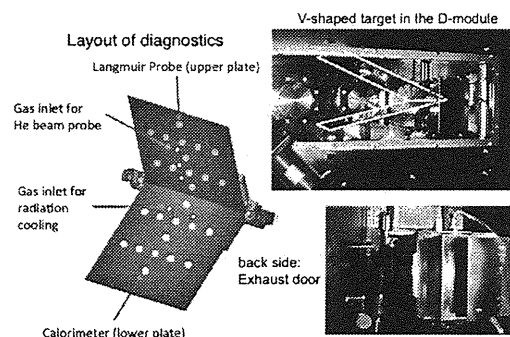


図3 D-モジュールの概略図と写真

射時にターゲット板上で測定された温度と密度の時間変化を示した。また、セントラル部の反磁性量が示されており、現状では、エンド部に入射するガスの影響でセントラル部プラズマの反磁性量が幾分変化することが示されている。今後、ガス入射方法等の最適化を行い、エンド部における入射ガスがセントラル部に影響を及ぼさない方法の確立を目指す予定である。特に、水素ガスとアルゴンガスの同時入射により、著しい電子密度の増大と電子温度の低下が観測されている。最大で 10^{18}m^{-3} 程度の密度のプラズマ生成を観測している。核融合炉の定常化にとって重要である非接触ダイバータ実現に向けての実験を遂行中である。境界プラズマ研究としては、模擬実験モジュールを用いた実験のほかに、カロリメータ/プローブ、回転ターゲットを用いた熱・粒子束計測、高速カメラによるイメージ/分光計測、ICRF や EC 加熱時の径方向熱流束密度分布等の計測を行っている。これまでに報告したように、ECH による高熱流束密度生成実験では、ECH パワー 380 kW 出力で、ITER のダイバータの定常熱負荷の $10 \text{MW}/\text{m}^2$ を超える熱流束密度を達成している。D モジュールの上部には、別の小型のルーファータゲットを設置し、異なる試料へのプラズマ照射により発生する不純物、及び、リサイクルする水素からの 2 次元発光分布の観測を行っている。また、東北大学とのセンター間連携研究の一つとして、プラズマに長時間晒された核融合炉材料の解析も合わせて行っている。さらに、ELM 模擬に向けた、間欠的な熱流束生成実験として、ECH パワーの変調を利用した実験を進めている。1 パルス当たりのエネルギーは小さいが、高サイクル疲労でのタングステン表面の影響等の観測から材料面での貢献も期待できる。平成 25 年度には、24 年度に引き続き、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 3 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、双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」）を双方向型共同研究の成果を報告するプラズマ研究センターシンポジウムと合同で開催した。

(2) エンド部への高粒子束を目指した高密度プラズマ生成

エンド部で観測されるイオン流束は、セントラル部の密度上昇にほぼ比例して大きくなるのがこれまでの実験で確認されている。エンド部への粒子束の増大を目的として、セントラル部の密度上昇を目指した実験に着手した。昨年度までの実験では、東アンカー部への ICRF 直接入射実験において、これまでの 10 倍近い線密度を持つプラズマが生成されることを確認した。アンカー部に設置した ICRF アンテナとセントラル部に設置されているプラズマ生成用のアンテナ間の位相調整を行い、新たに別系統でのガス入射を重畳することによって実現した。アンカー部中心付近のサイクロトロン共鳴周波数を用いるため、セントラル部で生成された低温プラズマがアンカー部へ流れて共鳴層での加熱の結果、アンカー部に捕捉されて密度が上昇す

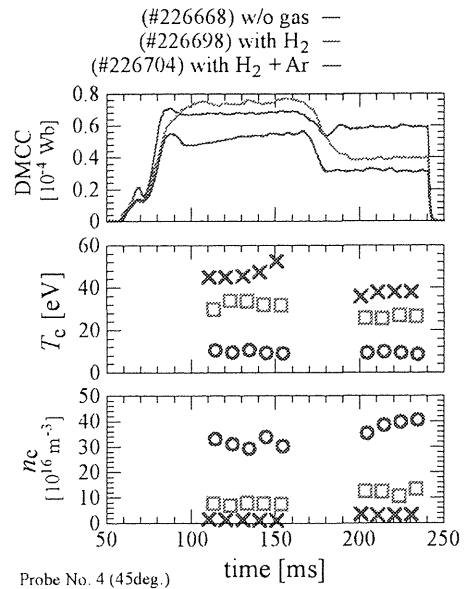


図4 Dモジュール内ターゲット板上の静電プローブによるガス（水素、アルゴン）入射時の電子温度、電子密度の時間変化。(a) セントラル部の反磁性量、(b) 電子温度と(c) 電子密度

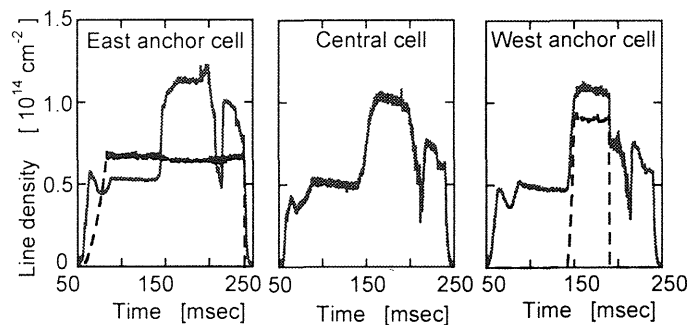


図5 東西アンカー部への ICRF 同時入射時の線密度の時間変化。アンカー部への入射波形が点線で示されている。

ることが考えられる。一方、西側アンカー部においては、昨年度の高周波アンテナ配位においてこのような高密度生成は観測されておらず、アンテナの設置位置にも強く依存することが示唆されている。西アンカー部においても東アンカー部と同様に、アンカー部共鳴層のセントラル側にアンテナを設置して実験を開始した。東西両アンカー部に高密度プラズマが形成されると、セントラル部との間に正の電位差が生じることが予想され、この電位によって閉じ込められることによりセントラル部には、高密度プラズマが形成されることが予想される。図5には、東西両アンカー部に同時に高周波を入射したときの、両アンカー部の密度増大とセントラル部の密度上昇を示している。東西両アンカー部で従来の2倍以上の線密度が観測されている。東西アンカー部に入射された高周波波形は、青い点線で示されており、東側は、放電全体に渡って印加され、西側では、140ms から 190ms まで入射されている。追加のガスが西側アンカー部 ICRF と同じタイミングで入射されている。ガスの入射と西側アンカー部 ICRF 入射とともに東西アンカー部の線密度が上昇し、 10^{14}cm^{-2} を超す線密度が観測されている。また、セントラル部の線密度も 10^{14}cm^{-2} まで上昇することが示されている。図6には、これまでに観測されたセントラル線密度と西側エンド部に設置されているイオン電流検出器信号との相関を示した。セントラル部の密度にほぼ比例して電流値が増大することが示されている。エンド部に流出する粒子束とイオン電流との関係は、別の実験で確認されており、図中実線で示した電流値が粒子束 $10^{23}\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ に相当する。東西両アンカー部への直接 ICRF 入射実験を行い、高密度プラズマを生成することにより、セントラル部の密度が上昇し、エンド部への粒子束が $10^{23}\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ を超えることが初めて観測された。東西アンカー部におけるアンテナの設置位置の相違による波動励起についても解析を進める予定である。

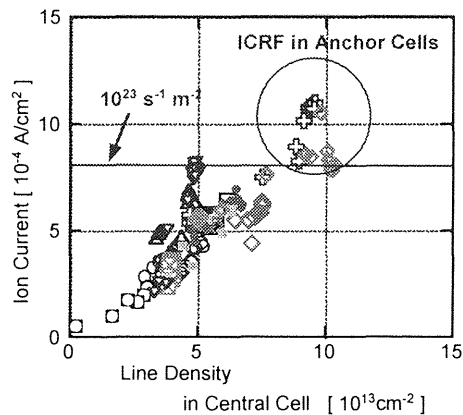


図6 エンド部で観測されるイオン電流のセントラル部線密度依存性。図中、端損失イオン束 $10^{23}\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ に相当するイオン電流が示されている。

(3) マルチパストムソン散乱計測システム

今後のダイバータ模擬や輸送制御の詳細な実験でも、ますます重要となる電子温度や密度分布の正確な評価のために、平成21年度からトムソン散乱計測システムを、NIFS等との共同研究を活用して導入した。特に、境界プラズマ計測で重要な低密度、低温度の電子温度測定を高精度にかつ同時に多点計測可能なシステムの構築を目指し、マルチパスを利用した多チャンネルトムソン散乱計測を、LHD計画共同研究を活用して順調に進展させた。マルチパストムソン散乱計測は、レーザー光がプラズマ中を往復する光学系を組むことで、発生する散乱光を増大させる手法である。従来より、いくつかの方法でマルチパスシステムが考案されているが、同一光路ではなく、各パスの光路が異なるため空間分布計測ができないこと等の弱点があった。本研究では、この問題を克服するため、既存のトムソン散乱計測システムにレンズ、ミラー及び偏光光学素子を追加することで往復のプローブレーザーパスが一致し、安定したマルチパスシステムを実現した。これまでに、3パス以上の繰り返しを可能としている。図7には、Raman散乱実験で確認された6パスまでの多重化信号を示している。1パス時と比較して約3倍の信号強度が得られることを確認した。マルチパス化に加えて、多チャンネルシステムの構築を進めている。

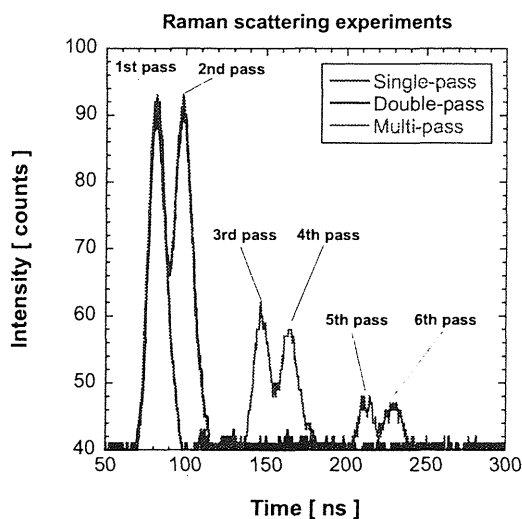


図7 Rayleigh散乱実験で確認されたマルチパス信号。1パス、2パスと6パスの信号が示されている。

(4) 大出力長パルスジャイロトロンの開発

プラズマ加熱や輸送制御の道具であるジャイロトロンに関して、電位/電場生成や電子加熱に加えて、境界プラズマ研究用の高熱流束の制御のための単管 1 MW 以上の ECH ジャイロトロン開発を推進している。これまでに、核融合科学研究所と共同で LHD 用 77GHz ジャイロトロンを開発を平成 18 年度から開始し、世界最高性能となる約 1.8MW-1 秒、1.9 MW-0.1 秒等の出力を達成した。さらにより高密度における加熱を目標とした 154GHz の発振管の開発を行い、1MW での秒レベル発振を確認した。LHD 実験では、77GHz 管を含む 4 本合わせて、4.4MW のパワーをプラズマに入射し、より高密度での高電子温度を達成し、LHD プラズマの高性能化に大きく貢献した。既設の 28GHz ジャイロトロンに関しては、高効率化、2 周波数発振を目的に、改造を行った。大電流領域での発振効率を改善し 1.25MW の出力、設計予想と一致する 35GHz 発振を達成した。さらに、九大 QUEST の EBW/ECCD 実験への 28GHz ジャイロトロン適用を開始した。ECH センター間連携では、九大との電子バーンシュタイン波 (EBW) 加熱に向けた共同実験用にジャイロトロンを調整するとともに、電源の取り合い調整、伝送系、入射系を共同で製作し実験を行い、60kA を超す長時間電流駆動が確認され、これまでの運転領域が大幅に拡大した。将来の京都大学の Heliotron J 用の 35GHz ジャイロトロン開発では、0.8MW の発振を確認した。これらの成果の概要を図 8 に示した。これをさらに発展させるための筑波・九大・京大のセンター間連携用の 28 GHz (0.5MW-CW、1.5-2MW-数秒) かつ 35GHz (1MW-1sec) の 2 周波数発振ジャイロトロン開発を開始した。また、この双方向型共同研究の成果の国際的展開として、プリンストン大学との間でのジャイロトロンを活用した共同研究を推進、平成 24 年度に締結した学術協定を踏まえて、電源等の具体的な検討を開始した。

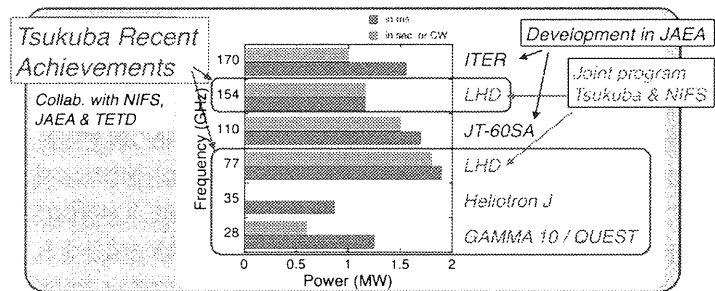


図 8 MW ジャイロトロン開発の現状。筑波大学プラズマ研究センターにおける双方向型共同研究で開発されたものを赤棒で示している。

【4】 GAMMA 10におけるYAG-Thomson散乱計測による電子温度・密度分布計測

タンデムミラーGAMMA10 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 YAG-Thomson 散乱計測システムを導入した。本研究では、これまで空間 3 点、1 時刻の電子温度・密度計測が安定的に可能となるようにシステムを改良し、電子温度、密度の径方向分布計測を 1 プラズマショットで調べることにした。当該年度は、ポリクロメーターの開発と増設、測定オシロスコープの増設、多時刻計測のための電荷デジタル変換装置 (QDC) の構築と信号増強用の 50 チャンネルアンプの設置を行った。さらに、信号強度の倍増をめざし、レーザーをプラズマ中を往復させるマルチパス・システムのプラズマへの適用を行った。

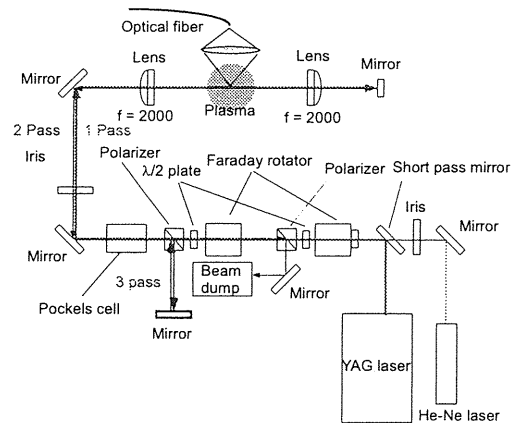


図 1 : マルチパス・システムの概略図

図 1 に GAMMA10 トムソン散乱計測システム概略図を示す。高出力の YAG レーザー (1064 nm, 2 J/pulse) をプラズマに入射し、90° 散乱光を集光ミラー (φ600 mm, R = 1200 mm) で集光し、光ファイババンドル (各チャンネル: input 2 × 7 mm, output φ4.6 mm, NA:0.47) でポリクロメーター (5 チャンネルフィルター付き APD 分光器) まで光を伝送する。これにより、空間 9 点からの散乱光を測定可能となっている。

また、散乱光分光用のポリクロメーターの開発を行い、使用可能なポリクロメーターを合計6台まで増設した。

次に、トムソン散乱信号をレーザー発振周期 100 ms 間隔で測定するため、高速のQDC (CAEN, V792A) のトリガー系を整備してきたが、ポリクロメーターからの出力信号が小さいため、QDCでのカウント数を稼ぐ必要から50チャンネルの高速アンプを導入した。このアンプの全チャンネルの増幅率(約100倍)を確認し、入力信号に対する線形性を確認した。

GAMMA 10 トムソン散乱計測システムに、偏光素子、ファラデーローテーター、1/2波長板を挿入し、レーザー光の偏光を制御し、一度プラズマを通過した後のビームダンプを外し、ビームライン上にレンズ、0度反射ミラーを挿入して像転送光学系を設置することで、偏光と像転送光学系を利用した2パス方式をH23年度に完成させている。この2パス・システムに対して、ポッケルスセル、偏光素子、折り返しミラーを2パス方式に挿入することで、H24年度には3パス以上の繰り返しを可能とするマルチパス・トムソン散乱計測システムを構築し、レーラー散乱計測で6パスまでの散乱信号を確認した。図1にマルチパス・システムの概略図を示す。レーラー散乱実験では、通常のThomson散乱計測で使用するレーザーパワーの約1/1000の強度での実験である。本年度は、光学素子の耐性の確認を行い、Thomson散乱計測で使用するレーザーパワーと同様のレーザーパワーでの実験であるラマン散乱計測を行い、6パスまでの散乱信号を確認した。これを受けて、偏光制御・像転送光学系を用いたマルチパス・システムをプラズマ実験に適用し、4パスまでのThomson散乱信号の取得に成功し、電子温度のマルチパス・システムによる測定(28 ± 2 eV)に世界で初めて成功した。今後、3パス以降の信号強度を増大させるための光学システムの調整を進め、5パス以上の散乱信号の取得を目指す。

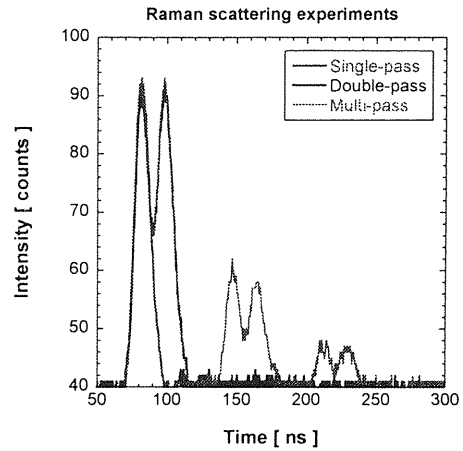


図2：ラマン散乱信号

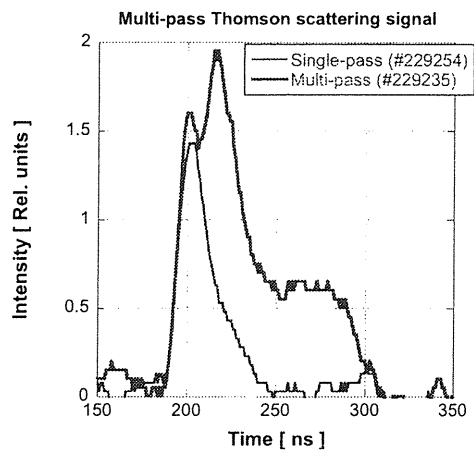


図3 マルチパス・トムソン散乱信号

【5】 エンド・ダイバータ部イメージング干渉計の開発

GAMMA 10/PDX では、西エンド部にダイバータ模擬実験装置を設置し、端損失粒子を利用して境界プラズマやダイバータプラズマ、プラズマの壁相互作用などの新たな研究を行っている。ダイバータ模擬実験装置では計測装置の高性能化が求められており、今回構築するダイバータ部イメージング干渉計では位相イメージング法を用いた2次元分布計測が可能であり、ダイバータプラズマの物理機構の解明が期待される。本研究ではプラズマ密度の2次元計測を行うことを目的とし、ダイバータプラズマ計測のための2次元マイクロ波干渉計の開発を行うこととした。

GAMMA 10/PDX のプラズマ密度は $n_e \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度であり、プラズマ密度計測は70 GHz マイクロ

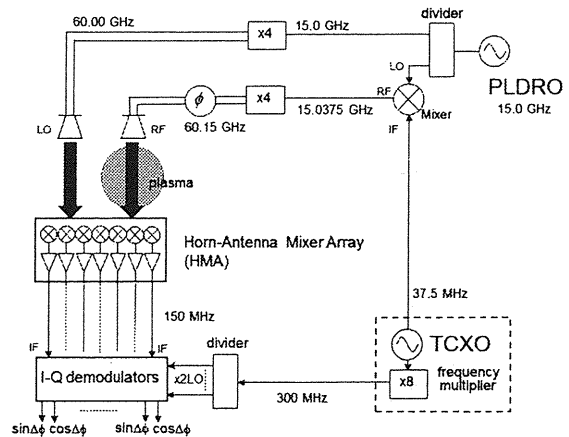


図1:周波数通倍型70 GHz マイクロ波干渉計

波干渉計を使用している。これまでは、70 GHz、500 mW の IMPATT 発振器を使用したマイクロ波干渉計を用いていたが、IMPATT 発振器が手に入らなくなっており、また構成費用を抑えるためにも、周波数通倍型の干渉計を新たに構築した。また、イメージング検出器として、核融合科学研究所で開発されたホーンアンテナミキサアレイ (HMA) を使用することとした。そこで、今回は 60 GHz の周波数通倍型マイクロ波干渉計を構築した。図 1 に構築した周波数通倍型 60 GHz マイクロ波干渉計を示す。本システムでは、周波数安定性に優れた Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator (PLDRO) 15.0GHz、Temperature-Compensated Crystal Oscillator (TCXO) 37.5/300 MHz をそれぞれミリ波源、IF 信号源とするヘテロダイン型干渉計である。15.0 GHz 帯の信号は、増幅後に伝送された後、アクティブな通倍器で 60.0 GHz 帯のプロープ信号となる。これを HMA で参照波とともに受信し、7 チャンネルの位相検出回路で位相検波する。GAMMA 10 でこれまで使用してきた位相検波回路は、1 チャンネル当たり $20 \times 10 \times 3$ cm であるところ、今回使用した位相検出回路は、 $7.5 \times 7.5 \times 1.5$ cm と非常に薄くコンパクトになっている。本イメージング干渉計は、HMA の真空容器内での使用が可能であるかの確認を行い、真空容器内でも十分動作することが確認された。しかし、アルミ筐体で作成されており、電子部品がむき出しとなっているため、GAMMA 10/PDX 真空容器内での使用は、カバーの作成、放出ガスの確認を行ってから使用となる。今後、ダイバータ模擬部へのシステムの取り付けのための確認を進めることとする。

【6】衝突・輻射モデル計算コードの開発及び GAMMA10 不純物スペクトルの解析

GAMMA10 では、不純物として鉄や炭素、酸素が計測されている。高温・高密度プラズマにおいては、不純物放射によるエネルギー損失が大きくなる。従って、エネルギー閉じ込め改善の物理の解明のためには、プラズマ中の不純物の挙動を調べることは非常に重要である。本研究では、炭素不純物に着目し、炭素イオンの衝突・輻射モデル計算コードを作成し、その計算結果と紫外・可視分光測定システムによって観測された炭素のスペクトルを用いて、GAMMA10 プラズマにおける炭素イオンの分布、及びエネルギー損失を調べた。

分光測定結果として得られる放射輝度とプラズマパラメータの関係を調べるには、適切な分光モデルを適用する必要がある。核融合プラズマの分光モデルとして広く用いられている衝突・輻射モデルは、各準位に関する励起、電離、再結合等様々な素過程を考慮したモデルで、レート方程式を解くことにより原子・イオンの占有密度が決定される。すべての励起状態に対して準定常状態を仮定すると、レート方程式は以下のよう書き下すことができる。

$$n_z(p) = R_{z-1}(p)n_e n_{z-1}(0) + R_z(p)n_e n_z(0) + R_{z-1}(p)n_e n_{z+1}(0) \quad (1)$$

$R_{z-1}(p)$: 内殻からの電離による効果の係数

$R_z(p)$: 電離、電子衝突 (脱) 励起、放射遷移の効果の係数

$R_{z-1}(p)$: 再結合の効果の係数

内殻からの電離による効果は、十分小さいので、ほとんどの場合無視される。また、電子温度が数 eV 以上の場合、再結合の効果は電離、電子衝突 (脱) 励起、放射遷移の効果に対して十分小さくなる。よって式(1)は以下ようになる。

$$n_z(p) = R_z(p)n_e n_z(0) \quad (2)$$

放射遷移確率が十分小さいような状態 (準安定状態) では、ポピュレーションの緩和時間が非常に長くなっている可能性があり、準定常状態が仮定できないことがある。CIII の状態 $1s2 \ 2s1 \ 2p1 \ (3P_0)$ は準安定状態であり、また CII の二電子励起状態のポピュレーション密度が高く、内殻からの電離が無視できないほど大きい。そこで、準安定状態のレート方程式を変更して計算した。これまでは、この計算コードは、C 言語で作成されていたが、本年度は今後の改良の利便性を考慮して Matlab での構築を行った。

GAMMA 10 の紫外・可視分光測定システムは、200~670 nm の波長領域の発光を測定できる。プラズマから放射された光は、2 枚の集光レンズによって 40 本の光ファイバーへ集光され、光ファイバーを通して分光器に送られ分光される。40 本の光ファイバーを使用することで、プラズマの上下方向 (X 方向) $-20 \sim +20$ cm を空間分解能約 1 cm で計測することができる。GAMMA10 の条件固定プラズマショットについて分光計測を行った。この実験では 150ms-165ms の間にセントラル部の電子を加熱する電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) が入射されている。ECRH 印加の影響が出る時間帯 (140-160ms) と、それ以外の時間帯 (100-120ms) における分光計測結果について解析を行った。実験から得られた CII、CIII の分光計測結果と、CR モデルの計算結果、

イオン閉じ込め時間を用いて GAMMA10 セントラル部の炭素イオンの径方向密度分布を求めた (図 1)。ECRH 印加前 (図 1 (a)) に比べ、ECRH 印加時 (図 1 (b)) は低価数のイオン密度 (CIII, CIV) が減少し、多価イオン (主に CVI) が増加するように分布が変化していることが分かった。また、その径方向密度分布と CR モデルの計算結果を用いることで、炭素イオンからの放射損失を定量的に初めて算出した。計算結果によると炭素イオンによる放射損失は ECRH 印加前で 18W、ECRH 印加中で 15W になり、GAMMA10 セントラル部における炭素イオンの放射損失量は現状では十分に小さいことが分かった。今後、プラズマ密度が増加した場合、放射損失もそれに伴い増加するので引き続き計測を続ける必要がある。

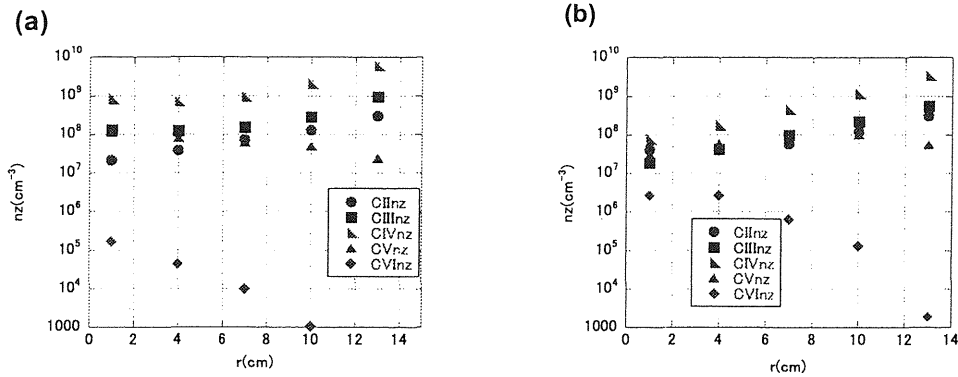


図 1 : CR モデル計算と炭素イオン放射スペクトルから求めた炭素イオン密度の空間分布。
(a) は ECRH 印加前、(b) は ECRH 印加中を示す。

【7】ガンマ10におけるジャイロトロン開発研究と ECRH システム高性能化

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共鳴加熱 (ECRH) 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、ECRH システムの大電力化、長パルス化を進めている。ECRH 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、共同研究として行っている核融合科学研究所 (NIFS) の LHD 用や九州大学の QUEST 用ジャイロトロン等の開発も含め、筑波大学プラズマ研究センターにおける研究開発の大きな柱の一つと成っている。

2013 年度においては、九州大学 QUEST 装置において、GAMMA10/PDX 用 28GHz-1MW ジャイロトロンの据付と立上げ、プラズマ実験への適用を行い、これまでにない 60kA のプラズマ電流を得る等の非常に良い結果が得られた。さらに、GAMMA10/PDX のみならず、QUEST、プリンストン大学の NSTX-U、京都大学の Heliotron J における ECRH 用として 28GHz/35GHz の 2 周波数で動作可能なジャイロトロンの設計を進めた。また、GAMMA10 や QUEST での使用を見込んだ 14GHz ジャイロトロンの設計を開始した。一方、NIFS との共同研究として LHD 用 77GHz ジャイロトロンの改造、154GHz ジャイロトロン製作等も進め LHD 実験に貢献した。

(1) ガンマ10用 28GHz-1MW ジャイロトロンの九州大学 QUEST 装置への適用

九州大学の QUEST 装置では、28GHz 第二高調波共鳴がプラズマ内側に存在し、28GHz ジャイロトロンを用い 8.2GHz のカットオフ密度以上の高密度プラズマ ($>1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$) を生成・維持し、8.2GHz 電子バーンシュタイン波 (EBW) 加熱/電流駆動の実証をおこない、QUEST プラズマの高性能化と定常化を目指す研究が計画されている。本研究を効率良く、早急に進めるため、センター間連携研究として筑波大学の 28GHz-1MW ジャイロトロンを九州大学の QUEST 装置に適用することとし、2012 年度末にジャイロトロンとその関連装置を九州大学に搬入した。2013 年度初頭より、超電導電磁石 (SCM) をオイルタンクに設置し冷却を行い、専用磁場測定治具を用い SCM とジャイロ

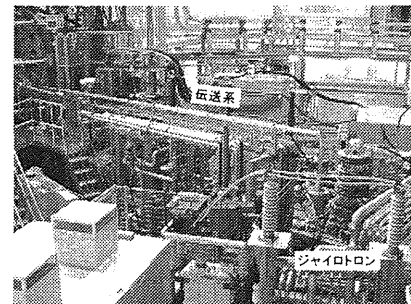


図 1 28GHz-1MW ジャイロトロンの QUEST 実験への適用

トロン取付け架台との傾き・位置調整を行った。次にジャイロトロンと整合器(MOU)を取付け、配線・配管作業を進め、ジャイロトロン用に新規改造された電源システムとジャイロトロンの組合せ動作に伴う不具合への対処等を行いつつ高圧印加試験を実施した。ダミーロードにより MOU 出口出力と MOU 出口に取り付けた結合用導波管出口での出力測定を行い、370kW のジャイロトロン出力まで確認した。QUEST 本体まで伝送系を敷設して、導波管内は真空排気を行った。ジャイロトロン、伝送導波管、QUEST の全景写真を図 1 に示す。QUEST プラズマへの入射を行いつつ、ジャイロトロン運転パラメータの調整とパルス幅伸長が行われた結果、プラズマ実験において、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 $1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ を超えるオーバードেনシブプラズマの生成に成功した。電子温度は 80eV 程度が得られた。

(2) 28GHz/35GHz 2 周波数、14GHz ジャイロトロンの開発研究

プラズマ研究センターでは、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-数秒のジャイロトロンの開発を進める予定である。また、GAMMA10 用 28GHz-1MW ジャイロトロンを用いた QUEST 装置での加熱予備実験で良好な結果が得られ、QUEST 用 28GHz-400kW-CW (連続動作) ジャイロトロンの開発を進める予定である。更にプリンストン大学の NSTX-U では 28 GHz-1.5~2 MW-数秒のジャイロトロンが求められている。一方、京都大学の Heliotron J では 35 GHz-1 MW-0.5 秒のジャイロトロンが求められている。これらの条件を 1 つのジャイロトロンで満たせれば共同研究において非常に有用であるため、28 GHz/35 GHz の 2 周波数動作が可能なジャイロトロンの開発を進めている。2012 年度においては、空洞発振モードを、モード変換器内反射角の違いの小さい (0.13°)、28 GHz- $TE_{8,5}$ と 34.78 GHz- $TE_{10,6}$ に決定し設計を開始した。電子銃の設計においては、既設 28GHz-1MW ジャイロトロンと同一設計の電子銃が使用可能であることを確認した。放射器の設計においては、第 1 ミラーまでの伝送効率が、28GHz が 97.8%(内ガウシアン成分 99.5%)、34.8GHz が 95%(同 98%) まで最適化を行った。

2013 年度には、空洞共振器の最適化設計を進めた。図 2 に 28GHz 発振のビーム電流依存性を、図 3 に 35GHz 発振のビーム電流依存性を示す。28GHz 発振で 2MW 以上の出力が得られる設計と成っている。35GHz 発振においても 1MW 以上の出力が可能である。

また、2013 年度においては、GAMMA 10 センtral 部ミッドプレーンにおける基本波共鳴加熱、QUEST における中心加熱のため、14GHz ジャイロトロンの設計を開始した。空洞発振モードは、28GHz との 2 周波数発振も検討したがモード変換器設計可能な良い発振モードの組合せが無い、14GHz 単独モード発振として、 $TE_{4,2}$ モードと $TE_{3,2}$ モードの設計性能比較を行い決定することとした。空洞共振器の概略設計では、両モードとも同様の発振効率で 1MW 以上の発振が可能であることが分かった。モード変換器設計においても、両モードとも、第 1 ミラーまで 98.8% の伝送効率でガウスビーム伝送が可能なが分かった。電子銃の設計では、 $TE_{3,2}$ モードは、既設 28GHz-1MW ジャイロトロンと同一の電子銃が使用可能であることが確認された。しかし、 $TE_{4,2}$ モードでは、電子銃部の磁場強度が弱くなりすぎるため、電子銃のカソード径 $\phi 95\text{mm}$ から $\phi 75\text{mm}$ に小さくすることで電子銃部の磁場強度を大きくし、電子銃の設計を行った。 $TE_{4,2}$ モード用電子銃においても、 $TE_{3,2}$ モード用電子銃と同様の電子ビームパラメータが得られた。 $TE_{3,2}$ モードでは、 $TE_{4,2}$ モードに比べ、空洞共振器径が大きくなるうえ、電子ビーム軌道が外側となるため、モード変換器/ミラー系とのクリアランスやコレクタ設計において難しい部分がある。以上を総合して、同じ電子ビーム電流を得るためのカソードの電子電流密度は 1.28 倍となるが、発振モードは $TE_{4,2}$ モードに決定して、今後詳細設計を進めることとした。

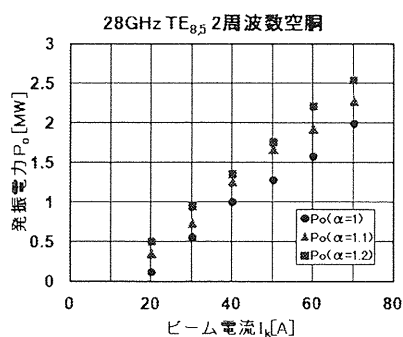


図2 28GHz 発振電力のビーム電流依存性

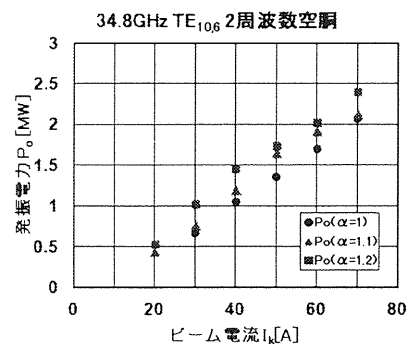


図3 34.8GHz 発振電力のビーム電流特性

(3) NIFS-LHD 用ジャイロトロンの開発研究

NIFS とのジャイロトロン共同研究において、2012 年度までに、77GHz ジャイロトロン 3 本と 154GHz ジャイロトロン 1 本を開発してきた。開発したジャイロトロンは、LHD 実験に適用され $\sim 0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の低密度では 20keV、 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の電子密度では 8.6keV の中心電子温度を達成、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) での 40kA 以上のプラズマ電流の駆動の実現、電子バーンシュタイン波 (EBW) での $14.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の遮断密度以上の高密度プラズマ加熱の確認等の成果を上げてきた。しかし、ダミーロード負荷での準定常運転において 220kW-75 分や 300kW-40 分動作可能でも、LHD へのマイクロ波電力入射のための伝送導波管を接続すると反射波の影響で、ジャイロトロン内のアウトガスが増加し、動作可能なパルス幅が短く成る問題が生じていた。そこで、2013 年度においては、77GHz ジャイロトロン 3 号管に対し、導波管からの反射波やジャイロトロン管内の伝送ロスによる不要 RF をジャイロトロン管外に排出するための副窓を設ける改造を行った。一方、154GHz ジャイロトロン 1 号管においては、出力増加に伴う電界強度/発熱の増大によると考えられる原因により、副窓が濡れ、真空リークに至るトラブルが生じたため、冷却を強化したサファイア製ダブルディスク構造の副窓に交換する修理を早急に実施した。改造、修理とも 2013 年度 LHD 実験スケジュールに支障を与える事無く実施し、 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ プラズマの長時間維持達成等に大きく貢献した。更に、154GHz ジャイロトロン 2 号管の製作を行った。2 号管は超電導電磁石 (SCM) 等の運転に必要な装置がそろい次第、試験を開始し 2014 年度の LHD 実験に使用される予定である。

【8】ガンマ 10 セントラル部における 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、イオン温度に比べて電子温度が低く、イオン・サイクロトロン加熱 (ICH) により生成されたイオン温度が数 keV の高温イオンが、電子との衝突により、エネルギーを損失する事が問題となっている。従って、セントラル部の電子温度を上げて、高温イオンの電子ドラッグによるエネルギー損失を抑制することは重要な研究課題である。また、ECH により電子加熱が生じているにもかかわらず、プラズマ全体のエネルギーの指標となる反磁性能が減少する場合があります。セントラル部 ECH 時の物理を解明する上でも X 線計測は極めて重要である。

アンテナ開発については、平成 25 年度は主に、伝送効率の観点から、以前の 2 枚ミラー型のアンテナ系をさらに改良して、伝送効率が 70%程度から 95%程度にまで改善した新 2 枚ミラー型のアンテナ系を導入した (図 1, 図 2)。このアンテナ系は、マイターバンド型偏波器による入射偏波制御が可能である。また 1 枚目のミラー M1 を上下方向に $d = \pm 12 \text{ mm}$ 可動させることにより、1 T 共鳴層での入射ビーム上下位置を $\pm 7 \text{ mm}$ 程度変化させることが可能である。

この新 2 枚ミラー型アンテナ系をガンマ 10 セントラル部 ECH システムに導入し、吸収位置依存性を調べる ECH 入射実験を行った。その結果、M1 を下に動かす程 ($d < 0$ の方向)、加熱効果が大きく見られ、最下点 ($d = -12 \text{ mm}$) で偏波に依らず最大となった。また、軟 X 線強度分布を調べると、M1 を上に動かす程 ($d > 0$ の方向)、X 線強度に見られる振動が大きくなった。特に大きな分布の振動が見られた $d = 12 \text{ mm}$ のショットについてトモグラフィー解析を行い、二次元輻射分布を算出した結果、ECH 印加中に軟 X 線

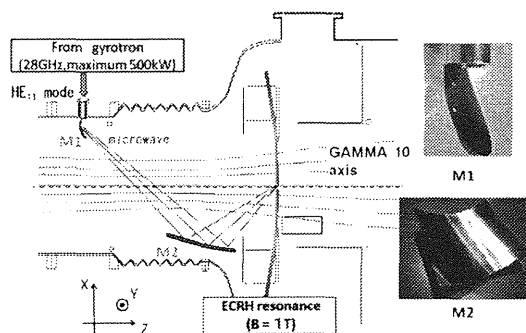


図 1 セントラル部 ECH アンテナ概略図

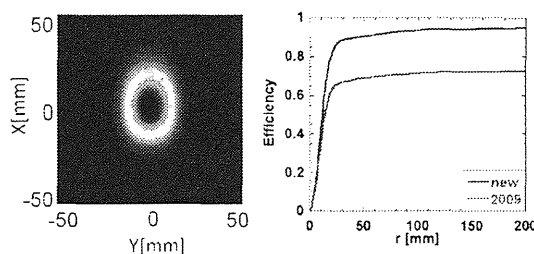


図 2 共鳴層位置での電力放射分布と共鳴層中心から半径 r での電力伝送効率

のピーク位置は真空容器中心位置から離れ、0.7 ms程度の時間でExBの方向へと回転していることが分かった(図3)。レイ・トレーシング計算の結果、入射マイクロ波は、プラズマ中の屈折により軌道計算による吸収位置は共鳴層位置でX方向(上下方向)に20 mm程度シフトすることが分かった。また、アンテナ位置dが大きいたときにプラズマ端部を加熱している計算結果が得られた。実験では、軟X線強度径方向分布のピーク位置は、ECH印加中にdの増加とともに真空容器上側に移動し、計算とコンシステントな実験結果が得られた。ミラー閉じ込めプラズマでは、非軸対称な加熱により非軸対称な電位分布が形成されるため、軟X線分布の振動や閉じ込め性能の劣化の要因となっている可能性がある。

今後は、上記の結果をふまえ、電力密度が広い分布をもつ、ブロードなビーム入射が可能なアンテナ系を導入し、全体的な加熱により、プラズマ位置と吸収位置のずれを緩和し、局所加熱、非軸対称加熱の抑制を進める計画で、電力密度の半値幅が5倍程度あるブロード・アンテナを設計製作し、据え付けた。

【9】 GAMMA 10 セントラル部におけるイオンエネルギーバランスの解析

タンデムミラー型プラズマ閉じ込め実験装置GAMMA 10のセントラル部では、荷電交換中性粒子分析器(Charge Exchange Neutral Particle Analyzer : CX-NPA)を用いて、プラズマの状態を記述する基本的パラメータであるイオン温度の径方向分布を求め、同時にイオンの加熱機構と損失機構について解析を行っている。その目的は、高エネルギー粒子の閉じ込めやエネルギー損失が古典的であるかということを確認し、これらが既知の理論から予測される結果と異なる場合は、その振る舞いを探ることにある。本研究の目的は、RFによる加熱をベースとしたプラズマに対し、セントラル部電子サイクロトロン共鳴加熱(C-ECRH)によりエレクトロンドラッグが抑制され、イオン温度が上昇するというメカニズムを、CX-NPAを用いて検証することである。また、数値計算コードを用いたイオンのエネルギーバランスの時間発展解析を行い、プラズマ性能の向上に役立てることである。

(1) セントラル部 ECRH 入射実験

電子温度がイオンエネルギーバランスに及ぼす影響を調べるために、セントラル部の電子加熱を目的とした、同部に設置されたECRH入射実験を行なった。実験シーケンスならびに、反磁性量と電子線密度の時間変化を図1に示す。図から判るように、C-ECRHの印加によって、反磁性量が2倍程度増加しセントラル線密度が25%程度減少していることが判る。イオン温度の解析は、反磁性量が定常となったRF時間帯とRF + C-ECRH時間帯で行った。

CX-NPAによる計測結果から、イオン温度は中心で1.4 keVから5.2 keVまで上昇し、トムソン散乱計測の結果から、電子温度はプラズマ中心で、20 eVから90 eVまで上昇していたことがわかった。

イオンのエネルギーバランスの解析では、イオンへ注入されたRFパワーの損失過程は、電子とのクーロン衝突による損失(Qie)、中性水素原子・分子との荷電交換による損

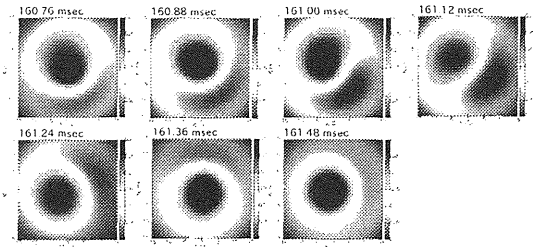


図3 トモグラフィ解析により算出したECH印加時のX線二次元輻射分布の時間発展

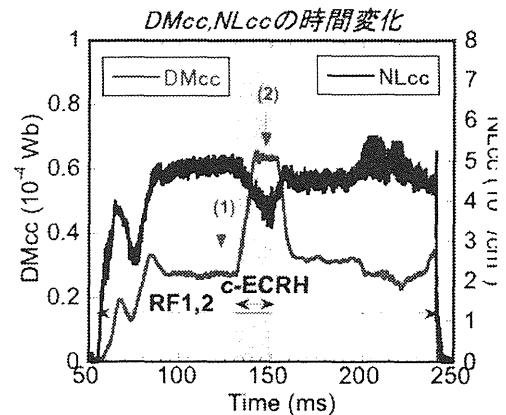


図1 C-ECRH 実験での電子線密度NLcc、及び反磁性量DMcc

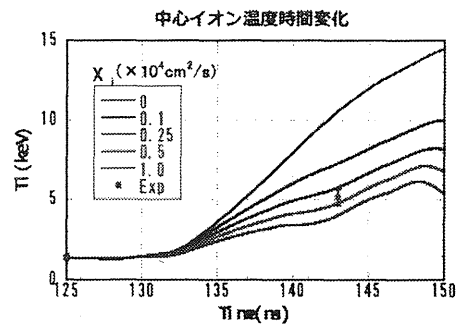


図2 イオン温度の時間発展シミュレーションの解析結果

失(Q_{cxH} , Q_{cxH_2})の3つが主要なものと考えて、エネルギーバランスの観点から反磁性量およびイオン温度の時間発展を調べた。

図2には、C-ECRH印加中の中心イオン温度の時間発展シミュレーション解析結果を示す。図から判るように、上記損失過程に加えてイオンの径方向輸送を考慮 ($\chi_i = 5 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$) することにより、中心イオン温度の上昇が、実験値と良く一致することが判った。

一方、図3に示すようにイオンの内部エネルギーに相当する反磁性量の時間発展では、電子加熱の後半において、シミュレーション結果が、実測値を上回って上昇する傾向が認められた。この反磁性量が飽和する時間帯では、いくら径方向輸送の割合を増加させても、現段階では実験結果を再現するに至っていない。

(2) まとめと今後の課題

GAMMA10 セントラル部において、セントラル部 ECRH 時のイオンエネルギーバランスを解析した。その結果、イオン損失は Q_{ie} が支配的であり、セントラル部における電子加熱がイオン加熱に貢献することが分かった。また、径方向エネルギー輸送も中心のイオン温度や径方向分布に重要な影響を及ぼしていることも判明した。今後、反磁性量が飽和する時間帯では、更なる損失メカニズムが存在する可能性のあることが示唆され、今後詳細な実験結果をベースに解析を進める必要がある。

【10】 GAMMA 10 SMBI における粒子供給の最適化

適切な粒子補給はプラズマの高性能化にとって非常に重要な問題である。粒子補給における課題としては、高温・高密度プラズマに対して中心部まで粒子を補給すること、周辺部への余分なガスを出来るだけ少なくすることが挙げられる。この課題を解決する手法の一つである超音速分子ビーム入射法 (SMBI) が GAMMA 10 に導入された。より収束性の高い粒子供給のために、昨年度よりラバールノズルを導入した。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。

(1) 二分岐ファイバーを用いた2点同時計測システムとストレートノズルを用いた超音速分子ビーム入射実験

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た。

今回新たに設置したラバールノズルを用いた実験を行った結果を図3に青色の◆で示す。ラバールノズル

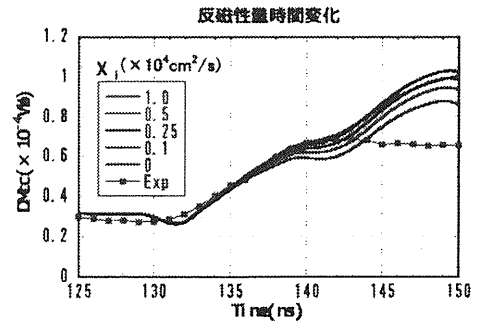


図3 反磁性量の時間発展のシミュレーション解析結果

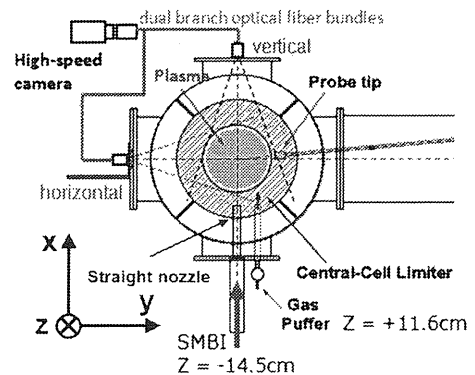


図1 ストレートノズル付き SMBI と高速カメラの設置位置の模式図

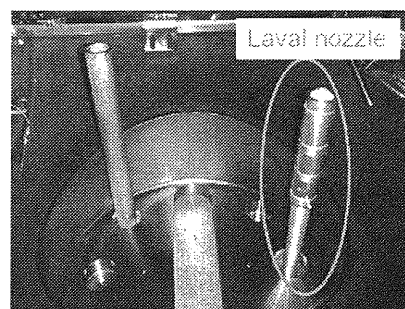


図2 セントラル部下部の真空容器内画像

の結果は1点しかないが、他の2つの実験条件に比べて、より高い指向性を示した。今後はラバールノズルを用いた実験においてもプレナム圧に対する依存性など詳細な特性を調べていく予定である。

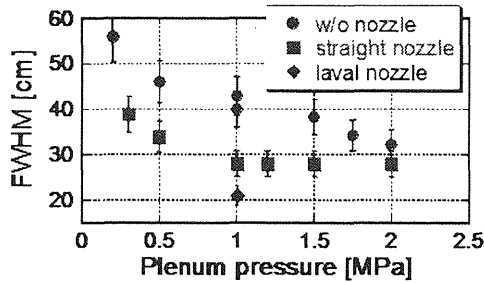


図3 各プレナム圧に対する発光強度の半値幅

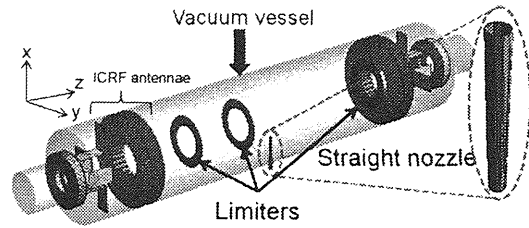


図4 DEGASにおける3次元メッシュモデル

(2) 中性粒子輸送シミュレーション解析

中性粒子輸送シミュレーションコード (DEGAS) を用いて SMBI における中性粒子挙動の解析を行った。図4に DEGAS に導入した3次元メッシュモデルを示す。以前の研究において、ガスパフと SMBI の中性粒子の挙動の違いの一つに供給ガスの発散角があることが確認されている。実験で行われているプレナム圧の範囲では、その発散角は従来のガスパフを再現するコサイン分布の半分程度だということがわかっている。本研究で用いた DEGAS コードは、完全3次元のシミュレーションが可能なコードである。その利点を生かして、プラズマ内部における中性粒子の挙動の解析を行うことにより、中性粒子の侵入長の評価を行った。

本研究において、シミュレーションにより算出された $H\alpha$ 線放射輝度の径方向分布のピーク位置を侵入長の指標とした。図5に本研究における侵入長の評価法を示した。シミュレーションにおける実験条件は、1つはシルブのみ (Case 1)、2つ目はストレートノズル (Case 2)、3つ目はラバールノズル (Case 3) と、3つの異なる実験条件において行われた。図6に各実験条件における発散角とメッシュモデルについてまとめた概略図を示す。ラバールノズルについては、内部構造が複雑なため、ノズル上部に他のものより指向性の高い粒子源を設定することでシミュレーションを行った。

図7に算出された SMBI 近傍の $H\alpha$ 線放射輝度の断面図を示す。図7からより指向性の度合いやプラズマまでの距離により、プラズマ断面における中性粒子の分布に大きな差が生じることが明らかになった。指向性の低い粒子供給 (case 1) では周辺部に広がり、プラズマの上部の方まで中性粒子が回り込んでいることがわかる。指向性の高い粒子供給 (case 3) においては、プラズマ下部に放射輝度の高い場所が集まっており、局所的な粒子供給が可能となっていることがわかる。

さらに、各実験における侵入長の評価を行った結果を図8に示す。各粒子入射条件における侵入方向に沿った

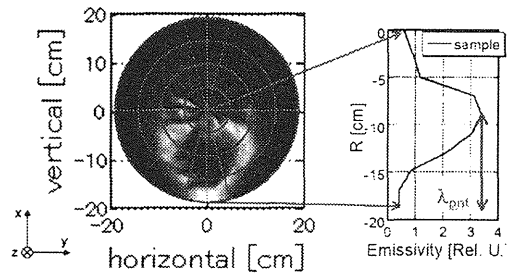


図5 侵入長の評価方法について

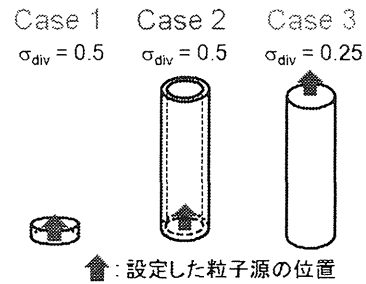


図6 シミュレーション条件概略図

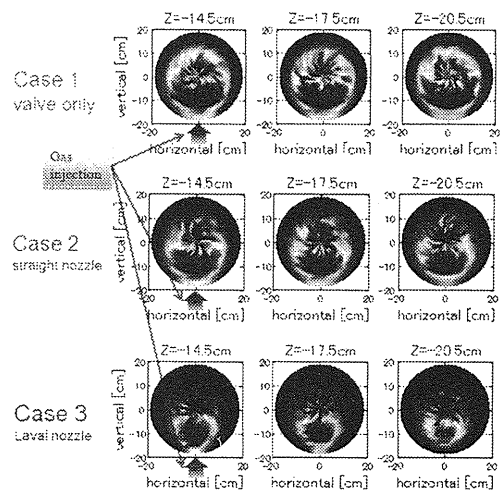


図7 各シミュレーション条件における SMBI 近傍の $H\alpha$ 線放射輝度分布

H α 放射輝度のシミュレーション結果である。図から、今回の実験条件を用いたシミュレーションでは、侵入長に対して差がないことがわかった。一方、別の研究において、SMBIには周辺部のプラズマを冷却する効果があることが報告されている。周辺部の電子温度分布は中性粒子の平均自由行程に影響を与え、その結果として侵入長に対しても影響があると考えられる。また、SMBIの周辺部プラズマ冷却は、より指向性の高い粒子供給により、中性粒子密度が局所的に高まることによって生じると考えられる。今後は、SMBIにおける中性粒子の発散角、局所的な粒子供給による効果とプラズマ冷却との関連性を踏まえた上で、SMBIによる中性粒子挙動のより詳細な解析を行う予定である。

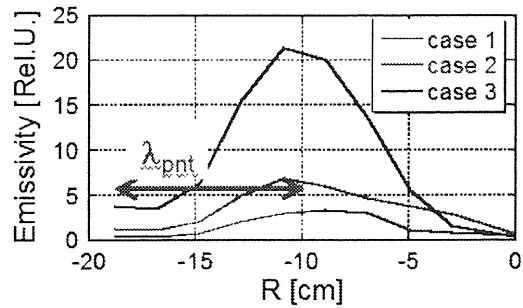


図8 各シミュレーション条件における侵入長

(3) まとめ

ラバールノズルを用いた実験を GAMMA10 において初めて行った。ラバールノズルを用いることにより、中性粒子の指向性の向上が確認された。今後は、ラバールノズルを用いた実験におけるプレナム圧依存性を調べていく予定である。また、完全3次元のシミュレーションの利点を活かし、プラズマ内部における中性粒子挙動の調査と中性粒子の侵入長の評価を行った。指向性の高い粒子供給における局所的な中性粒子分布が確認された。この局所的な中性粒子密度分布が周辺部のプラズマ冷却とどのような関連性を持っているのかを今後検討する予定である。さらに異なる電子温度分布におけるシミュレーションを行うことで、電子温度分布に対する侵入長の依存性も調べる。

【11】高速カメラと複合プローブを用いたセントラル部プラズマの揺動計測

昨年度から計画している静電プローブと磁気プローブを持つ複合プローブと高速カメラの同時計測を GAMMA 10 プラズマで行った。高速カメラは、セントラル部の水平方向と垂直方向からの二方向計測可能なファイバーを用いている。プローブヘッドは、上記二つの画像の視野に入る位置まで稼働できる。今回は、複合プローブを用いた最初の測定結果について述べ、初期データと今後の展望を報告する。

(1) 実験装置

本研究で用いた高速カメラは、MEMRECAM GX-1 Plus (NAC 製) であり、実質的な最高速は、8x64 画素で 200,000 コマ毎秒(FPS) である。撮影視野やプラズマの発光強度などの実験条件を考慮し、GAMMA 10 においては 10,000 fps (320 pixel×240pixel) ~40,000 fps (256 pixel×96 pixel) で撮影を行っている。今回の実験では、20,000 fps で撮影を行った。図1に、高速カメラと SMBI、GP#7 の設置位置であるセントラル部の断面図を示す。SMBI は Z=-14.5 cm、ガスパフは Z=+11.6 cm に設置してあり、高速カメラを用いてガス供給実験を観測した。カメラは、2分岐イメージファイバーを用いて、プラズマを水平方向と垂直方向から観測している。

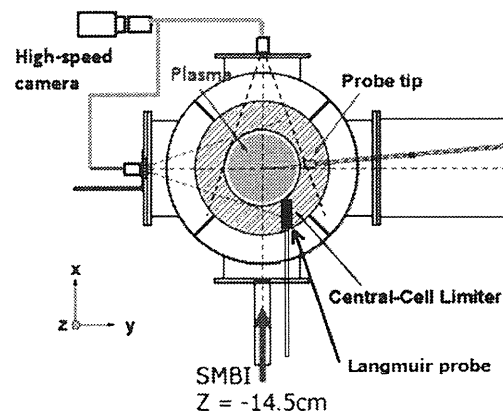


図1 GAMMA 10 セントラル部におけるガスパフ、SMBI と高速カメラの配置

(2) 実験結果

実験結果の一例として、図2(左)に反磁性量 DM_{cc} 、図2(右)に線積分密度 N_{Lcc} の時間変化を示す。160-190msec の間 C-ECRH 加熱(150kW)を行っており、160ms で一旦反磁性量と電子密度が下がるが、180ms

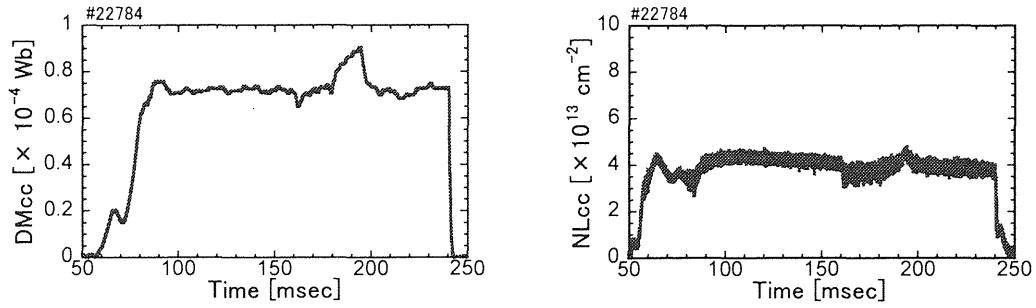


図2 測定で用いた典型的な反磁性量とプラズマ線密度の時間変化

付近では回復している。180-195ms に P-ECRH(150kW)、180-210ms に B-ECRH(100kW) を行い、180-195ms の間、反磁性量、電子密度ともに増大している事が分かる。時間的にみると P-ECRH が最も効果が大きいことが予想される。この反磁性量、電子密度の増大時期での高速カメラでの画像と静電プローブのイオン飽和電流の比較を行った。カメラ画像中のプローブの位置の画素データを図3に示す。今回、イオン飽和電流とプローブ位置での光量のデータとの相関図を作成し、スパイク状の信号とそれ以外との比較を行った。図4に結果を示す。図からは、丸で囲んだスパイク状の信号はカメラ画像とイオン飽和電流の相関が強く、電子温度・密度の高い領域がプラズマから出てきている状態であると考えられる(相関係数0.9以上)。一方、スパイク状以外のイオン飽和電流部分とカメラ画像の相関は低い事(相関係数 $\sim 0.3\sim 0.4$)がわかった。160-190ms の時間帯では、カメラで捕らえられた輻射光量は、電子密度と共に増大しているため、図3の下図に示すように、単純に線形近似部分を除いて、プローブ信号と比較した。また、プローブ信号とカメラのサンプリング時間を合わせるために、プローブ信号は、適宜、単純移動平均をかけてスムージングしている。そのため、最適なオフセットではない比較であるが、図4に示すように、相関関係ははっきりと確認できた。一方、磁気プローブ信号については、ノイズ対策を進めることによって、信号の信頼性を高めて行く必要がある。

(3) 結論

今回、静電プローブ、磁気プローブの複合ヘッドを初めてガンマ 10 セントラル部のプラズマ周辺部に導入し、同時計測を始めた。磁気プローブ信号の解析はまだできていないが、従来のスパイク状信号とカメラ画像の同期が確認された。また、スパイク状以外での信号間には相関があまりないが、この相違が物理機構であるかどうかは慎重に吟味する必要がある、今後の課題である。

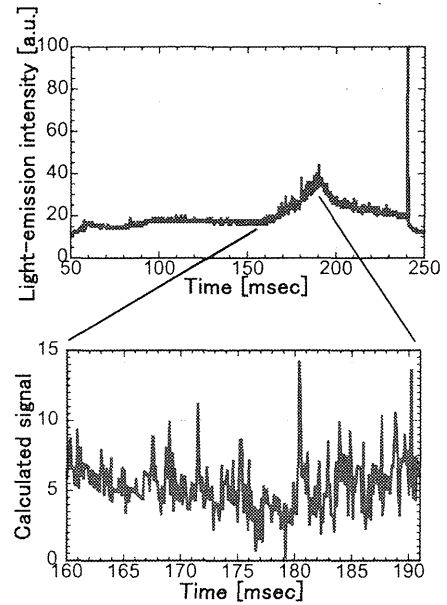


図3 プローブ位置のピクセルの輝度の時間変化

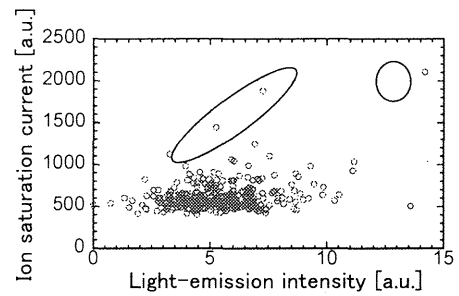


図4 イオン飽和電流と高速カメラ画像によるプローブ位置での発光強度との相関

【12】 タンデムミラー端部を用いたダイバータ模擬研究

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。これによって、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。

(1) 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 ($Z_{EXIT} = 30$) 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、 $Z_{EXIT} = 70$ 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) などがある。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、新たに本格的なダイバータ模擬実験を遂行するために大型の模擬実験モジュールが稼働を開始した。図 2 に Dモジュールの概略図と写真を示す。本モジュールは、SUS 製の断面 50×48 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 枚のタング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。また、後部排出口が設置され、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。

(2) 実験結果

今年度はアンカー部に ICRF 波動 (RF3) による追加熱用に新たにアンテナを設置し、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 $2-3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、イオン温度 5 keV) に対し、東西に設置しているアンテナを用いてそれぞれに RF3 による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側アンカー部加熱時にセントラル部線密度及び東アンカー部の線密度が各々 1.5 倍と 3 倍に増加しており、西側 ELIEA による端部イオン流は約 2 倍に増加していることが判る。一方、西アンカー部の加熱時には 3 倍以上増加が見られ、しかもイオンエネルギーも殆ど維持されていることが判った。

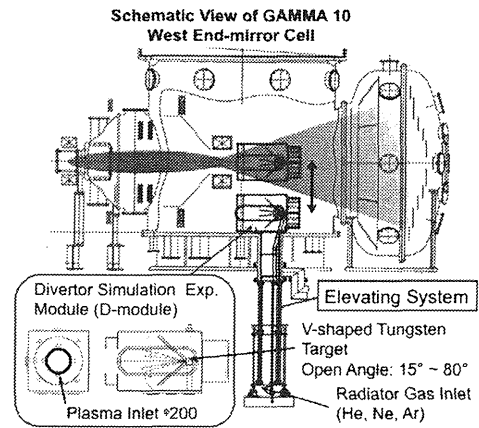


図 1 ガンマ 10 西エンド部真空容器と昨年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール

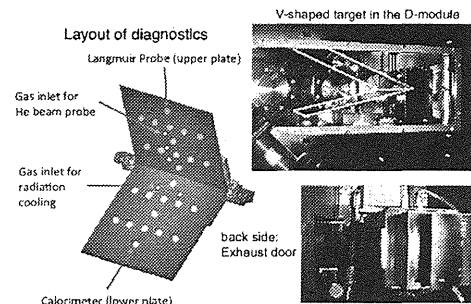


図 2 ダイバータ模擬実験モジュールの概略図と写真

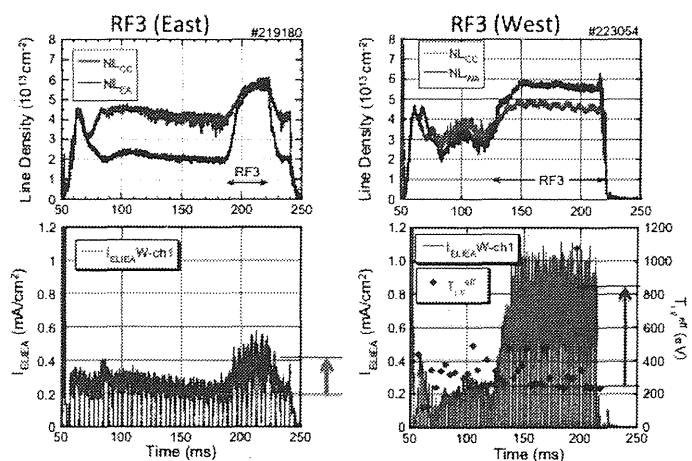


図 3 アンカー部 RF3 による追加熱実験時のプラズマ線密度と端部イオン流束の時間変化 (左: 東アンカー部加熱時, 右: 西アンカー部加熱時)

また、セントラル部プラズマ密度と端損失粒子束密度との関係も調べられた。図4に、ELIEAで計測されたイオン流束とミラー端部出口でプローブを用いて測定した粒子束密度の相関関係を示す。両者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、そのスケーリングから $1.4 \times 10^{23} \text{ H/m}^2$ の粒子束密度が端部ミラー出口で生成されていることが判った。このことから、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を用いた更なる高粒子束密度発生への明るい見通しを示すことが出来た。

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5は、新しく設置したガス導入口から H_2 ガスを入射した場合、モジュール内の電子密度と温度の変化を示している。ガス入射はプラズマ放電の0.3秒程度前から行っており、プラズマ入射前に水素ガスはモジュール内に満たされている。図から判るように H_2 ガス入射の無い場合に比べて一桁以上密度の増加が認められ ECH 入射に伴い $7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ のプラズマが生成されており、電子温度は5eV程度に低下していることが判った。

図6は、Dモジュール内に設置したV字ターゲット上、と後部(Corner)に設置したカロリメータとプローブを用いて計測した熱流と粒子束の測定結果を示す。(a)から H_2 ガスの導入により熱流が半減し、V字のコーナー部に向かって減少していることが判る。一方(b)では、 H_2 に加えて Ar ガスを同時に入射した場合の熱流と粒子束は共に Ar ガスの導入量(プレナム圧)の増加と共に減少し、コーナー部では7分の1程度まで減衰が認められた。更に(c)に示す電子温度は、ガス入射の無い場合、17eV程度あった電子温度が3eV程度まで低下していることが判明した。以上のことから、非接触プラズマ形成へ向けて着実に放射冷却が進行していることが推察される。

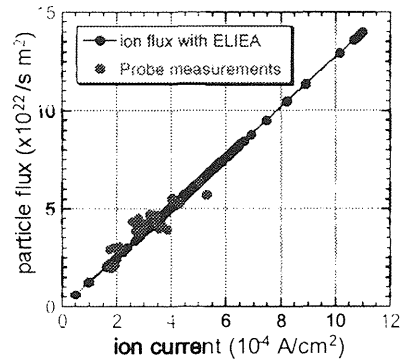


図4 ELIEAで測定したイオン流とミラー端部出口で測定した粒子束の相関

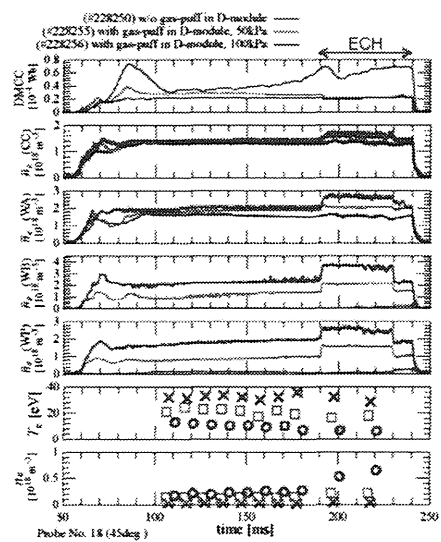


図5 Dモジュール内 H_2 入射時のプラズマパラメータの時間変化

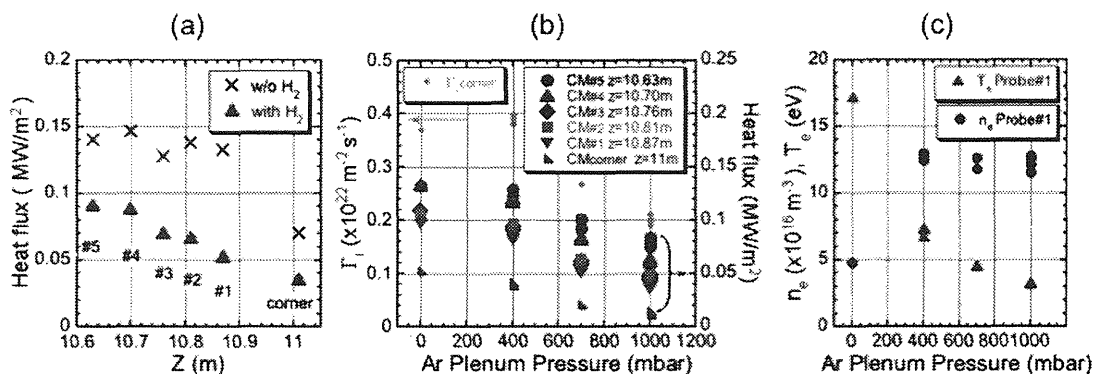


図6 Dモジュール内に設置したV字ターゲット上と後部に設置したプローブとカロリメータによる粒子束と熱流密度 (a) H_2 ガス入射の有無による軸方向分布の比較, (b) H_2 と Ar ガスの同時入射時における Ar プレナム圧依存性, (c) 電子温度と電子密度の Ar プレナム圧依存性

(3) まとめ

今年度は、RFの追加熱による端損失粒子束密度の大幅な増加に成功し、 10^{23} H/m^2 台の粒子束を達成した。

また、昨年度より開始したDモジュールを用いた本格的ダイバータ模擬実験では、 H_2 及びArガスの導入により、大幅な密度の上昇と放射冷却によると思われる電子温度の減少を実現し、非接触プラズマ実現に向けて大きく前進した。特に最近のXeガスを用いた実験では、粒子束の1/10以下の低下も観測しており、非接触プラズマ形成の確認に向け、現在解析が行われている。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定常維持に関する機構解明へ向けて研究を進めてゆく。

【13】粒子シミュレーションによる巨視的不安定性の安定化の研究

陰解法を用いた空間二次元速度空間三次元の静電粒子コードを用いて、巨視的な不安定性である交換型不安定性の安定化に関する研究を行った。交換型不安定性を安定化する方法としてイオンの有限ラーモア半径効果があるが、その効果による安定化については流体コードおよび解析的に解を導出するための近似を行った理論的な研究があるのみである。従ってプラズマ粒子をポアソン方程式と連立して解く粒子シミュレーションによって研究することは、実際にイオン有限ラーモア半径効果で交換型不安定性を完全に安定化できるかどうかを調べるための非常に基礎的で強力な方法である。まず従来の解析的研究結果と我々のシミュレーション結果は交換型不安定性の線形成長領域での線形成長率が非常に良く一致した。次に我々はイオンの有限ラーモア半径効果を取り入れたシミュレーションを実行した。その結果、イオンラーモア半径がある程度以上になると交換型不安定性が完全に安定化されることを初めて見出した。この研究成果は学術雑誌Physics of Plasmas 誌11月号に掲載された。

【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

核融合研究界におけるミラー研究の拠点であるため、関連資料の保管に努めているが、学界でアーカイブの必要性が求められてきた。平成17年度より核融合科学研究所アーカイブズ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様式に倣った。原則公開できる紙資料は8割方登録できた。現在も新たに加わった資料の登録を続けている。測定器等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が、予定スペースの返却を待っている状態である。平成25年度に当大学でのアーカイブ活動が始まったのを機に、グループでの活動をまとめ、大学技術報告に投稿、掲載された。同様に核融合科学研究所共同研究まとめの場で報告をした。また集めていたミラー核融合研究の歴史資料をもとに世界初のタンデムミラー装置ガンマ6のソレノイドコイル縁りの記録について関係者の手により、然る場に上梓した。

<論文>

01. I. Katanuma, Y. Okuyama, S. Kato,
An interchange instability in an open system and the line tying effect on it,
Nuclear Fusion **53** (2013) 43002.
02. Shinya OGASAWARA, Shin KUBO, Masaki NISHIURA, Yoshinori TATEMATSU, Teruo SAITO,
Kenji TANAKA, Takashi SHIMOZUMA, Yasuo YOSHIMURA, Hiroe IGAMI, Hiromi TAKAHASHI,
Satoshi ITO, Ryohei MAKINO, Sakuji KOBAYASHI, Yoshinori MIZUNO, Kohta OKADA, Ryutaro MINAMI,
Tsuyoshi KARIYA, Tsuyoshi IMAI,
Optimization of a Mega-watt 77-GHz Gyrotron Operation for The Collective Thomson Scattering in LHD,
Plasma and Fusion Research **8** (2013) 2402069.
03. T. Imai, M. Ichimura, Y. Nakashima, M. Sakamoto, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, M. Hirata, J. Kohagura,
R. Minami, T. Numakura, R. Ikezoe, K. Oki,
GAMMA 10/PDX PROJECT STATUS AND FUTURE,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 8-15.
04. R. Ikezoe, M. Ichimura, T. Sato, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Iimura, Y. Saito, Y. Annaka, A. Shiratani,
Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, T. Imai,
TIME EVOLVING STRUCTURE OF ALFVEN ION-CYCLOTRON WAVES IN GAMMA10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 58-63.

05. Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, K. Oki, M. Yoshikawa, N. Nishino, H. Matsuura, M. Hirata, M. Ichimura, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, R. Ikezoe, Y. Akabane, S. Kigure, Y. Nagatsuka, S. Takahashi, H. Ueda, T. Imai,
FIRST RESULTS AND FUTURE RESEARCH PLAN OF DIVERTOR SIMULATION EXPERIMENTS USING D-MODULE IN THE END-CELL OF THE GAMMA 10/PDX TANDEM MIRROR,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 100-105.
06. M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Sato, T. Iimura, Y. Saito, Y. Annaka, A. Shiratani, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Nakashima, K. Ichimura, T. Imai,
Recent ICRF heating experiments for a divertor simulation study on GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 115-118.
07. M. Yoshikawa, M. Morimoto, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, I. Yamada, R. Yasuhara, K. Kawahata, H. Funaba, T. Minami, Y. Nakashima, M. Ichimura, T. Imai,
Electron temperature and density measurements by using Thomson scattering system in GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 127-130.
08. H. Takeno, Y. Yasaka, M. Ishikawa, Y. Nakashima, M. Kume, N. Sotani, Y. Munakata, S. Harada, D. Akashi, T. Kawaguchi, S. Miyazaki, K. Ichimura,
Recent Progress of Researches on Direct Energy Conversion for a Fusion System,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 131-134.
09. Y. Kogi, S. Matukawa, M. Yoshikawa, A. Mase, Y. Nagayama, K. Kawahata,
Development of Antenna System and Simulation of Analysis Method for Digitally-Controlled Millimeter-Wave Interferometer,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 172-175.
10. J. Kohagura, M. Yoshikawa, Y. Shima, Y. Morikawa, D. Akita, Y. Hasegawa, T. Imai,
Electron Density and Fluctuation Measurements by Using a Frequency Multiplied Microwave Interferometer in the GAMMA 10 Anchor Cell,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 176-179.
11. Hiroto. Matsuura, Kazuya Ichimura, Katsuhiko Hosoi, Yousuke Nakashima, Mizuki Sakamoto, Tsuyoshi Imai, Mamoru Shoji and Kenichi Nagaoka,
MEASUREMENT OF DIVERTOR HEAT FLUX AT THE END-CELL OF THE GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 180-183.
12. M. Sakamoto, K. Oki, Y. Nakashima, Y. Akabane, Y. Nagatsuka, M. Yoshikawa, R. Nohara, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Imai,
PLASMA CHARACTERIZATION IN DIVERTOR SIMULATION EXPERIMENTS WITH A V-SHAPED TARGET ON GAMMA 10/PDX,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 188-192.
13. K. Ichimura, Y. Nakashima, H. Takeda, K. Hosoi, H. Ueda, S. Kigure, S. Takahashi, M. Ichimura, R. Ikezoe, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, T. Imai,
INVESTIGATION OF THE PLASMA HEATING EFFECTS ON THE END-LOSS ION FLUX OF THE TANDEM MIRROR GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 209-212.
14. A. Rusinov, M. Sakamoto, K. Honda, R. Ohya, N. Yoshida, H. Zushi, T. Tanabe, I. Takagi,
DEUTERIUM RETENTION IN TUNGSTEN WITH DIFFERENT GRAIN ELONGATION DIRECTION IRRADIATED BY PLASMA IN APSEDAS,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 229-232.
15. S. Kigure, Y. Nakashima, N. Nishino, K. Hosoi, K. Ichimura, H. Takeda, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Ueda, S. Takahashi, M. Yoshikawa, J. Kohagura, R. Minami, T. Kariya, M. Sakamoto, M. Ichimura, T. Imai,
OBSERVATION OF PLASMA BEHAVIOR DURING THE ECRH INJECTION BY USING A HIGH-SPEED CAMERA IN GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 241-243.
16. K. Hosoi, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, T. Mizuuchi, K. Ichimura, H. Takeda, H. Ueda, S. Kigure, S. Takahashi, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Imai,
STUDY ON THE OPTIMIZATION OF FUELING BY USING THE SMBI METHOD IN GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 244-246.
17. M. Hirata, T. Iwai, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Sato, T. Iimura, Y. Saito, A. Shiratani, Y. Annaka, Y. Nakashima, T. Imai,
Evaluation of the Axisymmetry of the Central-cell Plasma Using a Segmented Limiter on GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 247-249.
18. T. Yokoyama, M. Ichimura, Y. Ugajin, Y. Saito, A. Fukuyama, Y. Yamaguchi, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Sato, T. Iimura, Y. Annaka, A. Shiratani, T. Imai,
ICRF Antenna loading in the minimum-B anchor configuration on GAMMA 10,
Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 262-264.

19. T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Ito, T. Mutoh, H. Nakabayashi, T. Eguchi, T. Numakura, Y. Endo, Y. Mitsunaka, K. Sakamoto, DEVELOPMENT OF 154 GHz 1 MW GYROTRON FOR ECRH OF LHD, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 265-267.
20. Y. Ugajin, M. Ichimura, T. Yokoyama, Y. Saito, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Sato, T. Iimura, Y. Annaka, A. Shiratani, Y. Nakashima, R. Minami, T. Imai, ICRF experiment with phase-controlled antennas on GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 268-270.
21. T. Iimura, M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Sato, Y. Saito, Y. Annaka, A. Shiratani, T. Imai, Axial transport of high-energy ions due to ICRF heating on GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 271-273.
22. K. Nakazawa, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, H. Nakabayashi, T. Eguchi, R. Kawarasaki, The improvement of the ECH antenna system in the GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 274-276.
23. Y. Saito, M. Ichimura, T. Yokoyama, Y. Ugajin, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Sato, T. Iimura, A. Shiratani, Y. Annaka, Y. Nakashima, T. Imai, ICRF Heating Experiments in Both East and West Anchor Cells on GAMMA10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 277-279.
24. T. Eguchi, T. Kariya, T. Imai, H. Nakabayashi, R. Minami, T. Numakura, R. Kawarasaki, K. Nakazawa, Development of 28 GHz/35 GHz Dual-Frequency Gyrotron for Fusion Research, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 280-282.
25. H. Nakabayashi, T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, R. Kawarasaki, H. Nakazawa, K. Sakamoto, THE PERFORMANCE TEST AND THE IMPROVED DESIGN OF 28 GHz 1 MW GYROTRON, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 283-285.
26. T. Numakura, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, H. Nakabayashi, T. Eguchi, R. Kawarasaki, Y. Nakazawa, Numerical Calculation of the Gyrotron Oscillator in ECH Systems in GAMMA 10 by the use of Parallel Algorithms, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 295-297.
27. R. Minami, T. Imai, T. Kariya, T. Numakura, H. Nakabayashi, T. Eguchi, R. Kawarasaki, K. Nakazawa, Y. Endo, RESULTS OF ECH POWER MODULATION EXPERIMENTING HIGH AND ELM-LIKE HEAT FLUX IN GAMMA 10 TANDEM MIRROR, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 298-300.
28. S. Miyazaki, K. Fujita, S. Harada, H. Takeno, Y. Yasaka, K. Ichimura, Y. Nakashima, Studies on Characteristics of a Bias-type Traveling Wave Direct Energy Converter Installed on GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 304-306.
29. T. Kawaguchi, K. Nishimura, Y. Munakata, H. Takeno, Y. Yasaka, K. Ichimura, Y. Nakashima, Studies on High Density Plasma Production and Neutral Pressure Control for a Cusp-type Direct Energy Converter Simulator, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 307-309.
30. H. Ueda, Y. Nakashima, K. Hosoi, K. Ichimura, H. Takeda, S. Kigure, S. Takahashi, K. Ookawa and T. Imai, EVALUATION OF THE GAMMA 10 NBI SYSTEM AS NEUTRON SOURCE, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 316-318.
31. N. Nishino, H. Kawano, Y. Higashizono, R. Yonenaga, S. Kigure, Y. Nakashima, K. Hosoi, K. Ichimura, H. Takeda, H. Ueda, S. Takahashi, K. Ookawa, M. Yoshikawa, R. Ikezoe, J. Kohagura, T. Kariya, I. Katanuma, M. Hirata, T. Numakura, R. Minami, M. Ichimura, M. Sakamoto, T. Imai, Edge Turbulence/Fluctuation Measurement using Fast Cameras at Various Conditions in GAMMA 10 Central Cell Plasma, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 325-327.
32. T. Sato, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Iimura, Y. Saito, Y. Annaka, A. Shiratani, J. Kohagura, Y. Shima, M. Yoshikawa, T. Imai, TWO-POINT MEASUREMENT OF HIGH-FREQUENCY DENSITY FLUCTUATIONS BY REFLECTOMETRY IN GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 328-330.
33. Y. Morikawa, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, Y. Hasegawa, D. Akita, M. Sakamoto, T. Imai, Density fluctuation measurements of the GAMMA 10 plasma by using the Fraunhofer diffraction method, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 331-333.
34. D. Akita, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, J. Kohagura, Y. Shima, T. Yamada, Y. Morikawa, Y. Hasegawa, T. Imai, Improvement of Measurement Accuracy of the Phase Imaging Interferometer in GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology **63**, 1T (2013) 334-336.

35. Y. Hasegawa, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Shima, D. Akita, Y. Morikawa, M. Ichimura, T. Imai, Radial Electron Density Measurement by Using a Multi-Channel Microwave Interferometer in the Tandem Mirror GAMMA 10, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 337-339.
36. S. Kitade, M. Yoshikawa, Y. Nakashima, T. Mizuuti, S. Kobayashi, K. Hosoi, T. Imai, Spectroscopic Measurements of SMBI Experiments in the central cell of GAMMA 10, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 340-342.
37. K. Furutachi, M. Sakamoto, M. Aoyama, M. Mizuguchi, Y. Miyata, Y. Akabane, K. Oki, M. Yoshikawa, T. Imai, Measurement of Local Radial Electric Field by Using Gold Neutral Beam Probe in GAMMA 10, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 343-345.
38. R. KAWARASAKI, T. IMAI, R. MINAMI, T. KARIYA, T. NUMAKURA, H. NAKABAYASHI, K. NAKAZAWA, T. EGUCHI, M. MIZUGUCHI, M. YOSHIKAWA, M. SAKAMOTO, 2-DIMENSIONAL SOFT X-RAY BEHAVIOR OF ECR HEATED PLASMA IN GAMMA 10, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 374-376.
39. R. Yasuhara, M. Yoshikawa, I. Yamada, K. Kawahata, H. Funaba, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, A photon recycling probe laser for the divertor Thomson scattering system in GAMMA 10, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 408-410.
40. T. Furuta, H. Takeda, M. Toma, W. Sato, Y. Homma, Y. Sawada, Y. Nakashima, A. Hatayama, MODELING OF PLASMA TRANSPORT IN THE MAGNETIC MIRROR CONFIGURATION (GAMMA 10), *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 411-413.
41. H. Takeda, Y. Nakashima, K. Hosoi, K. Ichimura, T. Furuta, M. Toma, A. Hatayama, H. Ueda, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, M. Ichimura, T. Imai, Numerical simulation study for background plasma in the GAMMA 10 end-mirror cell, *Transactions of Fusion Science and Technology* **63**, 1T (2013) 414-416.
42. R. Minami, T. Kariya, T. Imai, T. Numakura, Y. Endo, H. Nakabayashi, T. Eguchi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Mutoh, S. Ito, H. Idei, H. Zushi, Y. Yamaguchi, K. Sakamoto, Y. Mitsunaka, Development of multi-purpose MW gyrotrons for fusion devices, *Nuclear Fusion* **53** (2013) 63003.
43. Ryutaro Minami, Tsuyoshi Imai, Tsuyoshi Kariya, Tomoharu Numakura, Hidetaka Nakabayashi, Taku Eguchi, Ryo Kawarasaki, Kazuhiro Nakazawa, Yoichi Endo, Mafumi Hirata, Makoto Ichimura, Ryuya Ikezoe, Isao Katanuma, Junko Kohagura, Yousuke Nakashima, Kensuke Oki, Mizuki Sakamoto, Masayuki Yoshikawa, Development of High Power ECH Systems for High and ELM-like Heat Flux in GAMMA 10 Tandem Mirror, *Plasma and Fusion Research* **8** (2013) 2402081.
44. M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Miyata, M. Aoyama, M. Mizuguchi, M. Hirata, M. Ichimura, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, Y. Nakashima, T. Numakura, R. Ikezoe, K. Ichimura, K. Furutachi, H. Nakanishi, Y. Nagayama, Simultaneous evaluation of potential fluctuation from the core plasma to the end region in GAMMA 10, *Nuclear Fusion* **53** (2013) 073031.
45. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Iwai, T. Yokoyama, Y. Ugajin, T. Sato, T. Iimura, Y. Saito, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, T. Imai, Coupling of ICRF waves and axial transport of high-energy ions owing to spontaneously excited waves in the GAMMA 10 tandem mirror, *Nuclear Fusion* **53** (2013) 073040.
46. Y. T. Mizuuchi, K. Mukai, S. Kobayashi, H. Okada, H.Y. Lee, S. Ohhima, L. Zang, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Minami, K. Yamamoto, T. Kagawa, T.Y. Minami, K. Mizuno, Y. Wada, S. Arai, H. Yashiro, H. Watada, K. Hashimoto, N. Kenmochi, Y. Nagae, M. Sha, K. Kasajima, N. Nishino, Y. Nakashima, K. Hanatani, Y. Nakamura, S. Konoshima, F. Sano, Gas Fueling Effect on Plasma Profile in Heliotron J, *Journal of Nuclear Materials* **438** (2013) S453-S458.
47. Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, M. Sakamoto, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Ishii, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, H. Ueda, M. Yoshikawa, N. Asakura, T. Furuta, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, S. Masuzaki, H. Matsuura, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, T. Shikama, M. Shoji, M. Toma, A. Tonegawa, Y. Ueda, Recent Results of Divertor Simulation Research Using an End-cell of a Large Tandem Mirror Device, *Journal of Nuclear Materials* **438** (2013) S738-S741.
48. M. Sakamoto, Y. Nakashima, A. Rusinov, K. Hosoi, H. Takeda, Y. Akabane, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Ichimura, T. Imai, Hydrogen Isotope Recycling at a Tungsten Target, *Journal of Nuclear Materials* **438** (2013) S1088-S1091.
49. Tsuyoshi KARIYA, Ryutaro MINAMI, Tsuyoshi IMAI, Taku EGUCHI, Keishi SAKAMOTO,

- Yoshika MITSUNAKA, Tomoharu NUMAKURA, Yoichi ENDO,
Development of a High Power Gyrotron Operating at 28 and 35 GHz,
Plasma and Fusion Research **8** (2013) 1205107.
50. M. Yoshikawa, K. Nagasu, Y. Shimamura, Y. Shima, J. Kohagura, K. Kitagawa, M. Morishita, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, R. Kawarazaki, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, T. Minami,
Electron temperature and density measurements by using the Thomson scattering system in the tandem mirror GAMMA 10,
Journal of Instrumentation **8** (2013) C10016.
51. I. Katanuma, S. Sato, Y. Okuyama, S. Kato, R. Kubota,
Ion Finite Larmor Radius Effects on the Interchange Instability in an Open System,
Physics of Plasmas **20** (2013) 112107.
52. Yuki Sakoi, Mitsutaka Miyamoto, Kotaro Ono, Mizuki Sakamoto,
Helium irradiation effects on deuterium retention in tungsten,
Journal of Nuclear Materials **442** (2013) S715-S718.
53. M. Yoshikawa, K. Nagasu, Y. Shimamura, Y. Shima, J. Kohagura, K. Kitagawa, M. Morishita, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, R. Kawarazaki, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba and T. Minami,
Polarization-Controlled Multi-Pass Thomson Scattering System in the Tandem Mirror GAMMA 10,
Plasma and Fusion Research **8** (2013) 1205169.
54. X. Wang, I. Sakagami, A. Mase and M. Ichimura,
Wilkinson power divider with complex isolation component and its miniaturization,
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **62**, 3 (2014) 422-430.

<学位論文>

学位論文 (博士) [数理物質科学研究科]

01. 水口 正紀 [博士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of potential formation and low frequency fluctuations in the GAMMA10 tandem mirror
02. 細井 克洋 [博士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of particle control based on H α line measurement and Monte-Carlo simulation in the GAMMA 10 tandem mirror

学位論文 (修士) [数理物質科学研究科]

03. 江口 濯 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
プラズマ加熱用大電力ジャイロトロンの開発と GAMMA 10 ELM 模擬実験に向けた端損失熱流束生成
04. 奥山 陽平 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
密度勾配によるドリフト波不安定性の粒子シミュレーション
05. 河原崎 遼 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA10 における軟 X 線トモグラフィ計測によるセントラル部 ECH 電子加熱特性の研究
06. 木暮 諭 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
高速カメラと複合プローブを用いた GAMMA 10 プラズマ計測
07. 北川 和 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
衝突輻射モデル計算コードの開発及び GAMMA10 不純物スペクトルの解析
08. 高橋 樹仁 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA10 における ECH 実験時のセントラル部イオンエネルギーバランスの時間発展解析
09. 中澤 和寛 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA10 セントラル部 ECH アンテナの吸収分布制御によるプラズマ加熱特性評価および改良研究
10. 長塚 優 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX におけるダイバータ模擬実験装置内部への希ガス導入時の静電プローブ計測
11. 長谷川 裕平 [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による GAMMA10 セントラル部におけるプラズマ電子密度計測
12. 古舘 謙一 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10 におけるプラズマの電位及び密度揺動の統計的解析
13. 飯村 拓真 [修士 (工学), 数理物質科学研究科電子・物理工学専攻]
GAMMA10 高周波加熱に起因する高エネルギーイオン輸送の研究
14. 齋藤 裕裕 [修士 (工学), 数理物質科学研究科電子・物理工学専攻]
GAMMA 10 における高周波によるダイバータ模擬実験に向けたプラズマ制御
15. 佐藤 周平 [修士 (工学), 数理物質科学研究科電子・物理工学専攻]
GAMMA10 中央ミラー部におけるイオンの新古典拡散に関する研究

学位論文 (学士)

16. 磯 将貴 [学士 (理学), 物理学類]
多チャンネルマイクロ波干渉計による GAMMA10 セントラル部プラズマの電子密度分布測定
17. 上原 真 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10 における高効率・高集光型セントラル ECRH アンテナによる吸収位置特性の研究
18. 菅野 傑 [学士 (理学), 物理学類]
ダイバータ部イメージング干渉計の構築とベンチテスト
19. 金 史良 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10 におけるセントラル部とエンド部間のプラズマ揺動解析
20. 佐藤 文哉 [学士 (理学), 物理学類]
14GHz 大電力ジャイロトロン開発に向けた EGUN による電子銃の性能評価と設計
21. 島村 侑希 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10-Thomson 散乱計測システムによる空間同時多点計測
22. 清水 啓太 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験モジュールにおける不純物ガス入射時のプラズマ分光計測
23. 蔣 佳希 [学士 (理学), 物理学類]
高速カメラを用いた GAMMA 10 /PDX ダイバータ模擬実験モジュール内におけるプラズマの可視光イメージ計測
24. 白石 智洋 [学士 (理学), 物理学類]
位相イメージング干渉計を用いた RF3 印加時の GAMMA 10 西プラグ部の電子密度分布計測
25. 寺門 明紘 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10/PDX におけるエンド部プラズマとターゲット板との相互作用に関する研究
26. 角田 昌輝 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10 のエンドロスに関するモンテカルロ・シミュレーション
27. 長屋 孝信 [学士 (理学), 物理学類]
ASDEX Gauge を用いた GAMMA10/PDX D-module 内中性ガス密度の計測
28. 南齋 宏駿 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10 セントラル ECRH 加熱特性向上に向けた吸収分布ブロード化アンテナの開発研究
29. 野尻 訓平 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA10/PDX におけるエンド部ダイバータ模擬プラズマと上流プラズマパラメータとの関係
30. 渡邊 和征 [学士 (理学), 物理学類]
GAMMA 10 におけるイオンサイクロトロン共鳴加熱効果の荷電交換中性粒子による計測
31. 岡田 拓也 [学士 (工学), 応用理工学類]
マイクロ波反射計を用いたプラズマ中の密度揺動計測とその定量評価
32. 小田 弦之介 [学士 (工学), 応用理工学類]
二流体不安定性に関する計算機シミュレーション
33. 隅田 脩平 [学士 (工学), 応用理工学類]
GAMMA10 東西アンカー部高周波加熱によるセントラル部高密度化

<講演>

01. T. Tokuzawa, A. Ejiri, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, Y. Kadoya, M. Hangyo, M. Tani, K. Yamamoto, J. Kohagura, M. Yoshikawa, K. Tanaka, I. Yamada, K. Kawahata, and LHD Experiment Group,
Developments of multi-channel Doppler reflectometer in LHD and THz pulse diagnostics for higher dense plasmas, 11th International Reflectometry Workshop (IRW11) (Ecole Polytechnique, France, 2013.4.22-2013.4.25).
02. Nakanishi H., Ohsuna M., Kojima M., Imazu S., Nonomura M., Emoto M., Yamamoto T., Nagayama Y., Ozeki T., Nakajima N., Ida K., Kaneko O.,
Revised cloud storage structure for light-weight data archiving in LHD,
9th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research (Hefei, China, 2013.5.6-2013.5.10) O5-3.
03. H. Takahashi, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, S. Kobayashi, Y. Mizuno, K. Okada, T. Mutoh, K. Nagaoka, S. Murakami, M. Osakabe, I. Yamada, H. Nakano, M. Yokoyama, T. Ido, A. Shimizu, R. Seki, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kariya, R. Minami, T. Imai,
Extension of High Te Regime with Upgraded ECRH System in the LHD,
20th Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas 2013 (Sorrento, Italy, 2013.6.25-2013.6.28).
04. I. Katanuma, Y. Okuyama, S. Kato, S. Sato, R. Kubota,
A flute instability with ion finite Larmor radius effects,

- APPC12 The 12th Asia Pacific Physics Conference (Makuhari Messe Chiba Japan, 2013.7.14-2013.7.19)
D1-PWe-04.
05. Takashi Shimozuma, Hiromi Takahashi, Satoshi Ito, Shin Kubo, Yasuo Yoshimura, Hiroe Igami, Masaki Nishiura, Shinya Ogasawara, Ryohei Makino, Yoshinori Mizuno, Kohta Okada, Sakuji Kobayashi, Takashi Mutoh, Ryutaro Minami, Tsuyoshi Kariya, Tsuyoshi Imai,
Installation of a 154 GHz Mega-Watt Gyrotron and Its Contribution to the Extension of Plasma Parameter Regime in LHD,
IRMMW-THz 2013 (Mainz, 2013.9.1-2013.9.6).
 06. H. Idei, O. Watanabe, H. Zushi, K. Hanada, T. Kariya, T. Imai,
Development of 28 GHz system for GAMMA 10/PDX and spherical tokamak researches,
US-EU-JPN RF heating technology workshop (Speyer, Germany, 2013.9.9-2013.9.11).
 07. Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Igami, H. Takahashi, M. Nishiura, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, S. Ogasawara, R. Makino, T. Mutoh, H. Yamada, T. Kariya, T. Imai,
Progress in long-pulse discharge and plasma parameters by upgraded ECRH system in LHD,
Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop (Padova, 2013.9.16-2013.9.20).
 08. Y. Morikawa, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, Y. Hasegawa, M. Sakamoto, T. Imai and M. Ichimura,
Density fluctuation measurements of the GAMMA 10 plasma by using the Fraunhofer diffraction method,
16th International Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics (Madison, Wisconsin USA, 2013.9.22-2013.9.26)
P16.
 09. M. Yoshikawa, K. Nagasu, Y. Shimamura, Y. Shima, J. Kohagura, K. Kitagawa, M. Morishita, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, R. Kawarazaki, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, T. Minami,
Electron temperature and density measurements by using the Thomson scattering system in the tandem mirror GAMMA 10,
16th International Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics (Madison, Wisconsin USA, 2013.9.22-2013.9.26)
P17.
 10. H. Takeda, Y. Nakashima, Y. Iida, K. Hosoi, T. Furuta, M. Toma, A. Hatayama, K. Ichimura, H. Ueda, M. Iwamoto, Y. Hosoda, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, M. Ichimura, T. Imai,
Simulation of radiation cooling effects in the GAMMA 10 west end-cell using fluid model,
14th Int. Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Cracow, Poland, 2013.9.23-2013.9.25) P1-18.
 11. H. Idei, H. Zushi, K. Hanada, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, O. Watanabe, T. Yamaguchi, A. Ejiri, Y. Takase, T. Onchi, S. Suzukawa, H. Miura, K. Nakamura, M. Hasegawa, A. Fujisawa, Y. Nagashima, N. Yoshida, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, O. Mitarai, T. Maekawa, A. Fukuyama and QUEST team,
Non-inductive driven plasma start-up and investigation towards EBWCD in QUEST,
US-Japan Workshop Physics of RF Heating of Fusion Plasmas (MIT Plasma Science and Fusion Center, 2013.9.24-2013.9.26).
 12. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, T. Iimura, Y. Saito, Y. Iwamoto, T. Okada, S. Sumida, K. Watanabe, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, K. Ichimura, Y. Nakashima,
Recent ICRF-related experiments on the GAMMA 10 tandem mirror,
US-Japan Workshop Physics of RF Heating of Fusion Plasmas (MIT Plasma Science and Fusion Center, 2013.9.24-2013.9.26).
 13. Y. Yoshimura, H. Kasahara, K. Nagasaki, M. Tokitani, N. Ashikawa, Y. Ueda, M. Osakabe, H. Igami, T. Seki, C. Suzuki, T. Tokuzawa, B. Peterson, S. Yoshimura, I. Yamada, K. Ida, K. Tanaka, S. Kubo, T. Shimozuma, H. Takahashi, M. Nishiura, S. Kobayashi, S. Ito, Y. Mizuno, K. Okada, S. Ogasawara, R. Makino, T. Mutoh, H. Yamada, T. Kariya, T. Imai,
Long-pulse plasma sustainment and high-density plasma heating by use of electron cyclotron waves in LHD,
The 4th International Symposium of Advanced Energy Science (Kyoto, 2013.9.30-2013.10.2).
 14. X. Wang, I. Sakagami, A. Mase,
Generalized, miniaturized, dual-band Wilkinson power divider with series RLC circuit,
Asia-Pacific Microwave Conference (Seoul, 2013.11.5-2013.11.8) T3B-5.
 15. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, T. Iimura, Y. Saito, Y. Iwamoto, T. Okada, S. Sumida, K. Watanabe, M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima,
Coupling and spatial structure of Alfvén-ion-cyclotron waves in GAMMA 10,
55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Denver, USA, 2013.11.11-2013.11.15) BP8.00082.
 16. T. Yokoyama, M. Ichimura, A. Fukuyama, Y. Saito, S. Sumida, M. Hirata, R. Ikezoe, T. Iimura, Y. Iwamoto, T. Okada, K. Watanabe, Y. Nakashima, K. Ichimura,
Analysis of ICRF wave excitation in phase-control experiment on GAMMA10,
23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.18-2013.11.21) P2-1.
 17. Ryutaro Minami, Tsuyoshi Imai, Tsuyoshi Kariya, Tomoharu Numakura, Taku Eguchi, Ryo Kawarasaki, Kazuhiro Nakazawa, Takaki Kato, Fumiya Sato, Hirotaka Nanzai, Makoto Uehara, Yoichi Endo, Mafumi Hirata, Makoto Ichimura, Ryuya Ikezoe, Isao Katanuma, Junko Kohagura, Yousuke Nakashima, Kensuke Oki,

- Mizuki Sakamoto, Masayuki Yoshikawa,
A Generation and Control of High Intermittent Heat Load Pattern for Divertor Simulation Studies in GAMMA 10 Tandem Mirror,
23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.18-2013.11.21).
18. Y. Hosoda, Y. Nakashima, Y. Iida, K. Hosoi, K. Ichimura, H. Takeda, S. Kigure, S. Takahashi, M. Iwamoto, K. Shimizu, Y. Shou, T. Nagaya, M. Yosikawa, K. Oki, M. Sakamoto, Y. Nagatuka, M. Yoshikawa, R. Nohara, M. Ichimura,
Plasma spectral measurements in the D-module of the GAMMA 10/PDX end-cell,
23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.18-2013.11.21) P2-3.
19. M. Iwamoto, Y. Nakashima, H. Matsuura, H. Takeda, K. Hosoi, K. Ichimura, S. Kigure, S. Takahashi, Y. Hosoda, K. Oki, Y. Nagatsuka, M. Yoshikawa, R. Nohara, M. Sakamoto, T. Imai, M. Ichimura,
Measurement of heat flux by using Calorimeter in D-module of GAMMA 10/PDX,
23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.18-2013.11.21) P2-4.
20. K. Ichimura, Y. Nakashima, H. Takeda, K. Hosoi, S. Kigure, S. Takahashi, M. Iwamoto, Y. Hosoda, M. Hirata, R. Ikezoe, K. Oki, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, T. Imai and M. Ichimura,
The first experiment of MPD Jet injection into GAMMA 10 plasma,
23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.18-2013.11.21) P2-5.
21. M. Sakamoto,
Divertor simulation and PWI study using linear devices towards DEMO,
2nd IAEA DEMO PROGRAMME WORKSHOP (Vienna, Austria, 2013.12.17-2013.12.20) S2-3 (Invited).
22. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, T. Yokoyama, T. Iimura, Y. Saito, Y. Iwamoto, T. Okada, S. Sumida, K. Watanabe, K. Ichimura, Y. Nakashima, K. Oki, M. Sakamoto,
ICRF Experiments Toward the Enhancement of End-Loss Flux on GAMMA 10/PDX,
Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive (Awara, Fukui, Japan, 2014.1.20-2014.1.22).
23. T. IMAI,
Development of High Power/Multi-Frequency Gyrotron for EC/EBW H&CD on Fusion Devices,
Japan-Korea Workshop on Physics and Technology of Heating and Current Drive (Awara, Fukui, Japan, 2014.1.20-2014.1.22) 2-14.
24. 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,
Developments of Pulsed Terahertz Wave Diagnostics for Magnetically Confined Fusion Plasma,
The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2014 (IW-FIRT2014) (University of Fukui, Fukui, Japan, 2014.3.5-2014.3.7).

<解説・紀要等>

01. 今井剛、假家強、南龍太郎、出射浩、関子秀樹、長崎百伸、佐野史道、金子修、日野友明、
双方向型共同研究の新展開に向けた 28GHz 帯の高出力ジャイロトロン開発の現状、
プラズマ・核融合学会誌 89, 7 (2013) 445-450.
02. 中西秀哉、長谷川真、吉川正志、
ITER に向けた遠隔実験の現状 2. 既存装置の遠隔実験の現状および予定と課題 2.2 LHD 等における遠隔実験、
プラズマ・核融合学会誌 89, 7 (2013) 468-473.
03. 山本孝志、江本雅彦、中西秀哉、
ITER に向けた遠隔実験の現状 3. 高速データ通信技術と遠隔実験データ解析開発の現状と展望、
プラズマ・核融合学会誌 89, 7 (2013) 474-478.
04. 中西秀哉、
光ディスクアーカイブ運用の現状と今後に向けた要望～アカデミックユーザの立場から～、
FRL ストレージニュース 2013 年 3Q 号, (2013) 15-20.
05. 平田久子、
「核融合アーカイブズ・筑波大学」における活動中間報告、
筑波大学技術報告 No. 34 (2014. 3) 61-64.
06. 伊藤伸一、室井光裕、河原井勝一、皆川雄功、渡邊ゆり子、飯田郁雄、中原繁男、平田久子、大石健一、保谷博、小泉陽子、大川和夫、加藤純雄、淀縄文男、間宮精一、松山英治、鶴見明、喜多英治、
数理工学等技術室における教育支援と今後の展望、
第 13 回筑波大学技術職員技術発表会報告集 (2014. 3) 84-91.
07. Yamada, I., Yasuhara, R., Funaba, H., Narihara, K., Kohmoto, T., Hayashi, H., Hatae, T., Yatsuka, E., Tojo, H.,

- Yoshikawa, M., Minami, T.,
Initial Results of the Forward Scattering Measurement in the LHD Thomson Scattering System for High Electron temperature Experiments,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 61.
08. Ogasawara, S., Kubo, S., Makino, R., Nishiura, M., Tanaka, K., Shimozuma, T., Yoshimura, Y., Igami, H., Takahashi, H., Ito, S., Kobayashi, S., Mizuno, Y., Okada, K., Tatematsu, Y., Saito, T., Minami, R., Kariya, T.,
Optimization of Operation Parameter of Mega-watt 77 GHz Gyrotron for Application to Collective Thomson Scattering Measurements in LHD,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 145.
09. Yoshikawa, M., Sakamoto, S., Sekiguchi, R., Kohagura, J., Shima, Y., Imai, T., Sakamoto, M., Nakashima, Y., Minami, T., Yasuhara, R., Kawahata, K., Yamada, I., Funaba, H.,
Development of the Multi-pass Thomson Scattering System in the GAMMA 10 Tandem Mirror,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 237.
10. Yoshikawa, M., Sugiyama, A., Washo, Y., Katanuma, I., Shima, Y., Nakanishi, H., Ohshima, M., Kojima, M., Nagayama, Y.,
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 2012 - March 2013**, (2013) 485.
11. Imai, T., GAMMA 10/PDX Group,
Studies of the Divertor-simulating Boundary Plasma and Transport Control in Making Use of Open End Magnetic Field and Effects of Electric Potential and Field,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 500.
12. Kogi, Y., Matsukawa, S., Mukunoki, H., Yoshikawa, M., Kohagura, J., Yamada, T., Akita, D., Shima, Y., Mase, A., Nagayama, Y., Kawahata, K.,
Development of Digital Based Millimeterwave Interferometer and Application to Electron Density Imaging at the Potential Barrier Region on GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 501.
13. Saito, T., Tatematsu, Y., Kiwamoto, Y., Ichimura, M., Imai, T., Minami, R., Soga, Y., Ogura, K.,
Study of Interaction between Plasma and EM Wave in Prospect of Application of Millimeter & Sub-millimeter Waves,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 502.
14. H. Takeno, Y. Yasaka, Y. Tomita, J. Miyazawa, M. Ishikawa, Y. Nakashima, I. Katanuma,
Variation of Energy Distribution in a Bias-Type TWDEC Simulator Installed on GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 503.
15. Yoshimura, Y., Kubo, S., Shimozuma, T., Ito, S., Igami, H., Takahashi, H., Nishiura, M., Nagayama, Y., Imai, T., Kariya, T., Minami, R., Kobayashi, S., Mizuno, Y., Okada, K., Ogasawara, S., Makino, R., Mutoh, T.,
Development of High-Power, Long-Pulse, High-Frequency Gyrotron and Improvement of Plasma Parameter in LHD by Use of the Gyrotron,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 504.
16. Kariya, T., Imai, T., Minami, R., Numakura, T., Eguchi, T., Nakabayashi, H., Nakazawa, K., Kawarazaki, R., Zushi, H., Hanada, K., Idei, H., Nagasaki, K., Saito, T., Tatematsu, Y., Kubo, S., Shimozuma, T., Yoshimura, Y.,
Cooperative ECH Study for High Density Plasma Heating using the 28GHz High Power CW Gyrotron System,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 505.
17. A. Ando, Y. Hashima, Y. Izawa, K. Suzuki, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Yokoyama,
Plasma Flow Measurement at Peripheral Region of the Central Cell in GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 506.
18. Yoshikawa, M., Sekiguchi, R., Sakamoto, S., Shima, Y., Kohagura, J., Sakamoto, M., Imai, T., Ichimura, M., Nakashima, Y., Minami, T., Kawahata, K., Yamada, I., Funaba, H.,
Electron Temperature and Density Measurements by Using the Thomson Scattering System in GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 507.
19. S. Nagata, K. Hoshi, M. Zhao, T. Shikama, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, H. Ueda,
Surface Nalysis of Nuclear Fusion Materials Irradiated by GAMMA 10 Plasmas,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 508.
20. N. Ohno, T. Tomiyama, S. Kajita, M. Takagi, Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Hosoi, K. Ichimura, S. Kigure, S. Masuzaki, H. Tanaka,
Generation of Edtached Plasmas by using Simple Closed Dibertor Module,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 509.
21. M. Sakamoto, et al.,
Study of Plasma-Wall Interaction and Core-Edge Coupleing in GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 510.
22. Y. Ueda, et al.,

- Study on Erosion, Transport and Redeposition of Wall Materials in GAMMA-10 and its Contribution to Divertor Development,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 511.
23. Y. Nakashima, T. Imai, M. Ichimura, M. Sakamoto, I. Katanuma, M. Yoshikawa, T. Kariya, J. Kohagura, R. Minami, Y. Iida, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, S. Kigure, S. Takahashi, N. Ohno, Y. Ueda, N. Asakura, K. Itami, M. Fukumoto, A. Hatayama, M. Toma, Y. Sawada, T. Furuta, A. Tonegawa, N. Nishino, S. Kado, H. Matsuura, T. Shikama, S. Nagata, M. Zhao, A. Sagara, Y. Hirooka, S. Masuzaki, M. Shoji,
Study of Divertor Simulation Using End-region of a Tandem Mirror,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 512.
24. S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, H.Y. Lee, Y. Nagae, T. Harada, Y. Nakashima, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, H. Ishii, M. Sakamoto, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Shoji,
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas (Analysis of Recycling Behavior and Optimization of Particle Fueling in Open Magnetic Field Plasmas),
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 513.
25. Y. Hirooka, H. Zhou, Y. Nakashima, M. Sakamoto,
Particle Control by an End Plate in GAMMA-10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 514.
26. S. Shinohara, D. Kuwahara, A. Mishio, H. Ishii, N. Teshigahara, H. Fujitsuka, S. Waseda, T. Hada, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Yokoyama,
Study on Generation and Control of High-Density Flow in Boundary Plasma,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 515.
27. H. Matsuura, Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, H. Ueda, K. Nagaoka, M. Shoji,
Experimental Study on Heat Flux of Divertor Plasma (Measurement of Sheath Heat Flux on the Surface of GAMMA 10 Divertor Plate),
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 516.
28. Tanaka, H., Sakamoto, M., Furutachi, K., Jomura, K., Oki, K., Mizuguchi, M., Nagahara, Y., Yoshikawa, M., Kohagura, J., Ohno, N., Tsuji, Y.,
Statistical Analysis of Core and Edge Plasma Fluctuations in the GAMMA 10,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 517.
29. Y. Nakashima, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, H. Ueda, S. Kigure, M. Yoshikawa, J. Kohagura, N. Nishino, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, H.Y. Lee, Y. Nagae, T. Harada, M. Shoji,
Optimization of Fueling in Magnetically Confined Plasmas (Fueling Optimization Using Ha/Da Line-emission Measurements I Heliotron J),
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 528.
30. K. Harada, et al.,
Formation of Divertor Configuration and Measurement of Divertor Plasmas on QUEST,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 548.
31. Nakanishi, H., Ohsuna, M., Kojima, M., Imazu, S., Nonomura, M., Yamamoto, T., Emoto, M., Nagayama, Y., Kawahata, K., Hasegawa, M., Higashijima, A., Nakamura, K., Yoshikawa, M., Sugiyama, A., Washo, Y.,
Recent Progress of the Remote Data Acquisition and Archiving in "Fusion Virtual Laboratory (FVL)",
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 549.
32. Idei, H., Zushi, H., Hanada, K., Nakamura, K., Fujisawa, A., Hasegawa, M., Imai, T., Kariya, T., Minami, R., Sakamoto, M., Numakura, T.,
Collaborative Research on Electron Cyclotron Heating in high-density Plasmas Using the 28GHz High Power Gyrotron System,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 554.
33. Y. Nakashima, M. Sakamoto, K. Hosoi, H. Takeda, K. Ichimura, H. Ueda, T. Shikama, S. Nagata, M. Zhao, K. Hoshi,
Surface Analysis of Effect of Plasma Irradiation to Nuclear Fusion Materials,
Annual Report of National Institute for Fusion Science **April 2012 - March 2013**, (2013) 578.