

X プラズマ研究グループ

教授	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
シニアスタッフ	大川和夫
大学院生(物理学専攻)	20名
学群学生(物理学類)	9名

共同研究者

准教授	江角直道（物理工学域）
研究員	市村真、今井剛、東郷訓、飯島貴朗

研究協力者

技術専門官	杉山昭彦
技術専門職員	和所保規、遠藤洋一、嶋頼子
研究支援推進員	岡崎昇、中西博之
大学院生(電子・物理工学)	4名
学群学生(応用理工学類)	1名

【1】プラズマグループの研究の方針・基本理念

プラズマ研究グループでは、筑波大学の「中期計画・中期目標」に則り、世界に広く貢献できる優れた研究成果を創出することを使命として、常に研究を深化させるととも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。

また、筑波大学の中期計画等に基づき、平成16年度から開始した双方向型共同研究の枠組みを活用し、第Ⅲ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、富山大学を中心とし、さらに講座単位の各大学との共同研究を積極的に推進する。この双方向型共同研究を通して、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おり、第Ⅲ期中期計画の3年目である平成30年度においても、さらにプラズマ物理学・核融合科学研究の進化と双方向型共同研究を基盤とした国内外の共同研究の強化に務めている。

学内では、プラズマ研究センター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、さらには国内外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力を進めている。上記の共同研究を基に、顕著な成果の創造・創出を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、研究に邁進する。

【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グループが主体となって研究を行っ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、国際熱核融合実験炉 ITER の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の制御、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の解決という意義・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、ミラー端部における電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部の電位／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、先駆的な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～26 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達成し、「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

筑波大学プラズマ研究センターでは、「GAMMA 10/PDX 装置を用いた高性能プラズマと低壁熱負荷の両立」をテーマに掲げ、開放端磁場構造と電位／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。大学における中期目標・中期計画の第Ⅲ期が始まった平成 28 年度から、更に双方向型共同研究の質的向上、高度化を目指し、原型炉へ向けた研究として、開放端プラズマを用いた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共に、境界プラズマの様々な現象とその物理機構の解明、それら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きた。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、GAMMA 10/PDX 装置

が持つ最も大きな長所は、高磁場下の高温イオン束を制御できることにあり、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長となっている。平成 30 年度までに、ITER の定常熱負荷を大幅に上回る 30 MW/m^2 以上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共に、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-module) の実験を開始し、水素ガスや希ガスの入射により、非接触プラズマの実現に成功し、その制御に向けての実験を進展させてきた。

筑波大学プラズマ研究センターのもう一つの特長である大電力ジャイロトロン開発では、14GHz から 300GHz の幅広い周波数範囲における MW レベルの開発を着実に進展させて来た。これまでに、九大とのセンター間連携を推進し、QUEST での電流駆動実験に大きく貢献している。GAMMA 10/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おいて、高繰り返しパルス運転を用いた ELM 熱負荷の模擬実験において高熱流束の達成に大きく貢献している。

第Ⅲ期の 3 年目にあたる平成 30 年度は、昨年度に引き続き精力的に進めてきたダイバータ模擬実験とジャイロトロン開発研究という研究の大きな 2 つの柱を基盤として、各大学の研究者の多様な視点・豊富な経験と双方向型共同研究の特長を活かした研究により、複数のセンターが連携するネットワーク型の共同研究もさらに発展させつつ、核融合原型炉設計に向けた必須、かつ緊急の課題の解決に向けて進展させることを本研究の目的としている。

(2) ダイバータ模擬実験

GAMMA 10/PDX 全体図、およびダイバータ模擬実験モジュール (D-module) の概略図を図 1 に示す。ダイバータ模擬実験は、GAMMA 10/PDX の西エンド部に設置した D-module を用いて主に行われる。図 1 (b) の概略図で示すように、D-module は長方形の SUS 製の容器で、前面から端損失プラズマ流が導入される。D-module 内部には V 字型のターゲット板が組み込まれ、後部の扉を開閉することによりモジュール内の排気速度を変えることが可能となっている。また、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 まで温度を上昇させることができる。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、水素ガスや希ガス導入による放射冷却や不純物輸送などのダイバータ模擬研究や PWI 研究が、高速イオンゲージ (ASDEX Gauge) や各種分光器、高速カメラ等により可能となっている。

平成 26 年度から開始された不純物ガス導入によるプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差したダイバータ模擬実験の後、平成 29 年度からは、非接触プラズマに対するプラズマ追加熱系の影響評価を行ってきた。ICRF 波動 (RF1, RF2) を用いて生成したプラズマを D-module に導入し、 H_2 , Ar, Kr, Xe ガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスの ECH (東プラグ ECH, セントラル ECH) による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

D-module 内に導入する Xe ガスの量を変化させ、V 字ターゲットコーナー部での熱流束を計測した。ECH を印加しない場合、Xe ガスのプレナム圧の増加と共に熱流束は顕著に減

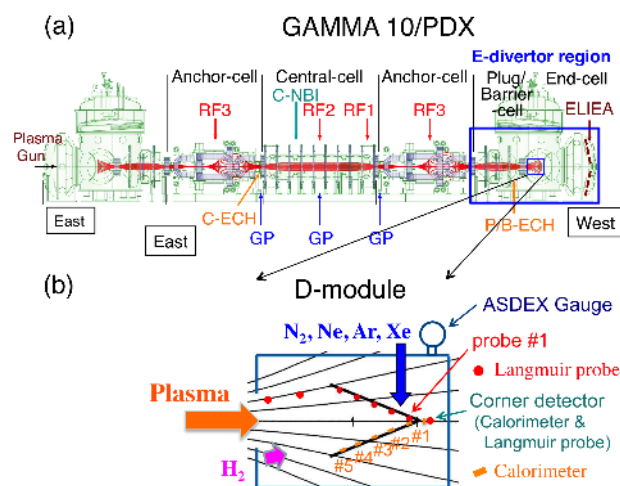


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図, (b) D-module の概略図

少することが分かった。一方、東 pECH を短パルス (25ms) 印加することにより熱流束は大幅に増加するが、Xe ガス導入量の増加に伴って減少することも判明した。コーナ部において測定されたイオン束は、Xe ガスを導入しない場合、ECH 時に 2 倍程度に増加するが、Xe ガスを導入した場合には、印加前に非接触プラズマを形成していることを示す低イオン束が、ECH と共に 10 倍以上に著しく増加し、ターゲット近傍での Xe のイオン化が著しく促進していることが示唆され、非接触状態から接触化への遷移が認められた。また、ガス種間の比較では、N₂ ガスが、ECH による接触化への遷移に対する耐性が高いことも分かってきた。一方、水素ガス導入による非接触プラズマへの cECH 印加実験では、V 字ターゲットコーナ部と中央部では電子温度の変化は認められなかったが、上流部では cECH 印加により電子温度が減少した。一方、電子密度は全領域で ECH 印加により増加した。これは、ECH 印加により上流からの粒子束が増加して全体として密度が増加すると共に電離フロントが上流側に移動したことが示唆すると考えられる。

また、D-module 上流部と下流部におけるプラズマパラメータの比較が、D-module プラズマ導入部に設置した可動プローブと V 字ターゲット上およびコーナプローブを用いて行なわれ、下流側では、導入ガス圧の上昇とともに分子活性化再結合による密度低下が生じているが、上流側では密度、イオン束は上昇していることが判明した。これらの他にも、ダイバータ模擬実験領域の新たな計測システムの開発として、イメージングポロメータや、分子過程の詳細解析の為に分子イオンからの赤外光計測システムの整備が行われた。

ダイバータ模擬の実験的研究と並行して、流体モデルに基づくダイバータ模擬プラズマの数値シミュレーションも着実に進み、直線装置用に開発を進めてきた B2 コードと同様の多流体コード LINDA を用いて、GAMMA 10/PDX のエンド部の端損失プラズマ流の特性および各種不純物ガス入射による電子冷却効果、再結合過程のシミュレーション解析が大きく進展した。

(3) マルチパストムソン散乱計測システム

GAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-トムソン散乱計測システムを導入し、これまでに空間 7 点、10 Hz 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を可能としてきた。また、散乱光強度、高時間分解を目指してマルチパス・システムの開発を行い、そのパス数の増加を目指して、再生レーザー増幅方式を用いたアンプ付きマルチパス・システムを構築した。これにより、トムソン散乱信号強度は、8 倍程度まで増加させることが可能となる。今後、より安定したマルチパス信号を取得できるようにレーザー光路の詳細調整を行っていく。一方、ダイバータ模擬部 (D-module) では、エンド部トムソン散乱計測システムの構築を進めてきた。図 2 に、エンド部トムソン散乱計測システムの概略図を示す。エンド部に水平ポートから入射するレーザーにビームアパーチャを取り付けることで、集光光学系に入り込む迷光の影響を減らすことによってガス散乱実験でラマン散乱光を取得することに成功し、D-module への Ar ガス入射実験時に、大きな電磁ノイズの中に初めてトムソン散乱信号を確認した。今後は、ポリクロメータを電磁シールドして電磁ノイズを抑え、エンド部においてもトムソン散乱計測を行っていくこととする。

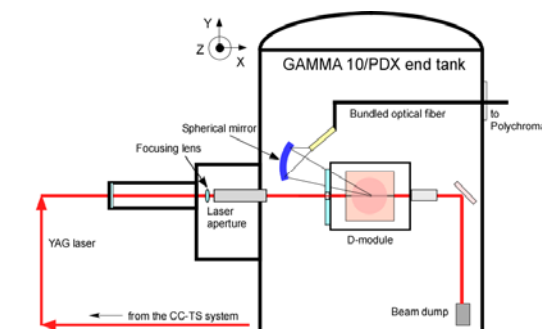


図 2 エンド部トムソン散乱計測システム

(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、これまでの核融合科学研究所、九州大学等との共同研究及び量子科学研究開発機構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 30 年度では、前年度に引

き続き 28/35GHz の 2 周波数ジャイロトロンの性能評価試験を進めた。ビーム電流 50A 以上でビーム電圧が安定に動作する様に試験電源の改造を行い、短パルスにおける、出力のビーム電流依存性、アノード電流依存性、磁場電流依存性、CPD 電圧依存性等の特性データを取得した。28.04GHz にて 1.65MW、34.83GHz にて、1.21MW を得て、目標出力(28GHz で 1.5MW 以上、35GHz で 1MW 以上)を達成した。

九州大学の QUEST 装置や GAMMA 10/PDX 中央部加熱への適用を見込み開発を開始した 14GHz ジャイロトロンにおいては、周波数が低いために電磁波ビームの発散が大きく、電磁波ビームの伝送効率が低くなる(初期設計 69%)課題に対し、ミラー形状を大きくするとともに伝送損失の大きい部分の光路長を短くし、さらに、コルゲート導波管をジャイロトロン管内に入れる新構造を採用することで、RF 伝送効率は、94%と大幅に改善した。また、今年度より、28GHz ジャイロトロンにも使用可能な共通部品を中心に、14GHz ジャイロトロン部品の製作を開始した。

筑波大学と九州大学間のセンター間連携研究に基づき、筑波大学で開発した 28GHz-1MW ジャイロトロンを QUEST 装置に適用しプラズマ実験が行われている。H30 年度は、前年度末に動作中にコレクタ先端部がリークし、バックシールで応急処置を行い、電子銃の健全性と発振出力の確認を行った後、ジャイロトロンの本格修理を行った。

(5) その他

高周波入射に伴うプラズマ電位上昇、セントラル部密度・電位上昇に対する端損失イオン束への影響を調べた。また、セントラル部の AIC (Alfvén Ion Cyclotron) 波動・AIC 差周波波動の空間構造と、これらの波動との相互作用により端損失する高エネルギーイオンのエネルギー分布、空間構造を調べた。西バリア部では、3次元波動伝搬解析を用いて ICRF 加熱条件の最適化の検討を進めた。更に端損失イオンの直接加熱を検討するため東エンド部に新しいアンテナを設置し予備実験を始めた。将来の高密度プラズマ加熱手法の検討のため、遅波励起の密度に対する影響、入射高周波の差周波波動励起についての実験を行った。

双方向型共同研究の成果報告の場として、毎年夏期に開催されているプラズマ研究センターシンポジウムは、昨年度と同様に核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会のダイバータ研究開発加速戦略方策ワーキンググループのフォローアップ会合との合同で2日間にわたり行われた。初日の午前には「ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループ会合」、午後からの合同セッションにて筑波大学プラズマ研究センターにおける定常高密度プラズマ装置の報告が行われた。二日目の午後からは、プラズマ研究センターシンポジウムセッションにて本センターのダイバータ研究や加熱装置、計測装置の進展状況について報告がなされ、以上の日程において 70 名を超える参加者のもと活発な議論が行われた。

さらに、筑波大学の大学会館において、平成 30 年 8 月 27 日～31 日の日程で” 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2018)” を主催した。本国際会議の参加者は 95 名 (7 か国、国内 : 66 名、国外 : 29 名) であり、48 件の口頭発表と 39 件のポスター発表が行われ、プラズマ閉じ込め、加熱、安定性、輸送現象、直接エネルギー変換、プラズマ計測、プラズマ・壁相互作用等の幅広い分野にわたって活発な議論が行われた。

【4】 GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムによる電子温度・密度計測

タンデムミラーGAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-トムソン散乱計測システムを導入し、空間 7 点、10 Hz 間隔での時間変化を 1 プラズマショットで調べることを可能としてきた。また、ダイバータ模擬部(D-module)のトムソン散乱計測システムの構築を進めてきた。本年度は、昨年度に引き続きセントラル部の径方向分布の詳細計測のため、散乱光集光システムの改良を行いこれまでの手動ラボジャッキから電動ラボジャッキに変更し、遠隔操作可能とした。また、

電子温度が高くなった場合に、ポリクロメーターの測定波長チャンネルの変更（低波長側が測定できるように）が必要であったところ、高速オシロスコープを1台追加することによって、プラズマ中心部3か所（ $x = 0, \pm 5$ cm）を計測するポリクロメーターの全波長チャンネル同時計測を可能とし、高電子温度においてもチャンネル変更なしで計測できるようにした。一方、トムソン散乱信号強度の増加及び、時間分解性能の向上を目指して、マルチパス・トムソン散乱計測システムの開発を行っており、レーザーアンプを用いたマルチパス・システムによる初めてのトムソン散乱信号の取得を行った。

GAMMA 10/PDX のセントラル部のトムソン散乱計測システムは、プラズマからの90° 散乱光を集光する。プラズマ径方向分布の詳細計測のため、集光光学系の光ファイバーアレイを設置している光学台を上下可動可能な手動ラボジャッキを使用していたが、遠隔操作可能な電動ラボジャッキ（Thorlabo, MLJ150/M）に交換した。これにより、プラズマ3ショットで、2.5 cm 間隔、空間15点での測定を可能とした。

一方、D-module のトムソン散乱計測システムは、セントラル部に設置してあるYAG レーザーの光を分岐して、D-module へ水平ポートから入射するように伝送した。D-module のセントラル部のトムソン散乱計測システムから D-module のトムソン散乱光学系の散乱点までの距離は、約21 mである。YAG レーザーは、高さ1.8 m から水平ポートに入射し、真空容器の中に凹面集光ミラーを設置して160° 後方散乱光を光ファイバーへと集光する。光ファイバーによって真空容器から取り出された散乱光は、低温測定用に開発した5チャンネル・ポリクロメーターに取り付け、ポリクロメーターからの出力信号はオシロスコープで収集する。集光光学系の立体角は、約70 mstrである。入射レーザー光に沿って迷光防止用のビームアパーチャーを取り付けたことで、ラマンガス散乱実験が可能となり、トムソン散乱信号の取得に成功した。図1に初めて取得した D-module トムソン散乱信号波形を示す。バックグラウンドの電磁ノイズが大きい

ため、今後、電磁波遮蔽クロスを使用してノイズを減らすことにする。

トムソン散乱計測は、使用するレーザー発振周期で時間分解能が制限されており、高くてもkHzオーダーでの測定が上限となっている。そこで、より高い時間分解能を達成するため、プローブレーザーをプラズマ中に何度も往復させてパス毎の散乱信号を測定するマルチパス・トムソン散乱計測システムを開発している。ここでは、レーザー強度がパス数の増加によって減衰したところでレーザーアンプを用いてプローブレーザーのパワーを再度増強し、散乱信号を安定して測定できるようなマルチパス・システムを新たに構築することとした。本年度は、レーザーアンプを導入したマルチパス・システムの光学系の調整を進め、アンプ付きマルチパス・トムソン散乱計測システムにおいて初めてアンプ後のトム

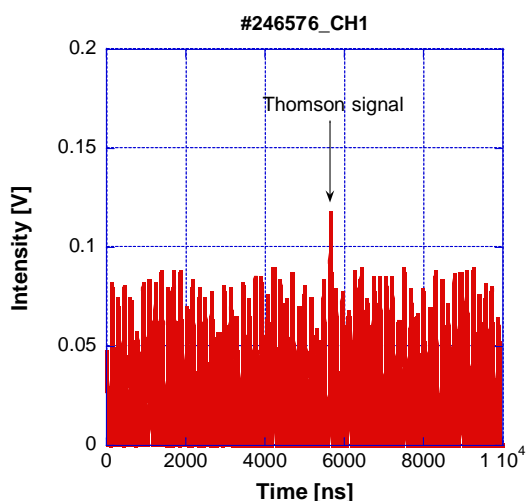


図1 D-module トムソン散乱信号。

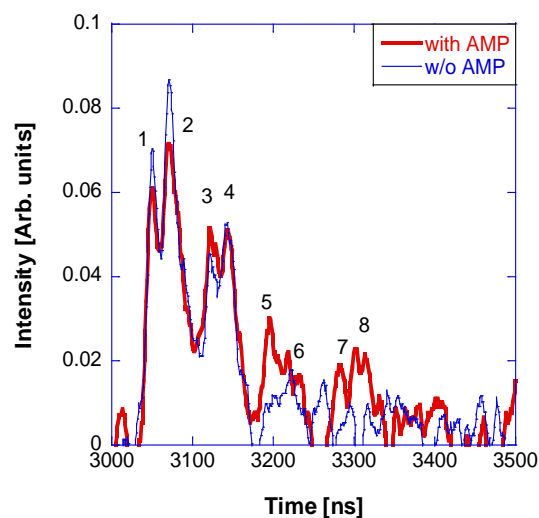


図2 アンプ付きマルチパス・トムソン散乱計測システムのトムソン散乱信号。

ソン散乱信号の取得に成功した。図2にレーザーアンプを導入したマルチパス・システムを用いてのトムソン散乱信号を取得した結果を示す。この時は、4パス後のレーザーをアンプで増幅し、再びプラズマにレーザー入射して5パス以降の信号を取得した。アンプを通さなかった場合は、5パス以降の信号出力がノイズに埋もれて確認できていない。本レーザーアンプを用いたマルチパス・トムソン散乱システムの構築が可能であることが確認でき、今後、レーザーパスの調整を進め、安定してマルチパス信号が取得できるように調整をすすめるとともに、レーザーアンプの改良を行い、より長い時間、レーザーアンプを使用できるようにしていく必要がある。

【5】 GAMMA 10/PDX におけるドップラー反射計の開発と密度揺動の回転計測

揺動や乱流等の発生・抑制機構の解明には種々の情報の多点同時計測が不可欠である。本研究では、電子密度揺動の周方向回転速度を径方向に多点同時計測が可能な周波数コム・ドップラー反射計の開発を行っている。本システムでは、多周波数のプローブ信号を同時入射可能なコム発振器により 11-17 GHz (X モード) のマイクロ波入射を行い、それらの後方散乱信号を観測する。GAMMA 10/PDX の典型的な電子密度分布ではプラズマ半径 a (18 cm) に対し $r/a=0.4-1$ 程度の位置を観測する。

開発しているコム・ドップラー反射計システムの概要を述べる。発振周波数間隔は 200MHz であり、これらの信号のうち 11.8~16.8 GHz までの 8 周波数を使用する。各周波数に対する受信信号と参照信号は、10.8 GHz の局部発振器 (LO) 信号により 1~6 GHz の中間周波数 (IF) 信号に変換した後、バンドパス・フィルタ (BPF) で抽出される。選択された受信信号と参照信号を直交ミキサ (I-Q ミキサ) に入力すると、In-phase (I) 信号と Quadrature (Q) 信号が得られる。本システムを GAMMA10/PDX のプラズマ計測に適用した初期結果を報告する。今回は準備の都合により 4 チャンネルのみをテストした。まず、アンテナ部のミラー設定角度を変更しスペクトルの反転を確認した。図 1(a) に示す反磁性量と線電子密度の放電において、入射周波数 14.2 GHz に対し得られたドップラーシフトの時間変化を図 1(b) に示す。ドップラーシフトは複素信号スペクトルの重心計算より評価しており、これが密度揺動の回転速度を表す簡易的な指標となる。ミラー設定角度が+2 度 (濃青線)、-2 度 (薄線) の場合を示しており、両者で周波数の正負が反転することを確認した。尚、密度揺動の回転方向が電子反磁性ドリフト方向の場合は、ミラー設定角度が正に対しドップラーシフトは負、ミラー角度が負ではシフトは正となる。本放電では時刻 150ms 付近で超音速分子性ビーム (SMBI) 入射により線密度が上昇し、反磁性量は減少している。このときドップラーシフトに大きな変動が観測された。この SMBI による周波数の変化は、密度変化や揺動の回転の変化に起因すると考えられる。

図 2 に異なる入射マイクロ波周波数に対してドップラーシフトを同時計測した例を示す。計測した 4 チャンネルのうち、1 チャンネルは調整不足のため除外した。入射周波数が異なると、ドップラーシフトの時間変化が異

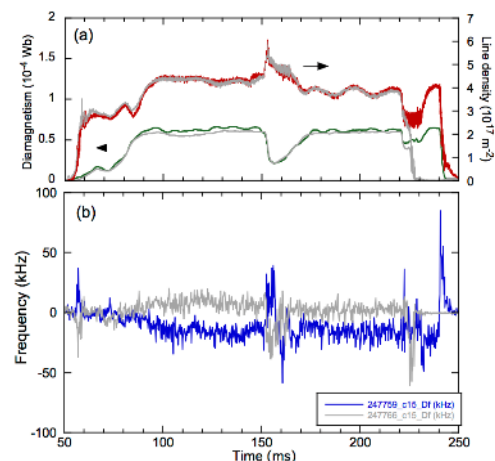


図 1 (a)反磁性量と線密度の時間発展。
(b)ドップラーシフトの時間変化。

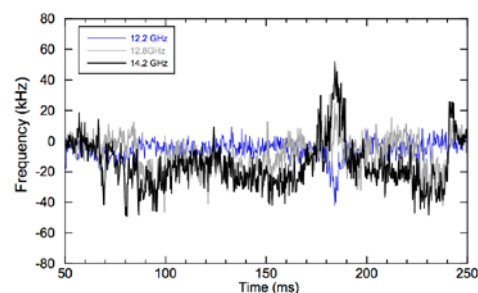


図 2 ドップラーシフトの時間変化。

なる結果を得た。本放電では時刻 170-190 ms にプラグ部電子サイクロトロン加熱による追加熱が行われており、これにより揺動回転速度の方向に変化が生じたと考えられる。以上の結果はこれまでに単一チャンネルのドップラー反射計を用いて複数の放電により計測した結果と矛盾しないものであった。今後の計画としては、8 チャンネルの常時稼働を目指した整備・調整、ノイズの改善等をすすめ、本システムを揺動回転速度分布・速度シア等の計測に適用する予定である。

【6】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 30 年度は、アンカー部追加熱によるセントラル部電位上昇、及び端損失プラズマ制御に関する考察をさらに進めた。バリア部アンテナについては、アンテナ形状の違いに対するプラズマ生成・加熱効果の違いについて実験と 3 次元波動解析コードによる検討を進めた。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) 波動の特性を調べるため、軸方向 5 ヶ所、方位角方向の異なる位置 1 ヶ所に設置した 6 対のホーンアンテナにより、マイクロ波反射計による揺動の空間構造を計測した。また、AIC 波動間の差周波揺動による高エネルギーイオンの軸方向輸送についても空間構造についての検討を進めた。一方、直線型装置における高密度プラズマのイオン加熱に関する検討の一つとして、印加 ICRF 波動による差周波数波動励起実験を行なった。

(1) アンカー部追加熱によるセントラル部電位上昇

アンカー部への ICRF 波動印加によるセントラル部電位の上昇について調べるため、アンカー部に共鳴層を持つ 9.9~10.3 MHz、セントラル部およびアンカー部で共鳴を起こさない 6.0 MHz、更にアンカー中央ミラー部でバウンス運動する電子と共鳴しない 16.26 MHz の ICRF 波動をアンカー部に印加したところ、全ての周波数においてセントラル部の浮遊電位上昇が観測された。また、浮遊電位の上昇はセントラル部の電子線密度や反磁性量等に依らず、アンカー部への ICRF 印加電力に顕著な依存性を示した。一方、アンカー部の磁力線構造が電位上昇に与える影響を確認するため、西アンカー部の 2 本のアンテナを用いて位相差制御を行い、アンカー中央部の軸対称に近い領域、および両アンテナの外側の非軸対称な領域に波動を強く励起させたところ、非軸対称領域の波動強度とセントラル部電位に同様の位相差依存性が得られた。以上のことから、非軸対称領域に ICRF 波動が伝播すると $E \times B$ ドリフトによる電子の径方向損失が引き起こされ、これに伴い顕著な電位上昇が起きたと推察される。

セントラル部の浮遊電位上昇に伴い、端損失イオンの増加、端損失電子の減少が観測された。この時、アンカー部プラズマ周辺部に設置したいくつかの電極で、浮遊電位の顕著な減少が確認された。このことから、GAMMA 10/PDX 系内で電子が径方向に損失していること、特にアンカー部での電子の径方向損失が示唆された。

(2) ICRF 加熱による端損失プラズマ制御

ICRF 波動を用いた端損失プラズマの制御については、電位上昇に対するイオン束への影響、ミラー閉じ込め領域の内部・外部の ICRF 加熱によるイオン加熱効果について検討を進めた。

電位の端損失イオン束への影響については、10,000 回の放電データを用いた解析を行い、線密度、電位の上昇に伴う端損失イオン束の上昇を確認した。(図 1) ICRF 加熱条件等が

異なる場合も、線密度、電位が同じデータにおいてはほぼ同じイオン束となり、端損失イオン束に影響する主要パラメータは密度と電位であることが示唆された。

ミラー閉じ込め領域内部と外部のICRF波動によるイオン加熱効果については、端損失イオンのエネルギー分布およびピッチ角分布から評価した。ミラー閉じ込め領域内部では、イオン加熱によるイオン温度の非等方性を駆動力に励起するAIC (Alfvén Ion Cyclotron) 波動によりイオンが損失し、ロスコーン付近にピークを持つピッチ角分布が、0 度付近にピークを持つ構造に変化し、イオン束も増大した。また、この上昇はイオンエネルギーにより傾向が異なり、1.5 keV 付近の高エネルギーイオンにおいてはセントラル部の反磁性量が 0.45×10^{-4} Wb より大きくなると急激に上昇することが確認された。閉じ込め領域外部における加熱では、損失イオンの加熱効果は確認されたが、加熱効率の向上に向けた検討が必要である。

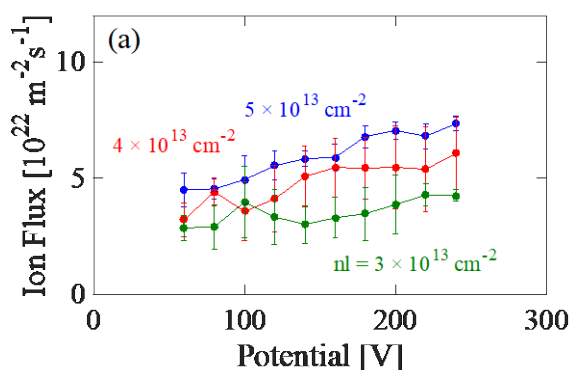


図1 プラズマ電位による端損失イオン束の変化 (Plasma Fusion Res. **14**, 2402032 (2019)より)

(3) バリア部アンテナにおけるICRF加熱効率の検討

ダイバータ模擬実験を行う西エンド部に隣接しているバリア部を直接加熱することにより、端損失プラズマ制御が期待される。バリア部のICRFアンテナは、磁場に垂直な電流を流すDouble Half Turn (DHT)アンテナと、磁場に平行な電流を流すNagoya Type-IIIアンテナの2種類を準備しているが、Nagoya Type-IIIアンテナは一方にループ構造を持ち、アンテナの取り付け方向を変えることで、磁場に対する電流の流れる位置を変化させることができる。電流がよりミラー中央部付近を流れるType-III(IN)とミラー中央部より遠くを流れるType-III(OUT)に対し、3次元波動解析コードを用いた波動伝播解析を行ったところ、イオンによる吸収電力の周波数依存性はアンテナの向きに依らず、ミラー中央近傍に共鳴層をもつ7.7 MHz付近の周波数で最大となることがわかった。(図2) 一方、DHTアンテナはアンテナ近傍の共鳴周波数8.6 MHz付近で最大となった。7.7 MHzの高周波を印加した実験結果と定性的に矛盾しない結果が得られている。以上のことから、DHTタイプのアンテナの軸方向位置に対する波動伝搬解析も進めた。

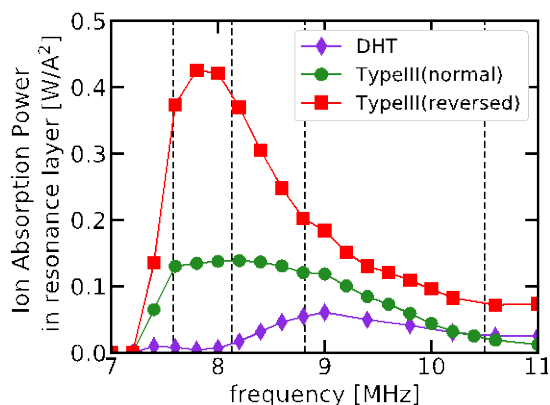


図2 単位電流あたりのイオン吸収電力の周波数依存性 (Plasma Fusion Res. **14**, 2401012 (2019)より)

(4) 反射計を用いたイオンサイクロトロン周波数帯波動の計測

ICRF加熱の最適化や制御に活用するため、高温プラズマ内部領域における励起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、更に励起ICRF波動やAIC波動の差周波数波動の分布を、軸方向5ヶ所、方位角方向の異なる位置1ヶ所に設置した6対のホーンアンテナを用いたマイクロ波反射計により計測した。AIC波動とAIC差周波波動については、方位角方向の計測から、モード数がそれぞれ $m=-1$, 0で、AIC波動と差周波波動の三波結合に必要なモードマッチングを満たしている事が明らかになった。軸方向計測からは、AIC波動が定在波構造を示すのに対し、差周波波動は進

行波であることを示唆する結果が得られた。径方向分布については、AIC 波動は径方向全般にわたり計測されたが、差周波波動はプラズマ中心付近で最も波動強度が強くなる構造を示した。また、波動構造の詳細な検討を進めるため、入射マイクロ波の高速周波数掃引を行い、軸方向の密度分布を取得した。

高密度直線プラズマ実験装置において、イオンのビーチ加熱に用いられるアルベン遅波は高密度化に伴い遮蔽されることが知られており、高密度プラズマにおけるイオン加熱手法の確立は重要である。そこで、複数の高出力 ICRF 加熱装置を有する GAMMA 10/PDX 装置を用いた高密度領域における遅波励起および加熱効率に関する検討の一つとして、印加 ICRF 波動による差周波数波動励起実験を行なった。通常印加する 9.9, 10.3 MHz の高周波に加え、16.26 MHz の高周波を重畳し、6.36, 5.96, および 0.4 MHz の差周波波動励起の径方向分布を反射計により計測したところ、印加高周波とその差周波に起因する密度揺動は径方向外側ほど強く、差周波波動の揺動レベルは印加高周波に対して 1 オーダー程度低くなる事が観測された。イオン加熱効果は見られなかったが、これはイオン加熱に寄与する 6 MHz 付近の差周波のために印加した 16.26 MHz の揺動レベルが低かったことによると考えられる。0.4 MHz の差周波波動については、径方向、軸方向分布、密度依存性等について、初期のデータを取得した。

(5) 高エネルギーイオンの AIC 差周波揺動による軸方向輸送の研究

セントラル部の反射計で評価した AIC 波動間の非線形結合から、AIC 波動間の差周波揺動がプラズマ中心領域で顕著に励起され、その差周波の周期で高エネルギーイオンが軸方向に輸送されていることが装置端部での粒子計測から明らかになっている。波動粒子相互作用を詳細に調べるため、MCP を用いたイオン検出器の高耐圧化を進め、3ヶ所の径方向位置で計測を行った。高エネルギーイオンの揺動強度は、AIC 差周波波動の径方向分布に似た構造が観測されたが、AIC 差周波波動が励起していないと考えられる径方向外側でも高エネルギーイオンの輸送がある事が示唆され、AIC 波動そのものによる高エネルギーイオンの輸送も示唆された。また、AIC 差周波と相互作用するイオンエネルギー帯はそれぞれの周波数帯により異なることが明らかになった。

【7】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/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。

(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 1.38MW、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、2017 年度のプラズマ実験において世界最大となる 86kA の無誘導プラズマ電流立上を達成した。次のジャイロトロン開発として、GAMMA10/PDX のダイバータ模擬研究において、より高い熱流束を生成するために 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 28GHz-1.5~2 MW-3s、Heliotron J で必要とされる動作性能 35GHz-1MW-0.5 秒を 1 本のジャイロトロンで動作可能な、2 周波ジャイロトロンである。

28GHz Oscillation Test ($V_k=80\text{kV}$)

Beam Current I_b [A]	Output Power P_o [mW]	Output Efficiency η [%]
15	0.35	30
20	0.55	30
25	0.80	30
30	0.95	30
35	1.10	30
40	1.18	30
45	1.25	30
50	1.30	30
55	1.40	30
60	1.45	30
65	1.65	30

35GHz Oscillation Test ($V_k=80\text{kV}$)

Legend: ● $P_o[\text{MW}]$ 34.83GHz, ■ $\eta[\%]$ 34.83GHz

Beam Current I_b [A]	Output Power P_o [MW]	Output Efficiency η [%]
15	0.38	32
20	0.55	32
25	0.68	32
30	0.82	32
35	0.98	32
40	1.05	32
45	1.15	32
50	1.18	30
55	1.22	28

Figure 1 is a schematic diagram comparing the present and improved designs of a 14-GHz Gyrotron. The diagram is divided into two main sections: 'Present 28 GHz / 1 MW Gyrotron' on the left and '14-GHz Gyrotron (under design)' on the right. Both sections show a cross-sectional view of the device, including the Cathode Gun, RF Compressor, Output Waveguide, Anode, and Resonator. The improved design on the right features a 'Relative Shorter Output Path Length for 14GHz RF beam' (18596) and a 'Relative Shorter Output Path Length for 14GHz RF beam' (9256). The resonator is a 'Complan to Contingent Waveguide' with a 'Transmission 19456', 'Efficiency ~ 94%', and '11% purity 91.2%'. The improved design also shows a 'Larger Mirror' and a 'Shorter optical path length'. The output is a 'Gaussian Profile from Resonator'.

-263-

に計算された放射器から出力窓までの伝送効率は、69%と低い結果と成った。周波数の低い14GHzの電磁波ビームの発散が大きく、光路長の長いミラー3-4間、ミラー4と出力窓間での減衰が大きいのが原因である。そこで、ミラー形状を大きくするとともに伝送損失の大きい部分の光路長を短くし、さらに、コルゲート導波管をジャイロトロン管内に入れ、第4ミラーと導波管カップリング位置間距離を大幅に短くするように構造設計を行った。その結果、導波管カップリング位置までのRF伝送効率は、94%と大幅に改善された(図3)。本構造においては、MOUが不用となるため、システムの低コスト化にとっても大きなメリットがある。これまでに、不使用ジャイロトロン・コレクタのリユースを検討しているコレクタ部を除き、設計はほぼ完了した。また、今年度より、28GHzジャイロトロンにも使用可能な共通部品を中心に、14GHzジャイロトロン部品の製作を開始した。

(5) 核融合科学研究所(NIFS)とのジャイロトロン開発共同研究

PRCでは、NIFSとの間で、ジャイロトロン開発共同研究を進めている。2018年度は、核融合発電に向けた原型炉であるDEMO(DEMONstration power plant)用の240GHzジャイロトロンの試設計を行った。トカマク型やヘリカル型で検討されているDEMOでは、高磁場中において高密度プラズマを加熱する必要がある、220~250GHz帯のジャイロトロンが必要とされ、その開発が検討されている。DEMO用ジャイロトロンでは、CW動作において、MWオーダーの大電力を高効率で安定に出力する必要がある。加えてマルチ周波数動作も要望されている。

240GHz-TE_{32,18}モードでの検討では、ビーム電流を70A程度まで上げる事で1.5MW以上の発振が期待される。また、カソード本体構造をLHD用154GHzジャイロトロンと同一とした電子銃により、電子ビームのピッチファクタ $\alpha=1.0$ が $\Delta\alpha/\alpha\sim 2.5\%$ の低分散で得られた。放射器の試設計では、第1のミラー位置ほぼガウス分布の放射電界分布が得られ、伝送効率は99%であった

【8】ガンマ10/PDX セントラル部及びプラグ部におけるECH実験の進展

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。

本研究で用いるセントラル部に設置されたECHの入射配位を図1に示す。プラズマによる電磁波吸収率の計算結果から、異常波(X-mode)の偏波でおよそ100%吸収され、正常波(0-mode)の偏波で数%程度の吸収という結果が得られた。また、X-modeの軌道は基本波共鳴層付近において鉛直下方に曲がるのに対して、0-modeの軌道は直進する計算結果が得られた。しかし、実験的には0-modeの電磁波入射によって、より高い電子温度まで加熱されることが確認された。入射偏波制御に対して、ECHを入射パワー90kW、偏波をX-modeと0-modeでそれぞれ入射した時のX線強度分布の比較を行った。ECH印加中において、X-mode設定時よりも0-mode設定時に高いX線強度が得られた。また、軟X線強度のピーク位置は、X-mode設定ではほとんど変化せず、0-mode設定では下方にシフトする傾向が得られた(図2)。以上より、軟X線強度のピーク位置について、光線軌道の計算結果と実験結果との間に相違が見られ、共鳴層に到達しているEC波が意図した偏波からずれている可能性があることが分かった。

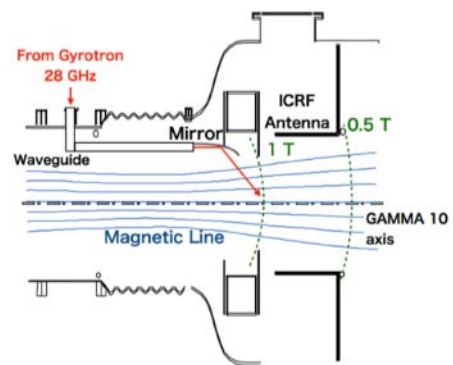


図1 セントラル部 ECH アンテナ配位

プラグ部では、これまでに共同研究で開発された MW 級ジャイロトロンを、既存のガンマ 10 西プラグ部の ECH システムへ適用するために、必要な伝送系の製作・組立を行なった。構築した MW 級ジャイロトロンを用いた新しい ECH 伝送系のマイクロ波パワー伝送実験を実施し、マイクロ波パワー伝送効率、放電やアウトガス等の大電力パワー伝送時の問題点などの基礎データを取得した。図 3 に、ガンマ 10 プラグ部及びエンド部の概略図を示す。プラグ部 ECH の 2 枚のミラー・アンテナは既存のものを適用し、アンテナ直近までの伝送系を新たに構築した。次に、新たに構築した MW 級ジャイロトロンを用いた ECH 伝送系のマイクロ波パワー伝送実験を実施した。図 4 に、構築した新規伝送系の概略図を示す。MW 級ジャイロトロン、位相整合器(MOU)、コルゲート導波管(WG)、マイターベンド(MB)、真空排気用の排気ポートと位置調整用ベローズから構成される。コルゲート導波管の全長は 25 m 程度、マイターベンドは 5 つある。MOU 出力直後である測定点 1 で測定したパワーを基準として、各測定点においてパワー測定を実施した。その結果、アンテナ直近までの伝送効率として 64%程度の伝送効率を得られた。これは計算から予想される伝送効率と比較して数%程度低い、既存の ECH システムのパワーレベルと比較して、2 倍程度の ECH 入射パワーの増大が期待できることが分かった。また大電力パワー伝送時の問題点として、パワー伝送実験後に機器を取り外して内部を確認したところ、放電痕が確認された。これにより、伝送効率が計算値と比較して低いことの要因として、エージングの不足によるアウトガスのため伝送系内放電が発生した可能性が挙げられる。今後、より効率的な伝送を実現するために、ガス出しのためのエージングや、放電の要因となるギャップなどの対策のため機器製作精度の改善などが必要であると考えられる。

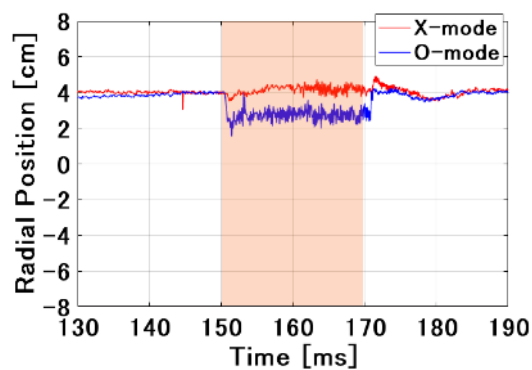


図 2 軟 X 線強度径方向分布ピーク位置の時間変化

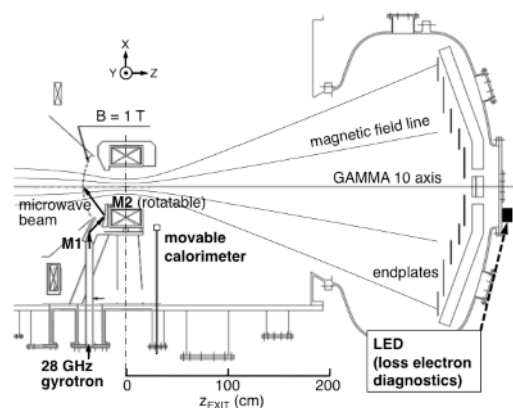


図 3 西側プラグ部及びエンド部断面概略

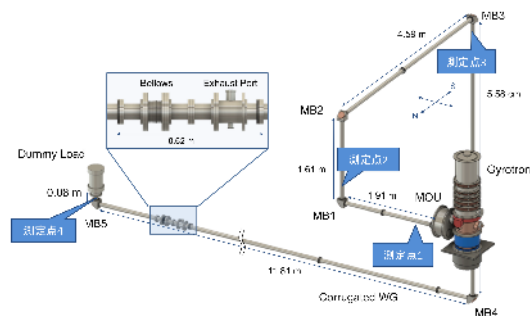


図 4 MW 級ジャイロトロンを用いた ECH 伝送系の概略図

【 9 】 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プラズマ閉じ込め

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、ラバールノズルを用いたSMBI実験を開始しており、指向性の高い粒子供給が可能であることが分かってきた。また、昨年度からセントラル部へのSMBIに加え、アンカー部への入射実験を行い、粒子供給時の反磁性量の低下を抑制に成功した。本報告では、新たに導入したアンカー部への入射に伴う、端損失粒子束の高速応答性とELM模擬実験の適用性の検討結果について述べる。

(2) 実験方法

GAMMA 10 には種々のガスパフ (GP) が設置されており、用途に応じて使い分けることができる。セントラル部中央付近に設置されている SMBI に加え、昨年度東アンカー部内側変換領域に SMBI を設置した (図 1 参照)。SMBI 用ラバールノズルの設計に関しては核融合科学研究所の協力を得た。セントラル部中央付近の SMBI と異なり、ポートの制約から高速カメラが設置できず、単視線の H_α 線強度検出器が設置されている。端損失粒子束は両エンド部に設置されている端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) を用いた。これは端損失イオンのエネルギー分析が可能な装置で有り、粒子束だけでなく閉じ込め電位の評価も可能である。今までエネルギー量・フラックス量のみ議論されていた ELM 模擬に対し、本手法ではエネルギー分布の制御性も検討する事も目標とする。

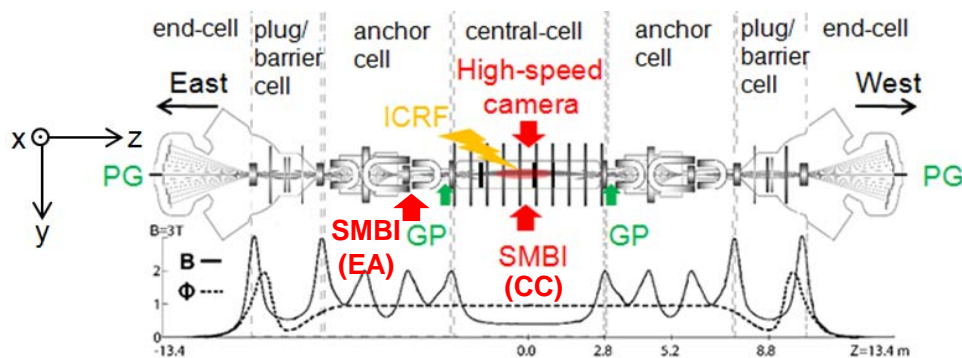


図 1 GAMMA 10 に設置されているガスパフおよび SMBI 装置。SMBI はセントラル部中央部(CC)および東アンカー部内側変換領域(EA)に設置されている。

(3) 実験結果

図 2 に RF 加熱プラズマにおける東アンカー SMBI を入射した放電の時間発展を示す。SMBI 入射のタイミングにおける加熱は RF のみで、SMBI パルス幅は 0.5 ms、プレナム圧は 1 MPa であった。

SMBI 入射により、線平均電子密度 \bar{n}_e で $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ から、 $1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ に増加した。東アンカー部の H_α 線強度は SMBI 入射に伴い増加しているが、セントラル部ではほとんど増えておらず、中性粒子密度のセントラル部への流入を防ぐことに成功した。一方で、セントラル部の蓄積エネルギーは低下しており、また SMBI 直後に低周波揺動も観測された。これは SMBI によりアンカー部蓄積エネルギーが低下し、不安定性が発生したためと考えられる。従ってアンカー部の安定性を確保した粒子補給法を探索する必要がある。

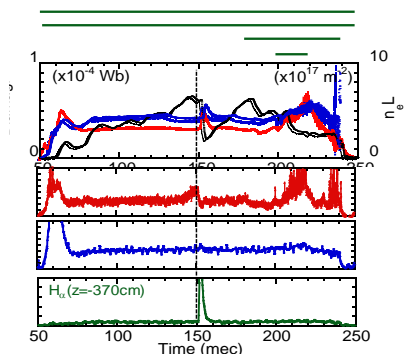


図 2 東アンカー部 SMBI 入射プラズマの放電波形。

端損失イオン束は端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) を用いて計測した。通常は 1 ms 程度の周期でバイアス電圧を掃引し端損失イオンのエネルギースペクトルを計測しているが、SMBI の速い時定数の現象を観測するためバイアス電圧を放電中固定し、条件固定の状態放電毎にスキャンすることでエネルギースペクトルの高時間分解計測を試みた。図 3 に SMBI 直前および直後 ($t = 146, 152$ ms) の東エンド部に損失した端損失イオン電流 I_{ELIEA} のエネルギースペクトルを示す。 I_{ELIEA} は単一マクスウェル分布を仮定すると、イオンリペラー電圧 (E_{IR}) に対して $I_{ELIEA} = \square_{i||} (1 - \exp(-(E_{IR} - e\square)/T_{i||}))$ に従う。そこでイオン束 $\square_{i||}$ 、閉じ込め電位 \square および磁力線方向のイオン温度 $T_{i||}$ をフリーパラメータとしてフィッティングした。その結果、SMBI 直前では $\square_{i||}$ 、 $T_{i||}$ はそれぞれ 5.2×10^{-4} A/m²、210 eV、SMBI 直後で 1.1×10^{-2} A/m²、170 eV となり、SMBI 後にイオン束の増加とイオン温度の低下が観測された。また両者の時刻でほぼ単一マクスウェル分布になっていることがわかった。

上記解析を SMBI 入射中に適用した結果を図 4 に示す。なお、解析時のフィッティングエラーを線の拡がりとして示す。イオン束 $\square_{i||}$ は SMBI 入射から 2 ms でピークを迎え、その後減少する。この時間発展はセントラル部・アンカー部の密度変化に類似している。イオン束の最大値は 2×10^{23} parts/m²s であり、高フラックスが発生していることがわかった。一方でイオン温度 $T_{i||}$ は 1 ms 程度で低下し、その後一定となった。イオン束・イオン温度から評価される熱フラックスは、SMBI 入射中は大きく変化しておらず、SMBI では粒子束の変化が顕著であることがわかった。SMBI を ELM 模擬に用いるためには熱フラックスの制御性も確保する必要があり、追加熱 (RF, ECH) とそれらの加熱シナリオの検討が必要である。

東アンカー部 SMBI 入射と反対側の端部 (西プラグ・バリアー部) に ECH による軸方向閉じ込め電位を生成して損失粒子を押し返し、端損失粒子束の能動制御を行うこととした。端損失粒子束のエネルギー分布は、東西エンド部に設置した端損失イオンエネルギー計測器 (ELIEA) を用いて測定し、SMBI による端損失粒子束及び熱流の変化について調べた。図 5 に SMBI のプレナム 2.0 MPa、入射時刻 150.0 ms、パルス幅 0.5 ms で入射したショットの反磁性量、電子線密度、および、SMBI 入射時刻近傍の時間帯 (140~170 ms) の H α 線放射

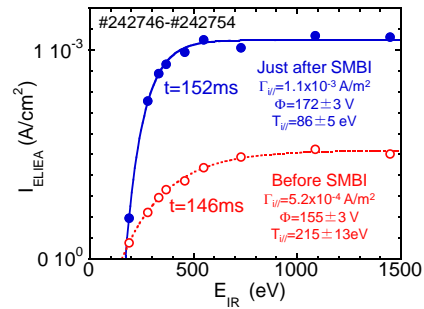


図 3 端損失イオン束のエネルギー分布

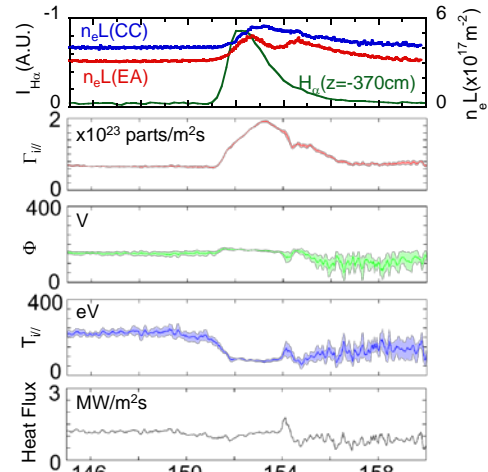


図 4 東アンカーSMBI 時のイオン束、閉じ込め電位、イオン温度および熱フラックスの時間発展。

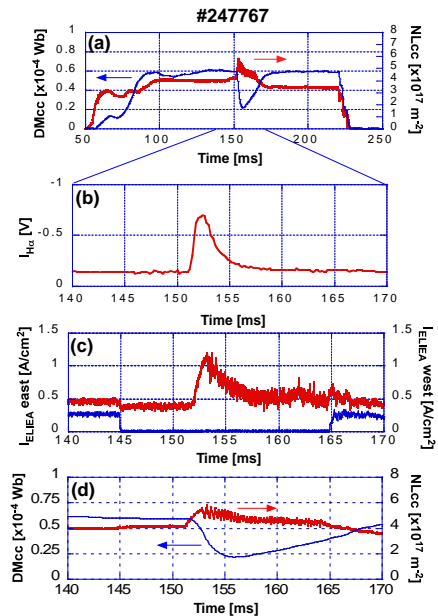


図 5 (a) 反磁性量、及び電子線密度の時間変化。(b) SMBI 入射前後の時間の H α 線強度、(c) 端損失イオン電流、(d) 反磁性量および電子線密度を示す。

輝度の時間変化、SMBI 入射側と反対側（閉じ込め電位生成側）の ELIEA 電流の時間変化、反磁性量と電子線密度の時間変化を示す。軸方向閉じ込め電位は、ECRH を $t = 145 \sim 165$ ms に印加して生成した。それにより、西エンド部への ELIEA 電流が減少していることがわかる。SMBI 入射により東側に ELIEA 電流の上昇が観測された。今後は、ELIEA による端損失粒子のエネルギー分布について閉じ込め電位生成の効果、および、C-ECH の効果について確認していくこととする。

【10】タンデムミラー端部における不純物ガス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 GAMMA 10/PDX 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。

（2）実験装置

図 1 に GAMMA 10/PDX 全体図及び、西エンド部真空容器と平成 24 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 (D-module) 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 ($Z_{EXIT} = 30$) にあるカロリー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。

D-module の概略図を図 1 (b) に示す。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 枚のタンゲ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ー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。また、水素ガスや希ガス導入による放射冷却や不純物輸送などのダイバータ模擬研究や PWI 研究が、高速イオンゲージ (ASDEX Gauge) や各種分光器、高速カメラ等により可能となっている。

（3）実験結果

3.1. 不純物ガス入射による非接触プラズマ特性評価

平成 26 年度から開始された不純物ガス導入によるプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差したダイバータ模擬実験の後、平成 29 年度からは、非接触プラズマに対する

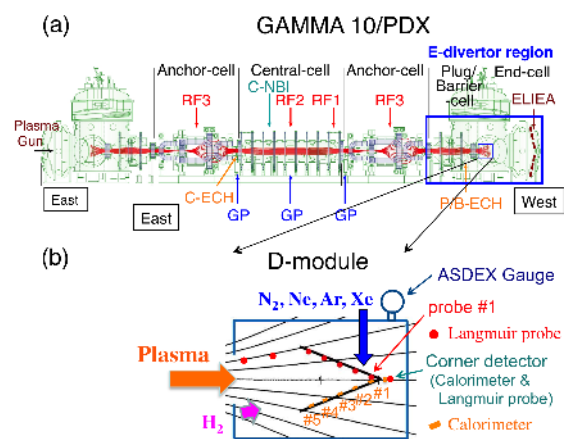


図 1 GAMMA 10/PDX 装置の概略図と西エンド部に設置した D-module

プラズマ追加熱系の影響評価を行ってきた。

図2は、ECHを用いた実験の概略図を示す。実験では、ICRF波動(RF1, RF2)を用いて生成したプラズマをD-moduleに導入し、 H_2 , Ar, Kr, Xeガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスのECH(東プラグECH, セントラルECH)による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

図3は、V字ターゲットコーナー部にて計測した熱流束をD-module内に導入したXeガスの量に対する依存性をプレナム圧を横軸にとって示している。図からECHを印加しない場合、Xeガスのプレナム圧の増加と共に熱流束は顕著に減少していることがわかる。一方、東pECHの短パルス(25ms)の印加により熱流束は大幅に増加するが、ガス導入量の増加に伴って減少することも判明した。コーナー部において測定されたイオン束は、Xeガスを導入しない場合、ECH時に2倍程度に増加するが、Xeガスを導入した場合には、印加前に非接触プラズマを形成していることを示す低イオン束が、ECHと共に10倍以上に著しく増加し、ターゲット近傍でのXeのイオン化が著しくエンハンスしていることが示唆され、非接触状態から接触化への遷移が認められた。また、ガス種間の比較では、 N_2 ガスが、ECHによる接触化への遷移に対する耐性が高いことも分かってきた。また、D-module上流部と下流部におけるプラズマパラメータの比較が、D-moduleプラズマ導入部に設置した可動プローブとV字ターゲット上およびコーナプローブを用いて行なわれ、下流側では、導入ガス圧の上昇とともに分子活性化再結合による密度低下が生じているが、上流側では密度、イオン束は上昇していることが判明した。以上から、D-moduleより上流側でのプラズマの挙動を調べる重要性が明らかとなった。

以上のように、様々な非接触プラズマに対する上流プラズマの変化に対する影響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。

3.2. ダイバータ模擬実験の為の高速イオンゲージの較正実験

D-moduleでは、ミラー閉じ込めの端損失プラズマを利用したダイバータ模擬実験が行われており、イオン温度数10eVで流入したプラズマを、ガス入射によって温度数eV程度の非接触領域にまで冷却している。本研究課題ではこれまで、磁場環境及びダイバータ模擬実験に適用可能である高速イオンゲージ(ASDEXゲージ)をD-moduleに設置して真空度測定を行い、入射する不純物ガスのガス種によってプラズマ冷却の効果に差異が見られること、複数のガス種が混合される条件では高速イオンゲージの感度が変化する場合があることなどを明らかにしてきた。本年度は混合ガス条件におけるゲージ感度変化について更に詳細を調べるとともに、GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験でのガス圧力挙動を調べた。とくに混合ガス条件では実際の核融合炉で想定される水素・ヘリウムの混合比率で計測を行った。

水素・アルゴンそれぞれのガスを単独で感度較正した後、混合ガスでの感度測定を行った。図4はアルゴン25%、水素75%の混合比におけるイオンゲージの混合ガスに対する感度較正の結果である。グラフ中の破線は単独ガスの感度値と分圧から算出した、混合による

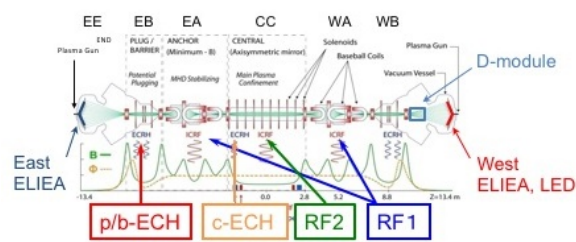


図2 ECHを用いた非接触プラズマに対する効果検証実験の概略図

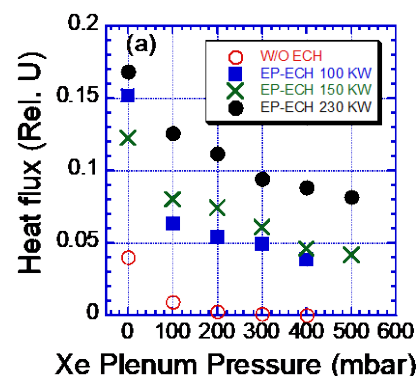


図3 V字ターゲットコーナー部熱流束のXeガス導入量に対する依存性

感度の変化を無視した場合の理論上の感度を示している。どの電子衝突エネルギーにおいても感度の実測値のグラフは理論値のものよりも傾きが小さくなっており、ガスの混合によって感度が低下したことがわかる。この感度変化の原因は準定常状態に励起されたアルゴン原子が水素と衝突し、アルゴン水素イオン(ArH^+)を生成したことによると考えられる。アルゴン水素イオンは2つの原子から構成されるため電荷:原子数の比が1:2であり、単独ガス条件で主に生じる H^+ や Ar^+ のような電荷:原子数の比が1:1の場合と比較するとイオンゲージで検出される電流値が実行的に小さくなるためである。感度の低下から、 ArH^+ 生成反応の反応断面積は水素の電子衝突電離断面積の50%程度であった見積もられる。

水素・ヘリウム混合ガスに対する感度較正では、ヘリウムの比率を実際の核融合炉で想定される値である数%から十数%に近くなるよう調整し、測定を行った。結果を図5に示す。過去の結果と同様に、水素・ヘリウム混合条件ではイオンゲージの感度は上昇しており、感度の実測値は理論値よりもおよそ13%程度増加していることがわかった。この上昇率は準定常状態のヘリウム原子による水素原子の電離(ペニング効果)を考慮した場合の感度上昇率(約15%)と近く、感度変化がペニング効果によるものであることを示唆している。

(4) まとめ

ダイバータ模擬実験装置 D-module を用いた本格的ダイバータ模擬実験において、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、今回不純物ガス導入による非接触プラズマ形成時のECHによるプラズマ加熱効果が及ぼす影響について詳細に検証された。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、非接触プラズマの特性とそ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。また、ダイバータ模擬実験で重要となる D-module 内のガス圧力を計測する高速イオンゲージの特性評価についても様々な実験条件に対応すべく較正実験を進めてゆく。

【11】 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ことや、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ことから、直線型装

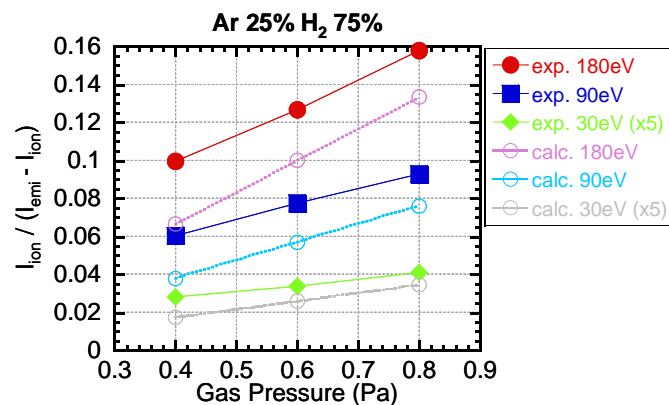


図4 水素25%, アルゴン75%の混合比における感度較正結果の実験値と、単独ガスから算出した感度の比較

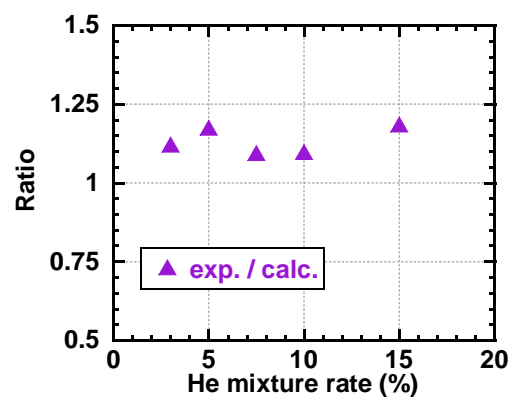


図5 水素・ヘリウム混合ガス条件における感度の変化率

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 LINDA (Linear Divertor Analysis with fluid code) 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、セントラル部、アンカー部、プラグ・バリア部とエンド部の 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部において生成され、ロスコーンに落ち込んだ荷電粒子がセントラル部から、各セルを経由してエンド部に流出する。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、プラズマ内不純物中性粒子のモデルとしてエンド部に一様な分布を与え、プラグバリアに向かって指数関数的に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

今回のシミュレーション解析では、Ar の密度は $6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ に固定され、水素の中性原子の密度を変化している。シミュレーション結果を図 2 及び図 3 に示す。図 2 は、電子とイオン温度の二次元分布をしており、ガス無し条件でのターゲット板近傍でのわずかな温度の低下が認められている。水素ガスが導入されると温度が更に低下することが判る。水素

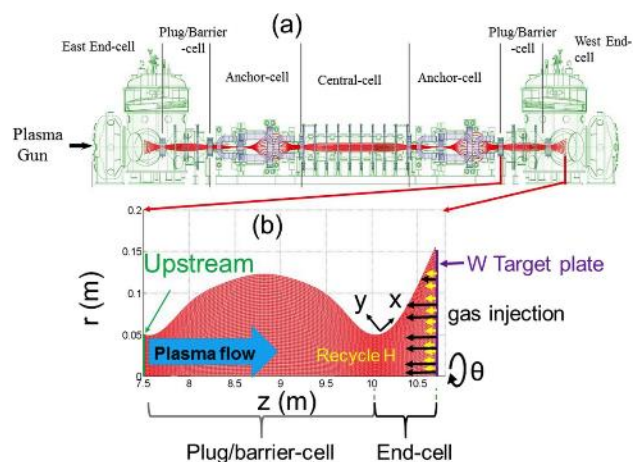


図 1 GAMMA 10/PDX エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a) GAMMA 10/PDX 全体の真空容器とプラズマ形状、(b) 西エンド部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状、各種境界条件

ガスの増加に伴いイオン温度が更に低下した。(図 2 (c)) 電子温度もまた図 2(c)の右側に示すように減少していることが判る。

ターゲット板の中心軸上の温度の依存性を図 3 に示す。図中の黒丸は水素ガスのみ入射であり、赤い四角は、Ar と水素の同時入射時の計算結果である。図 3 (a)に示すように電子温度は、中性水素密度の増加と共に 5eV 以下まで低下するが、初期の Ar 入射による冷却効果が大きく、水素密度の増加と共にその差が縮まってゆくことが判る。図 3 (b)に示すイオン温度は、中性水素密度の増加と共に減少するが、水素単独との差は小さいことが判る。一方、電子密度は中性水素密度の増加と共に増加してゆくが、Ar との同時入射の方が若干密度は高いが、 $2.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ のところで増加率が鈍り、水素単独よりも低くなり、電離効率が大きく減少し再結合が支配的な領域へ進み始めていることを示唆していると考えられる。

(4) まとめ

本研究で開発している多流体数値計算コード LINDA を用いて、GAMMA 10 エンド部におけるダイバータ模擬実験におけるプラズマ流の挙動を調べている。今回 Ar ガスと水素ガスの同時入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた特性の比較が可能となり、同時入射における冷却効果の違いがシミュレーションでも確認できた。今後は、分子に起因する再結合過程 (MAR) など、より詳細な原子分子過程等や、系内における中性粒子の輸送についても厳密に考慮した計算を進めてゆく。

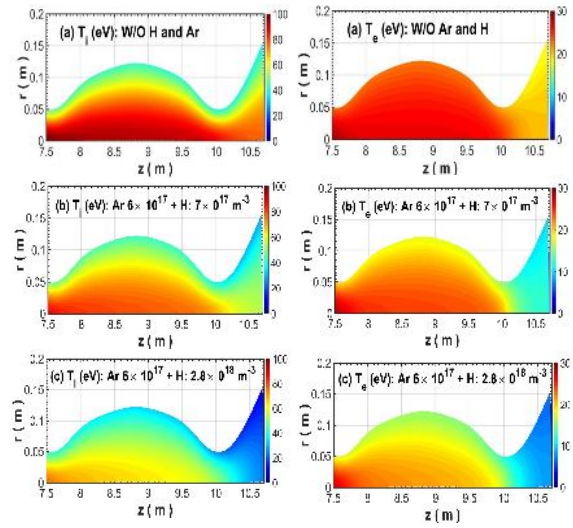


図 2 イオン温度 (左) と電子温度 (右) の二次元プロファイル (a) ガス無し、(b) 水素ガスとの同時入射 $H 7.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, (c) 水素ガスとの同時入射 $H 2.8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$.

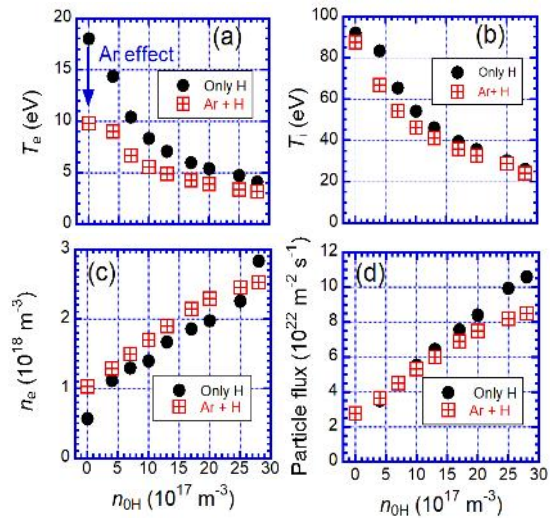


図 3 ターゲット板上 ($r=0 \text{ cm}$) のプラズマパラメータの中性密度依存性 (a) T_e , (b) T_i , (c) n_e , (d) Γ_i

<論文>

01. K. ICHIMURA, S. YAMASHITA, Y. NAKASHIMA, M. FUKUMOTO, M. SHOJI, M. SAKAMOTO, N. EZUMI, Md. M. ISLAM, Md. S. ISLAM, T. YOKODO, G. LEE, A. TERAKADO, K. NOJIRI, T. YOSHIMOTO, H. TAKENO, Gas Pressure Measurements in Pure and Mixed Gases at Around 1.0 Pa by Using ASDEX Type Fast Ionization Gauge, Plasma and Fusion Research 13, 2 (2018) 3405029.
02. T. YOKODO, Y. NAKASHIMA, A. HATAYAMA, T. IJIMA, Md. S. ISLAM, T. YOSHIMOTO, K. ICHIMURA, Md. M. ISLAM, G. LEE, S. YAMASHITA, A. TERAKADO, K. NOJIRI, M. YOSHIKAWA, J. KOHAGURA, N. EZUMI, M. SAKAMOTO, T. IMAI, Impact of the Upstream Plasma Parameters on Spectroscopic Measurement in the GAMMA 10/PDX Diveror Simulation Experiments, Plasma and Fusion Research 13, 2 (2018) 3402032.

03. Y. NONDA, H. YAMADA, Y. KITAHARA, K. ICHIMURA, S. NAKAMOTO, H. TAKENO, H. MATSUURA, Y. NAKASHIMA,
Measurement of Heat Quantity in a Small Cusp-Type Direct Energy Converter for Divertor Thermal Load Reduction,
Plasma and Fusion Research 13, 2 (2018) 3405050.
04. M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Chikatsu, Y. Shima, M. Sakamoto, Y. Nakashima, R. Minami, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba, T. Minami and N. Kenmochi,
Radial Profile Measurements of Electron Temperature and Density Using the Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 13, (2018) 3402051-1-5.
05. N. Ohno, M. Seki, H. Ohshima, H. Tanaka, S. Kajita, Y. Hayashi, H. Natsume, H. Takano, I. Saeki, M. Yoshikawa, H. van der Meiden,
Investigation of recombination front region in detached plasmas in a linear divertor plasma simulator,
Nuclear Materials and Energy 19, (2019) 458-462.
06. H. Tanaka, K. Takeyama, M. Yoshikawa, S. Kajita, N. Ohno and Y. Hayashi,
Localized spiraling plasma ejection contributing the ion-flux broadening in the detached linear plasma,
Plasma Phys. Control. Fusion 60, (2018) 075013-1-11.
07. A. Mase, Y. Kogi, D. Kuwahara, Y. Nagayama, N. Ito, T. Maruyama, H. Ikezi, X. Wang, M. Inutake, T. Tokuzawa, J. Kohagura, M. Yoshikawa, S. Shinohara, A. Suzuki, F. Sakai, M. Yamashita, B. J. Tobias, C. Muscatello, X. Ren, M. Chen, C. W. Domier, N. C. Luhmann Jr.,
Development and application of radar reflectometer using micro to infrared waves,
Advances in Physics: X 3, 1 (2018) 1472529-634-676.
08. Md. S. ISLAM, Y. NAKASHIMA, A. HATAYAMA, K. ICHIMURA, T. IJIMA, Md. M. ISLAM, T. YOKODO, G. LEE, T. YOSHIMOTO, S. YAMASHITA, N. EZUMI, M. SAKAMOTO,
Investigation of E-Divertor Plasma during Simultaneous Injection of Hydrogen and Impurity Gases into GAMMA 10/PDX by Using the LINDA Code,
Plasma and Fusion Research 13, 2 (2018) 3403080.
09. M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Chikatsu, Y. Shima, M. Sakamoto, Y. Nakashima, N. Ezumi, R. Minami, R. Yasuhara, I. Yamada, H. Funaba, T. Minami, and N. Kenmochi,
Development of a laser amplification system for the multi-pass Thomson scattering system for GAMMA 10/PDX,
Review of Scientific Instruments 89, (2018) 10C102-1-4.
10. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, T. Mikami, S. Togo, T. Iijima, T. Yokodo, K. Sawada, S. Kado, Y. Nakashima,
Hydrogen Recycling Study with a High Temperature Target in the Divertor Simulation Experiment in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 13, (2018) 3402096.
11. H. Tanaka, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, T. Mikami, Y. Kinoshita, K. Kobayashi, M. Yoshikawa, J. Kohagura, and N. Ohno,
Blob- and hole-like structures outstanding during the transition from attached to detached divertor states in GAMMA 10/PDX,
Physics of Plasmas 25, (2018) 082505-1-6.
12. T. KARIYA, R. MINAMI, T. IMAI, T. NUMAKURA, M. OKADA, Y. ENDO, Y. NAKASHIMA, H. IDEI, T. ONCHI, K. HANADA, T. SHIMOZUMA, Y. YOSHIMURA, H. TAKAHASHI, H. IGAMI, T. TSUJIMURA, S. ITO, S. KOBAYASHI, S. KUBO, K. SAKAMOTO, Y. ODA, R. IKEDA, K. KAJIWARA, K. TAKAHASHI, T. KOBAYASHI, S. MORIYAMA, M. ONO, K. NAGASAKI, T. EGUCHI, Y. KAWAKAMI, Y. MITSUNAKA,
Development of High Power Gyrotrons for Advanced Fusion Devices and DEMO,
The 27th IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE (FEC-2018) , (2018) FIP P1-56.
13. H. IDEI, T. ONCHI, M. HASEGAWA, K. NAKAMURA, R. IKEZOE, O. WATANABE, K. KURODA, K. HANADA, Y. NAGASHIMA, A. HIGASHIJIMA, T. NAGATA, S. SHIMABUKURO, T. KARIYA, T. IMAI, T. I. TSUJIMURA, S. KUBO, S. KOBAYASHI, M. FUKUYAMA, M. YUNOKI, S. KOJIMA, R. YONEDA, A. EJIRI, N. MATSUMOTO,

- Y. TAKASE, A. FUKUYAMA, S. MURAKAMI, K. MISHRA, G. TAYLOR, N. BERTELLI, M. ONO,
FULLY NON-INDUCTIVE 2ND HARMONIC ELECTRON CYCLOTRON CURRENT RAMP-UP WITH POLARIZED FOCUSING-BEAM IN THE QUEST SPHERICAL TOKAMAK,
The 27th IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE (FEC-2018) , (2018) EX/P3-21.
14. Md. Shahinul ISLAM, Y. Nakashima, R. Tatsumi, A. Hatayama, M. M. Islam and T. Iijima,
Numerical simulation study towards plasma detachment in the end cell of GAMMA 10/PDX by
a coupled fluid-neutral code,
Contributions to Plasma Physics 58, 6-7 (2018) 805-811.
 15. T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki,
J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group,
Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence
Measurements,
Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves
(IRMMW-THz 2018) , (2018) Th-P2-R2-1.
 16. K. ICHIMURA, Y. KITAHARA, Y. NONDA, S. NAKAMOTO, H. TAKENO, H. MATSUURA
Y. NAKASHIMA Yousuke,
Development of calorimeter system for conceptual study of CuspDEC divertor,
Fusion Engineering and Design 136, (2018) 381-385.
 17. M.S. Islam, Y. Nakashima, S. Takechi, R. Tatsumi, A. Hatayama, T. Iijima, S. Yamashita,
T. Yoshimoto, T. Hara, N. ezumi, M. Sakamoto,
Effects of the gas puffing neutral on the plasma parameters in the end-cell of GAMMA 10/PDX
by using the multi-fluid code “LINDA”,
Nuclear Materials and Energy 18, (2019) 182-187.
 18. H. Natsume, H. Tanaka, S. Kajita, M. Yoshikawa, M. Seki, H. Ohsima, and N. Ohno,
Multipoint measurements employing a microwave interferometer and a Langmuir probe in the
detached linear plasma,
AIP Advances 9, (2019) 015016-1-6.
 19. Y. Nakashima, M.S. Islam, T. Iijima, M. Sakamoto, N. Ezumi, M. Yoshikawa, N. Asakuraa,
M. Fukumotoa, A. Hatayamab, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, M.M. Islam,
T. Kariya, J. Kohagura, S. Masuzakic, R. Minami, T. Nakanoa, K. Nojiri, T. Numakura,
K. Sawada, M. Shoji, A. Terakado, S. Togo, S. Yamashita, T. Yoshimoto,
Impact of additional plasma heating on detached plasma formation in divertor simulation
experiments using the GAMMA 10/PDX tandem mirror,
Nuclear Materials and Energy 18, (2019) 216-221.
 20. Y. Kubota, M. Hirata, S. Jang, M. Ichimura, R. Ikezoe, M. Sakamoto, S. Sumida, A. Tanaka,
K. Izumi, R. Sekine, H. Kayano, Y. Nakashima, A. Fukuyama,
Investigation of ICRF Heating Efficiency in Plug/Barrier Cell on GAMMA 10/PDX with a Full-
Wave Code,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2401012.
 21. M. Yoshikawa, T. Mouri, J. Kohagura, Y. Shima, T. Yamasaki, S. Suto, H. Nakanishi,
M. Sakamoto, Y. Nakashima, R. Minami, N. Ezumi, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Funaba,
T. Minami and N. Kenmochi,
YAG-Thomson Scattering System in GAMMA 10/PDX Central and End Cells,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402002-1-6.
 22. R. Ikezoe, Y. Kubota, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka,
R. Sekine, H. Kayano, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Nakashima,
A. Fukuyama,
A Full Wave Simulation on the Density Dependence of a Slow Wave Excitation in the GAMMA
10/PDX Central Cell with TASK/WF3D,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402003-1-5.
 23. R. Sekine, R. Ikezoe, S. Jang, M. Hirata, M. Ichimura, M. Sakamoto, S. Sumida, K. Izumi,
A. Tanaka, Y. Kubota, H. Kayano, Y. Nakashima,
Observation of Density Fluctuations Originated from RF Waves with Two-Channel
Reflectometer in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402011.
 24. H. Tanaka, M. Sakamoto, N. Ezumi, A. Terakado, K. Nojiri, T. Mikami, Y. Kinoshita, K. Kobayashi,

- M. Yoshikawa, J. Kohagura, N. Ohno,
Spatiotemporal Structure of H α Emission from the Detached Plasma in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402036(5 pp).
25. S. TOGO, T. TAKIZUKA, M. SAKAMOTO, N. EZUMI, Y. OGAWA, K. IBANO, K. NOJIRI,
T. IJIMA, Y. KINOSHITA, T. HARA, Y. NAKASHIMA,
Spontaneous Ion Temperature Gradient in Inhomogeneous Magnetic Fields and Its Effect on the
Parallel Heat Transport,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2403010.
 26. H. TAKENO, K. ICHIMURA, S. NAKAMOTO, Y. NAKASHIMA, H. MATSUURA,
J. MIYAZAWA, T. GOTO, Y. FURUYAMA, A. TANIKE,
Recent Advancement of Research on Plasma Direct Energy Conversion,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2405013.
 27. A. Tanaka, M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, Y. Kubota,
R. Sekine, H. Kayano, M. Sakamoto, Y. Nakashima,
Observation of Potential Increase in the Central Cell due to ICRF Heating in the Non-
Axisymmetric Anchor Cell on GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2401028.
 28. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, H. Matsuura, K. Ichimura, T. Iijima, T. Yokodo,
K. Nojiri, A. Terakado, M. M. Islam, T. Yoshimoto, S. Yamashita, T. Hara, M. Yoshikawa,
N. Ezumi and M. Sakamoto,
Measurements of the Plasma Parameters in the D-Module of GAMMA 10/PDX during Impurity
Gas Kr Injection,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402016-1-4.
 29. S. Jang, M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Sakamoto, S. Sumida, K. Izumi, A. Tanaka,
Y. Kubota, R. Sekine, H. Kayano, Y. Nakashima,
Effect of the Potential of Confined Plasma on End-Loss Ion in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402032.
 30. K. Izumi, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, M. Sakamoto, S. Sumida, S. Jang, A. Tanaka,
Y. Kubota, R. Sekine, H. Kayano, Y. Nakashima,
Measurement of End-Loss Ions Originated from Spontaneously Excited High Frequency Waves
by Using an MCP Detector on GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402033.
 31. R. MINAMI, T. KARIYA, T. IMAI, T. NUMAKURA, M. OKADA, T. HOJO,
F. MOTOYOSHI, T. YABUSA, N. HIMENO, Y. ENDO, Y. NAKASHIMA,
Generation and Measurement of High Intermittent Heat Flux in GAMMA 10/PDX,
Plasma and Fusion Res. 14, (2019) 2402034.
 32. M. M. Islam, S. Kobayashi, N. Nishino, M. S. Islam, T. Iijima, M. Yoshikawa, J. Kohagura,
M. Shoji, and Y. Nakashima,
Sensitivity Check of Background Plasma Parameter during SMBI in the GAMMA 10 Central-
Cell by 3-D Monte-Carlo Simulations,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2403017-1-4.
 33. K. ICHIMURA, S. YAMASHITA, Y. NAKASHIMA, M. FUKUMOTO, M. SHOJI,
M. SAKAMOTO, N. EZUMI, Md. S. ISLAM, A. TERAKADO, K. NOJIRI, T. YOSHIMOTO,
T. HARA, H. TAKENO,
Analysis on the Sensitivity of the ASDEX Type Ionization Gauge in Mixed Radiator Gases of
Divertor Simulators,
Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2405029.
 34. M. OKADA, T. KARIYA, T. IMAI, R. MINAMI, T. NUMAKURA, Y. EBASHI,
F. MOTOYOSHI, Y. NAKASHIMA,
Performance Test of Double-Disk Type Output Window of 28/35 GHz Dual-Frequency
Gyrotron for CW Operation,
Plasma and Fusion Res. 14, (2019) 2405043.
 35. M. Matsukura, K. Shimamura, M. Suzuki, S. Mizojiri, S. Yokota, R. Minami, T. Kariya,
T. Imai,
Instantaneous measurement of high-power millimeter-wave beam for 28 GHz gyrotron,
Rev. Sci. Instrum 90, (2019) 024703.
 36. H. Idei, T. Onchi, T. Kariya, T. Tsujimura, S. Kubo, S. Kobayashi, M. Sakaguchi, T. Imai,

- M. Hasegawa, K. Nakamura, K. Mishra, M. Fukuyama, M. Yunoki, S. Kojima, O. Watanabe, K. Kuroda, K. Hanada, Y. Nagashima, A. Ejiri, N. Matsumoto, M. Ono, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukoro, Y. Takase, A. Fukuyama, S. Murakami, 28-GHz ECHCD system with beam focusing launcher on the QUEST spherical tokamak, Fusion Engineering and Design, (2019), doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.027.
37. S. Sumida, K. Shinohara, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto, M. Hirata, S. Ide, Characteristics of fast 3He ion velocity distribution exciting ion cyclotron emission on JT-60U, Plasma Physics and Controlled Fusion 61, 2 (2019) 025014.
38. S. Togo, T. Takizuka, D. Reiser, M. Sakamoto, Y. Ogawa, N. Ezumi, K. Ibano, K. Nojiri, Y. Li, Y. Nakashima, Characteristics of plasma flow profiles in a super-X-divertor-like configuration, Nuclear Materials and Energy 19, (2019) 149–154.
39. H. Matsuura, M. Ochuchi, M.S. Islam, T. Iijima, T. Minami, Y. Nakashima, Comparison of two invers heat conduction models for heat flux measurement in the GAMMA 10/PDX, IEEE Transactions on Plasma Science, (2019), doi.org/10.1109/TPS.2019.2901496.
40. M. Hirata, J. Itagaki, R. Ikezoe, M. Ichimura, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, H. Kayano, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Investigation of ICRF Heating Effect in Anchor Region on GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2402055.
41. S. TAKECHI, R. TATSUMI, Md. S. ISLAM, K. HOSHINO, A. HATAYAMA, Y. NAKASHIMA, Analysis of Ar Impurity Transport in the Large Tandem Mirror Device GAMMA 10/PDX Plasmas, Plasma and Fusion Research 14, (2019) 2403045.
42. T. NUMAKURA, T. KARIYA, R. MINAMI, M. OKADA, T. HOJO, F. MOTOYOSHI, T. IMAI, Code Development for Calculating Electron Beams in the Cavities of the Future High-Power Gyrotrons, Plasma and Fusion Res. 14, (2019) 2405052.

<学位論文>

学位論文（博士）[数理物質科学研究科]

01. 寺門明紘 [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of Hydrogen Recycling and Plasma Detachment by Utilizing End-loss Plasma of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror
02. 野尻訓平 [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Neutral particle effect on plasma detachment and characterization of ion behavior in the end region of GAMMA 10/PDX
03. 隅田脩平 [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study on Ion Cyclotron Emission Driven by Fusion Product in Tokamak Plasma

学位論文（修士）[数理物質科学研究科]

04. 泉昂希 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX における自発 ICRF 波動励起時のイオンの磁力線方向輸送
05. 岡田麻希 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
28/35 GHz 2 周波数ジャイロトロン及び RF 伝送系の性能評価試験とプラズマ電子加熱実験
06. 鈴木佑 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
分光エリプソメトリーによるプラズマ照射中のタングステン表面改質層のその場測定
07. 田中温人 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX アンカー部における ICRF 波動印加時のセントラル部電位変化の研究
08. 三上智弘 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX におけるヘリウム線強度比法を用いた電子温度と電子密度評価
09. 山崎幸弥 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]

- GAMMA 10/PDXにおける多チャンネルH α 線計測器を用いた揺動の2次元解析
10. 山下双太郎 [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AIGの感度特性評価及びプラズマ流入時のガス挙動に関する研究
 11. 吉本翼 [修士 (理学), 数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDXにおける多点分光計測に基づく不純物挙動に関する研究
 12. 小林楓 [修士 (工学), 数理物質科学研究科電子・物理工学専攻]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおけるイオン及び中性粒子速度分布計測のためのレーザー誘起蛍光観測システムの構築
 13. 木下洋輔 [修士 (工学), 数理物質科学研究科電子・物理工学専攻]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおけるイオンセンシティブプローブ計測

学位論文 (学士) [理工学群]

14. 栢野大樹 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX セントラル部に印加した高周波の差周波解析
15. 加藤稜大 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX エンド部トムソン散乱計測システムのガス散乱校正実験
16. 佐藤昊 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
高速カメラを用いた超音速分子ビーム入射時のプラズマ計測
17. 佐野滉貴 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
SMBI 実験時の多チャンネルH α 線計測器を用いたH α 線放射の径方向分布計測
18. 竹田將生 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
低エネルギー高粒子束プラズマ照射によるタングステン中の水素と重水素の同位体交換
19. 辻杏樹 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
タングステン中の水素の拡散と捕獲に関するシミュレーション解析
20. 永須和馬 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
SMBI 実験時の多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度分布計測
21. 姫野奈緒 [学士 (理学), 理工学群物理学類]
プラズマ加熱用28/35GHz 2周波数ジャイロトロン伝送系の特性評価
22. 松岡雄大 [学士 (工学), 理工学群物理学類]
流体シミュレーションコードを用いたGAMMA10/PDX エンド部における冷却ガス導入時のプラズマ挙動研究

<講演>

01. 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 沼倉友晴, 岡田麻希, 本吉郁哉, 北條俊孝, 小田靖久, 池田亮介, 高橋幸司, 森山伸一, 坂本慶司, 下妻隆, 久保伸, 出射浩, 花田和明,
EC加熱電流駆動用ジャイロトロンの開発,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
S2-4.
02. 田中宏彦, 坂本瑞樹, 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 三上智弘, 木下洋輔, 小林楓,
吉川正志, 小波蔵純子, 大野哲靖,
GAMMA 10/PDX接触・非接触状態遷移放電における多地点揺動解析,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-58.
03. 原利樹, 飯島貴朗, 野尻訓平, 木下洋輔, 江角直道, Md. S. Islam, 寺門明紘,
横土敬幸, 山下双太郎, 吉本翼, 小波蔵純子, 吉川正志, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験モジュールにおける上流・下流プラズマの静電プローブ計測,

- 第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-59.
04. 木下洋輔, 江角直道, 飯島貴明, 野尻訓平, 寺門明紘, 三上智弘, 小林楓, 坂本瑞樹, 東郷訓, 中嶋洋輔, 吉川正志, 小波蔵純子, 田中宏彦, 増崎貴,
イオンセンシティブを用いたGAMMA 10/PDXにおける非接触化プラズマのイオン温度空間分布計測,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-60.
05. Md. Shahinul Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, T. Iijima, M. M. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, S. Togo, N. Ezumi and M. Sakamoto,
Study of energy loss processes in the case of neutral gases injection into the End-cell of GAMMA 10/PDX by using the LINDA code,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-61.
06. 野尻訓平, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 飯島貴朗, 東郷訓, 木下洋輔, 三上智弘, 吉本翼, 山下双太郎, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXにおける非接触プラズマ形成への中性ガス供給および排気の影響,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-62.
07. 寺門明紘, 坂本瑞樹, 江角直道, 野尻訓平, 三上智弘, 木下洋輔, 東郷訓, 飯島貴朗, 澤田圭司, 門信一郎, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬プラズマにおける分子活性化再結合の反応過程,
第12回核融合エネルギー連合研究会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
28P-63.
08. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 東郷訓, 飯島貴朗, 吉本翼, 南龍太郎, 仲野友英, 門信一郎, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXにおける電子サイクロトロン加熱時のヘリウム原子線強度比法を用いた電子温度計測,
第12回核融合エネルギー連合講演会, (ピアザ淡海, 滋賀県, 2018. 6. 28-2018. 6. 29)
29P-63.
09. 坂本瑞樹,
GAMMA10/PDXにおける高温ターゲット実験 -QUEST実験への期待,
QUEST研究会, (九州大学, 2018. 7. 20) .
10. 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 江橋優斗, 梶野悟史, 下妻隆, 久保伸, 吉村泰夫, 高橋裕巳, 伊神弘恵, 出射浩, 花田和明, 長崎百伸, 斉藤輝雄, 立松芳典, 山口裕資,
電子サイクロトロン高密度プラズマ加熱連携研究における2周波数(28/35GHz, 14/21GHz)ジャイロトロンの開発とECH実験への適用,
プラズマ研究センターシンポジウム, ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGフォローアップ会合, (つくばイノベーションプラザ, 2018. 8. 2-2018. 8. 3) .
11. 江尻晶, 平田真史, 神尾修治, 福山淳, 佐藤暁斗, 市村真, 池添竜也, 小波蔵純子, 吉川正志,
高速発光測定によるICRF波動計測の開発,
プラズマ研究センターシンポジウム, ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価WGフォローアップ会合, (つくばイノベーションプラザ, 2018. 8. 2-2018. 8. 3) .
12. 東郷訓,
磁場強度分布と粒子ソース分布が開放磁場プラズマの流速分布に与える影響,
平成30年度核融合科学研究所理論共同研究「周辺プラズマモデリングの高度化とコードカップリングに関する検討」研究作業会, (核融合科学研究所, 2018. 8. 7-2018. 8. 8) .

13. Md. Shahinul Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama,
Present status of numerical simulation study in GAMMA 10/PDX by using the
LINDA code,
平成30年度核融合科学研究所理論共同研究「周辺プラズマモデリングの高度化とコー
ドカップリングに関する検討」研究作業会, (核融合科学研究所, 2018. 8. 7-
2018. 8. 8) .
14. 山下双太郎,
混合ガス測定時のASDEXゲージによる圧力測定,
平成30年度第1回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新展開」研究会,
(核融合科学研究所, 2018. 8. 8-2018. 8. 9) .
15. 江角直道,
GAMMA10/PDX非接触プラズマ形成における水素-窒素重畳入射の効果,
平成30年度第1回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新展開」研究会,
(核融合科学研究所, 2018. 8. 8-2018. 8. 9) #1.
16. 飯島貴朗, 中嶋洋輔,
Characteristics of up/downstream on detached plasma in D-module of GAMMA
10/PDX,
核融合科学研究所共同研究 (研究会) 「ダイバータの学理と応用」, (核融合科学研
究所, 2018. 11. 30) .
17. 嶋村耕平, 松倉真帆, 尾崎尚人, 溝尻征, 宮脇海成, 南龍太郎, 假家強,
ジャイロトロンによる大電力大気圧放電とマイクロ波放射計測,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 3Bp02.
18. 関根諒, 池添竜也, ジャン ソウオン, 市村真, 平田真史, 坂本瑞樹, 隅田脩平,
泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 栢野大樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXにおける2チャンネルマイクロ波反射計を用いた高周波波動に起因する
密度揺動計測,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 3P63.
19. 柚木美羽, 福山雅治, 中村一男, 恩地拓己, 池添竜也, 吉川正志, 出射浩,
QUESTにおける75GHz準光学干渉計システムの開発,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 3P80.
20. 山下双太郎, 市村和也, 中嶋洋輔, 福本正勝, 飯島貴朗, MS. Islam, 野尻訓平,
寺門明紘, 吉本翼, 原利樹, 佐藤昊, 松岡雄大,
単一ガス及び混合ガス導入環境下におけるASDEXゲージの感度特性評価,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 4Pa20.
21. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 飯島貴朗, 東郷訓,
南龍太郎, 吉川正志, 小波蔵純子, 仲野友英, 門信一郎, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXのセントラル部における電子サイクロトロン加熱時のヘリウム原子線強
度比法を用いた電子温度・電子密度計測,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 4Pa31.
22. 小林楓, 木下洋輔, 野尻訓平, 寺門明紘, 安藤泰斗, 原利樹, 東郷訓, 江角直道,
坂本瑞樹, Islam Shahinul 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔, 澤田圭司, 桑原大介,
篠原俊二郎, 増崎貴,
レーザー誘起蛍光法を用いたGAMMA10/PDXダイバータ模擬プラズマイオン・中性粒子
速度分布計測システム改良,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 4Pa33.

23. 木下洋輔, 江角直道, 飯島貴朗, 野尻訓平, 寺門明紘, 原利樹, 三上智弘, 小林楓, 安藤泰斗, 坂本瑞樹, 東郷訓, 中嶋洋輔, 吉川正志, 小波蔵純子, 田中宏彦, 増崎貴, GAMMA 10/PDXダイバータ模擬プラズマにおける水素ガス入射によるイオン温度への影響, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pa68.
24. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, T. Iijima, S. Yamashita, T. Yoshimoto, T. Hara, Y. Matsuoka, Kou Sato, N. Ezumi, and M. Sakamoto, A fluid simulation approach to study the plasma detachment in GAMMA 10/PDX, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pa69.
25. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添竜也, 市村真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介, JT-60Uにおけるイオンサイクロトロン放射を駆動する高速 ^3He イオンの速度分布, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp39.
26. 久保田裕士, 平田真史, ジャン ソウオン, 市村真, 池添竜也, 隅田脩平, 泉昂希, 田中温人, 関根諒, 栢野大樹, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔, 福山淳, GAMMA 10/PDXプラグバリア部におけるICRF加熱効果の周波数依存性, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp40.
27. 武智さゆり, 巽瞭子, シャヒヌル・イスラム, 星野一生, 畑山明聖, 中嶋洋輔, 直線型核融合装置GAMMA 10/PDXにおけるAr不純物輸送解析, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp42.
28. 坪谷友香, 巽瞭子, 星野一生, 畑山明聖, Shahinul Islam, 中嶋洋輔, 非接触ダイバータプラズマにおける分子活性化再結合の解析, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp44.
29. 山崎幸弥, 吉川正志, 小波蔵純子, 嶋頼子, 中西博之, 須藤駿, 毛利友弥, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔, GAMMA 10/PDXにおける多チャンネル $\text{H}\alpha$ 線検出器を用いた2次元 $\text{H}\alpha$ 線計測, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp51.
30. 今野直斗, 坂本瑞樹, 寺門明紘, 野尻訓平, 東郷訓, 北條俊孝, 沼倉友晴, 小波蔵純子, 南龍太郎, 假家強, 吉川正志, 中嶋洋輔, GAMMA 10におけるECH印加時の金中性粒子ビームプローブを用いた電位の2点同時計測, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp54.
31. 鈴木佑, 坂本瑞樹, 江角直道, 竹田將生, 辻杏樹, 寺門明紘, 野尻訓平, 東郷訓, 山田洋一, 坂本隆一, プラズマ照射によるタングステン表面変化の分光エリプソメトリー測定, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 4Pp79.
32. 吉川正志, 小波蔵純子, 嶋頼子, 中西博之, 毛利友弥, 山崎幸弥, 須藤駿, 坂本瑞樹, 南龍太郎, 江角直道, 中嶋洋輔, 安原亮, 山田一博, 舟場久芳, 南貴司, 釧持尚輝, タンデムミラーGAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測の進展, 第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018.12.3-2018.12.6) 5Da06.
33. 田中宏彦, 梶田信, 大嶋啓嗣, 関真倫, 夏目祥揮, 吉川正志, 竹山紘平, 大野哲靖, 非接触プラズマ分布広域化をもたらす渦状プラズマ放出現象,

- 第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5Dp05.
34. 江角直道，坂本瑞樹，飯島貴朗，イスラム シャヒヌル，寺門明紘，野尻訓平，朝倉伸幸，市村和也，大野哲靖，田中宏彦，門信一郎，坂本隆一，澤田圭司，畑山明聖，福本正勝，松浦寛人，池添竜也，假家強，小波蔵純子，沼倉友晴，平田真史，南龍太郎，吉川正志，東郷訓，中嶋洋輔，今井剛，市村真，GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験における非接触プラズマ研究の進展，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5Dp06.
35. 八房拓也，南龍太郎，假家強，沼倉友晴，岡田麻希，北條俊孝，本吉郁哉，今井剛，中嶋洋輔，GAMMA 10/PDXセントラル部におけるECHアンテナ系の改良設計，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5P53.
36. 夏目祥揮，田中宏彦，梶田信，関真倫，大嶋啓嗣，吉川正志，大野哲靖，秋山毅志，再結合フロント近傍における複数地点同時揺動計測と相関解析，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5P66.
37. 小波蔵純子，徳沢季彦，吉川正志，嶋頼子，野尻訓平，寺門明紘，今野直斗，江角直道，坂本瑞樹，中嶋洋輔，GAMMA 10/PDXにおける密度揺動の回転計測と多点同時計測用ドップラー反射計の開発，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5P70.
38. 橋口和也，芝田和浩，市村和也，中本 聡，竹野裕正，中嶋洋輔，進行波型直接エネルギー変換模擬実験装置におけるイオンビームの輸送に関する研究，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5P89.
39. 桑原大介，伊藤直樹，土屋隼人，徳沢季彦，吉永智一，長山好夫，山口聡一郎，近木祐一郎，間瀬淳，小波蔵純子，吉川正志，大島慎介，長崎百伸，広周波数帯域に対応したマイクロ波イメージング用ローカル内蔵型アンテナアレイの開発，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）5P94.
40. 假家強，南龍太郎，沼倉友晴，岡田麻希，本吉郁哉，北條俊孝，八房拓也，出射浩，恩地拓己，花田和明，下妻隆，久保伸，小田靖久，池田亮介，坂本慶司，長崎百伸，小野雅之，小紫公也，嶋村耕平，満仲儀加，江口濯，今井剛，ミリ波ジャイロトロン開発と応用，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）S6-3.
41. 間瀬淳，近木祐一郎，桑原大介，長山好夫，土屋隼人，徳沢季彦，小波蔵純子，吉川正志，伊藤直樹，王 小龍，J-H. Yu, Y-T. Chang, Y. Yu, Y. Zhu, K-Y. Lin, C. Chang, S. Chang, B. J. Tobias, C. Muscatello, C. W. Domier, N. C. Luhmann, Jr., プラズマのマイクロ波イメージングの現状，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）S6-7.
42. ジャンソウォン，市村真，平田真史，池添竜也，坂本瑞樹，隅田脩平，泉昂希，田中温人，久保田裕士，関根諒，栢野大樹，中嶋洋輔，ミラープラズマの端損失イオン束に影響するプラズマパラメータに関する研究，第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）6P40.

43. 田中温人, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 隅田脩平, ジャン ソウオン, 泉昂希, 久保田裕士, 関根諒, 栢野大樹, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXアンカー部における高周波印加時のプラズマ周辺部浮遊電位への影響,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P42.
44. 泉昂希, 池添竜也, ジャンソウオン, 関根諒, 市村真, 平田真史, 坂本瑞樹,
隅田脩平, 田中温人, 久保田裕士, 栢野大樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXにおける自発励起AIC波動に起因する端損失高エネルギーイオンの測定,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P43.
45. 池添竜也, ジャンソウオン, 泉昂希, 市村真, 平田真史, 恩地拓己,
高温ミラープラズマ中の高エネルギーイオン輸送に含まれる統計情報の抽出,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P44.
46. 飯島貴朗, 原利樹, 吉本翼, 野尻訓平, 寺門明紘, 木下洋輔, M. S. Islam, 山下双太郎
江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXにおける不純物入射により生成した非接触プラズマのMachプローブ計測
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P46.
47. 安藤泰斗, 木下洋輔, 向井清史, 江角直道, 坂本瑞樹, 東郷訓, 野尻訓平, 寺門明紘,
三上智弘, 小林楓, 飯島貴朗, 吉本翼, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔,
GAMMA10/PDXダイバータ模擬プラズマ上流部におけるイメージングボロメータ計測シ
ステムの開発,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P47.
48. 原利樹, 飯島貴朗, 吉本翼, 江角直道, 野尻訓平, 木下洋輔, M. S. Islam,
山下双太郎, 寺門明紘, 松岡雄大, 佐藤昊, 小波蔵純子, 吉川正志, 坂本瑞樹,
中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験モジュールにおける非接触プラズマの空間構造のガ
ス種依存性評価,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P51.
49. 吉本翼, 中嶋洋輔, 飯島貴朗, 原利樹, 山下双太郎, 寺門明紘, 野尻訓平, 三上智弘,
木下洋輔, MS. Islam, 佐藤昊, 松岡雄大, 吉川正志, 小波蔵純子, 江角直道,
坂本瑞樹,
GAMMA 10/PDXにおける非接触プラズマ形成実験時の多点同時分光計測,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P52.
50. 岡田麻希, 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 本吉郁哉, 姫野奈緒, 中嶋洋輔,
28/35 GHz 2周波数ジャイロトロンの性能評価試験とプラズマ加熱に向けたRF伝送試
験,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P68.
51. 沼倉友晴, 假家強, 南龍太郎, 岡田麻希, 北條俊孝, 本吉郁哉, 八房拓也, 今井剛,
中嶋洋輔,
ガンマ10/PDXのECH実験と高出力ジャイロトロンの計算コード開発,
第35回プラズマ・核融合学会年会, (大阪大学コンベンションセンター, 2018. 12. 3-
2018. 12. 6) 6P69.
52. 本吉郁哉, 假家強, 南龍太郎, 今井剛, 沼倉友晴, 岡田麻希, 中嶋洋輔,
DEMO用240 GHzジャイロトロンの試設計,

- 第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）6P70.
53. 北條俊孝，南龍太郎，假家強，沼倉友晴，岡田麻希，本吉郁哉，八房拓也，今井剛，中嶋洋輔，
GAMMA 10/PDXセントラル部でのECRH偏波制御に関する実験，
第35回プラズマ・核融合学会年会，（大阪大学コンベンションセンター，2018.12.3-2018.12.6）6P71.
54. Tokihiko Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group,
ミリ波後方散乱計測によるLHDプラズマの微視的乱流揺動の観測，
閉じ込め・輸送研究会2018 - 多種粒子系からなる燃焼プラズマ特性の理解に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する研究 - 合同開催 核融合エネルギーフォーラム 「閉じ込め・輸送」サブクラスター会合，（核融合科学研究所，2018.12.12-2018.12.14）.
55. 山崎幸弥，吉川正志，小波蔵純子，嶋頼子，中西博之，須藤駿，毛利友弥，坂本瑞樹，中嶋洋輔，
GAMMA 10/PDXにおける多チャンネルH α 線計測器を用いた2次元H α 計測，
平成30年度 研究会「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」，（核融合科学研究所，2018.12.19-2018.12.21）.
56. 安藤泰斗，
GAMMA10/PDXダイバータ模擬プラズマ上流部におけるイメージングボロメータ計測システムの開発，
平成30年度第2回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新展開」研究会，
（核融合科学研究所，2018.12.20-2018.12.21）.
57. 原利樹，
GAMMA10/PDX非接触プラズマの上流・下流のプロープ計測，
平成30年度第2回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新展開」研究会，
（核融合科学研究所，2018.12.20-2018.12.21）.
58. 中嶋洋輔，
原型炉へ向けた開放端磁場構造を活かした境界プラズマ研究と大電力ジャイロトロン開発，
双方向型共同研究成果報告会，（核融合科学研究所，2019.1.17）.
59. 市村和也，
ガンマ10/PDXダイバータ模擬実験における不純物ガスを用いた熱流束低減，
双方向型共同研究成果報告会，（核融合科学研究所，2019.1.17）.
60. 飯島貴朗，
GAMMA 10/PDXダイバータ模擬実験モジュールにおける非接触プラズマ生成とその上流・下流の特性，
仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』電気通信研究所共同プロジェクト研究会『プラズマ流中マルチスケール構造形成による新規反応場の開拓』核融合科学研究所ネットワーク型共同研究 研究会『実験室基礎プラズマネットワークによるプラズマ流れの統合的理解』，（東北大学青葉山キャンパス，2019.2.12-2019.2.13）.
61. ジャンソウォン，市村真，平田真史，池添竜也，坂本瑞樹，隅田脩平，泉昂希，田中温人，久保田裕士，関根諒，栢野大樹，中嶋洋輔，
GAMMA 10/PDXにおけるICRF加熱によるイオンの磁力線方向輸送制御，
仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』電気通信研究所共同プロジェクト研究会『プラズマ流中マルチスケール構造形成による新規反応場の開拓』核融合科学研究所ネットワーク型共同研究 研究会『実験室基礎プラズマネットワークによるプラズマ流れの統合的理解』，（東北大学工学研究科，2019.2.12-2019.2.13）.

62. ジャンソウオン,
ミラー装置におけるICRF加熱を用いた端損失イオン温度制御,
第8回ICRF加熱研究会「ICRF加熱装置の高性能化と将来応用」,(核融合科学研究所,
2019.3.5) .
63. 関根諒,
GAMMA 10/PDXセントラル部における高周波波動に起因する密度揺動構造計測,
第8回ICRF加熱研究会「ICRF加熱装置の高性能化と将来応用」,(核融合科学研究所,
2019.3.5) .
64. 久保田裕士,
GAMMA 10/PDX西バリア部におけるTASK/WFコードを用いた波動伝搬解析,
第8回ICRF加熱研究会「ICRF加熱装置の高性能化と将来応用」,(核融合科学研究所,
2019.3.5) .
65. 江尻晶, 平田真史, 市村真, ジャンソウオン, 池添竜也, 神尾修治, 吉川正志,
高速発光揺動測定による波動計測,
第8回ICRF加熱研究会「ICRF加熱装置の高性能化と将来応用」,(核融合科学研究所,
2019.3.5) .
66. 中嶋洋輔,
筑波大学プラズマ研究センターにおけるダイバータ模擬研究の歩み,
NIFSセミナー,(核融合科学研究所, 2019.3.8) .
67. M. S. Islam, Y. Nakashima, K. Hoshino, A. Hatayama,
Numerical Simulation Study of Plasma Behavior in the End-cell of GAMMA
10/PDX by Using a Multi-Fluid Code “LINDA” ,
ダイバータの学理と応用」研究会,(核融合科学研究所, 2019.3.8) .
68. 飯島貴朗,
GAMMA 10/PDXのダイバータ模擬モジュールにおける不純物入射による非接触プラズマ
生成とその挙動,
ダイバータの学理と応用」研究会,(核融合科学研究所, 2019.3.8) .
69. 出射浩, 福山淳, 久保伸, 假家強, 恩地拓己, 花田和明, 池添竜也, 村上定義,
QUEST における入射ビーム制御による複合高調波次数・周波数の電子サイクロトロン
加熱・電流駆動検討,
日本物理学会第74回年次大会,(九州大学伊都キャンパス, 2019.3.14-2019.3.17) .
70. ジャンソウオン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 泉昂希,
田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 栢野大樹, 中嶋洋輔,
ミラープラズマにおけるICRF加熱時のイオンの磁力線方向輸送,
日本物理学会第74回年次大会,(九州大学伊都キャンパス, 2019.3.14-2019.3.17) .
71. 小島信一郎, 花田和明, 出射浩, 恩地拓己, 中村一男, 長谷川真, 永島芳彦,
池添竜也, 黒田賢剛, 米田亮太, Hatem Elserafy, 小野雅之, 江尻晶, 四竈泰一,
假家強, 高瀬雄一, 村上定義,
QUESTにおける2nd ECRHによるプラズマ電流立ち上げ時の中性粒子の影響と電子エネ
ルギー分布について,
第22回 若手科学者によるプラズマ研究会,(那珂核融合研究所, 2019.3.18-
2019.3.20) .
72. 隅田脩平,
軌道追跡計算と波動分散計算を用いたJT-60Uにおける3Heイオンサイクロトロン放射
の励起機構の解析,
第22回若手科学者によるフプラズマ研究会,(那珂核融合研究所, 2019.3.18-
2019.3.20) .
73. ジャンソウオン,
ミラープラズマにおけるICRF加熱時の端損失イオンのピッチ角分布,
第22回若手科学者によるフプラズマ研究会,(那珂核融合研究所, 2019.3.18-
2019.3.20) .

74. 久保田裕士,
GAMMA 10/PDX西バリア部におけるICRF加熱用アンテナ位置の最適化に向けた検討,
第22回若手科学者によるフプラズマ研究会, (那珂核融合研究所, 2019. 3. 18-
2019. 3. 20) .
75. 関根諒, 栢野大樹,
GAMMA 10/PDXセントラル部におけるマイクロ波反射計を用いた自発励起波動の空間構造計測,
第22回若手科学者によるフプラズマ研究会, (那珂核融合研究所, 2019. 3. 18-
2019. 3. 20) .

〈解説・紀要等〉

01. 中嶋洋輔,
原型炉へ向けた開放端磁場構造を活かした境界プラズマ研究と大電力ジャイロトロン開発,
平成29年度双方向型共同研究成果報告書 (2018)

〈受賞〉

01. 隅田脩平
Study on Ion Cyclotron Emission Driven by Fusion Product in Tokamak Plasma,
数理物質科学研究科長賞, 2019.3.25.
02. 泉昂希,
GAMMA 10/PDXにおける自発ICRF波動励起時のイオンの磁力線方向輸送,
数理物質科学研究科長賞, 2019.3.25.
03. ジャンソウオン,
ミラープラズマにおけるICRF加熱時のイオンの磁力線方向輸送,
日本物理学会学生優秀発表賞 (2019年日本物理学会第74回年次大会) , 2019.3.27.