

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01869

研究課題名（和文）非等方・非平衡リアルプラズマにおける体積再結合過程の解明

研究課題名（英文）Volumetric recombination in anisotropic non-equilibrium real plasma

研究代表者

岡本 敦（Okamoto, Atsushi）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50396793

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：非等方・非平衡なエネルギー分布を持つプラズマの体積再結合過程解明のため、電子サイクロトロン共鳴プラズマを対象として、体積再結合を誘起することに成功した。この実験に必要な制御機器を設計・製作した。予備検討や結果の解釈に有用となる中性粒子圧力分布の高速な計算手法を考案した。非等方・非平衡なエネルギー分布を計測可能なレーザートムソン散乱計測システムを開発した。非等方・非平衡なエネルギー分布に適用可能な衝突輻射モデルを構築し、線スペクトル強度と非等方性の関係などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子サイクロトロン共鳴プラズマにおける体積再結合過程の誘起は、世界で初めての成功である。また、非等方なエネルギー分布を有するプラズマからの体積再結合という観点で、フュージョンエネルギー実現に向けた今後の研究展開における良好な実験結果・研究対象としての価値がある。本研究の過程で提案・開発した計算手法、計測システム、理論モデルもまた、フュージョンエネルギー実現に向けた今後の研究を加速させ得る成果である。同時に、広く非等方・非平衡なプラズマが関与する諸現象の研究にも展開しうる成果である。

研究成果の概要（英文）：Objective of the research is clarifying volumetric recombination processes in anisotropic non-equilibrium plasma. We successfully induced the volumetric recombination process in an electron cyclotron plasma. A calculation method for neutral particle pressure distribution was proposed. A laser Thomson scattering measurement system was developed. A collisional radiative model for anisotropic non-equilibrium plasma was developed.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：体積再結合 非等方性 非平衡エネルギー分布 衝突輻射モデル レーザートムソン散乱計測 電子サイクロトロン共鳴

1. 研究開始当初の背景

核融合研究の一つの重要な課題は、閉じ込め領域から流出したプラズマが磁力線に沿って固体壁へ終端する領域（ダイバータ領域）での熱流束の低減である。プラズマが固体壁（ダイバータ板）へ到達する前に体積再結合を促進し、熱流束を分散させることを前提に ITER や原型炉の運転シナリオが検討され、既存の実験装置や直線型ダイバータ模擬装置を含めた多様なプラズマの体積再結合過程を統一的に普遍的に理解することが重要となっている。特に核融合原型炉は未踏のプラズマパラメータ・装置規模であり、ダイバータ設計のため素過程モデルの精度向上が求められている。一方、研究代表者らのグループは二電子温度プラズマの衝突輻射モデルを構築し、見かけの温度・密度が真の温度・密度の半分程度までテイル成分の割合に応じて変化する、すなわち、従来のモデルでは誤った結果が導かれる可能性があることを指摘した。

実際のプラズマ（リアルプラズマ）に非熱的エネルギー分布（非平衡性）や非等方性が潜在する一方で、プラズマ中の電子衝突・輻射のバランスを記述する衝突輻射モデルにおいて、従来は等方マクスウェル分布に基づいた速度係数が衝突励起・脱励起過程に採用されてきた。非等方エネルギー分布を正しく取り込むことができれば、再結合過程の予測だけでなく実際のプラズマのエネルギー非等方性を分光学的手法により診断できる可能性もある。

2. 研究の目的

本研究は、電子エネルギー分布が制御されたプラズマ実験環境を用いて、衝突輻射モデルにおける非等方性・非平衡性の影響を解明することを目的とする。計測と制御性の制約により従来の多くの実験ではプラズマは等方マクスウェル分布と仮定せざるを得なかった。本研究ではモデルとの比較検証が可能な実験環境を構築する。

実験は研究代表者が所有する実験装置 NUMBER において行う。電子サイクロトロン共鳴加熱と中性ガス圧力分布を制御ノブとし、レーザートムソン散乱と静電エネルギーアナライザによりエネルギー分布を計測する。

任意のエネルギー分布に忠実な衝突輻射モデルを構築し、実験で得られたエネルギー分布に対して適用することで、原子励起状態占有密度分布を得る。これとは独立に線スペクトル発光強度から占有密度分布を計測し、モデルの比較検証を行う。本研究では、通常の順問題（エネルギー分布を含む幾つかのプラズマパラメータから占有密度を計算すること）だけでなく、逆問題（占有密度からプラズマパラメータを推定すること）解決のため非等方性をモデル化するパラメータを探求する。逆問題に対応できるようになると、伝統的なダイバータプラズマ模擬実験装置や環状閉じ込め装置においても通常の線スペクトル強度からエネルギー分布を推定することが可能となる。順問題の解決は実効再結合速度係数の精度向上に寄与し、原型炉ダイバータプラズマの予測計算の高度化に貢献するが、合わせて逆問題も解決することでダイバータプラズマ計算コードの妥当性検証に様々な装置の実験データが活用できるようになる。

3. 研究の方法

(1) 高密度プラズマの生成

体積再結合過程を含む衝突輻射モデルを対象とすることから、実験において体積再結合を誘起することが重要となり、そのために低電子温度で高電子密度のプラズマを生成する必要がある。高密度化のためにマイクロ波入射モードを制御し、パワー吸収率を向上させる。また、ダイバータ試験領域へのガス供給経路追加やガス供給量の最適化を図る。ガス供給法の検討のために、ガス供給量と排気速度から真空容器内のガス圧力分布を計算する。ダイバータ試験領域にプラズマ終端板を設置し、径方向電位分布を制御する。

(2) エネルギー分布計測

電子エネルギー分布を直接計測可能なレーザートムソン散乱法を適用する。光路を工夫し、磁力線垂直方向と平行方向のエネルギー分布を区別して計測できるようにする。ラングミュアプローブの電流電圧特性からも非平衡な成分を抽出する。静電エネルギーアナライザを開発し、これを用いてイオンエネルギー分布を取得する。較正の目的で装置端部にイオン源を設置し、磁力線に沿ってイオンビームを入射する。

(3) 衝突輻射モデルの開発

衝突励起断面積を収集し、任意のエネルギー分布に対して都度速度係数を計算することで占有密度分布を求める衝突輻射モデルを構築する。非等方エネルギー分布に拡張する。実験と比較検証する。

(4) 線スペクトル強度からのパラメータ推定

実験で得られた線スペクトル強度を再現するようにプラズマパラメータを推定する。推定は衝突輻射モデルを逆問題として適用する。エネルギー分布推定の前段階として空間分布推定を試みる。

4. 研究成果

(1) 高密度プラズマの生成

マイクロ波入射モードを制御するための偏向器を製作し、図 1 に示すように円形導波管に設置することで、直線偏波から右回りおよび左回りの円偏波を選択的に励振した。各入射モードに対してプラズマ生成実験を行い、導波管を発振器側へ戻す方向に伝搬するパワー（反射パワー）やプラズマのイオン飽和電流を計測した。これまでの直線偏波では反射パワーが発振器出力の 6 割に達していたところ、右回り円偏波を選択することで 2 割にまで低減することができた。これに伴いイオン飽和電流も同じ発振器出力に対して図 2 に示すように 1.5 倍程度に増加した。プラズマに吸収されるマイクロ波パワーが増加したためと考えられる。電子サイクロトロン共鳴によりプラズマを生成・加熱するため、右回り円偏波が効果的とこれまで考えられてきたが、左回り円偏波を選択しても同等の反射パワー低減がみられることが明らかとなった。文献調査によると偏波反転現象が存在し得る。真空容器内でプラズマ中を伝搬する電磁波の偏向や波数について今後詳細な計測を行うことで、検証できると考えている。

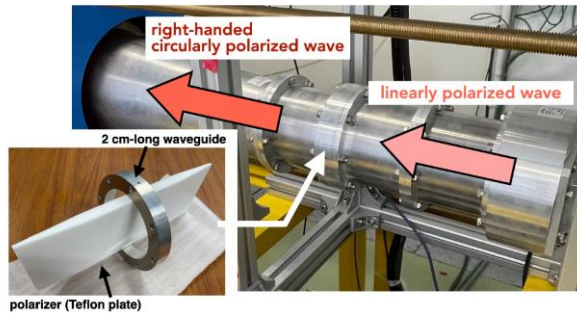


図 1 製作した偏光器と導波管

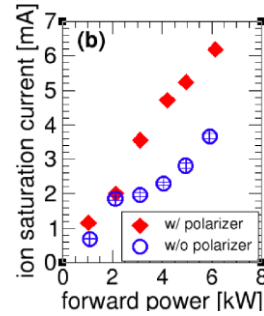


図 2 イオン飽和電流の進行マイクロ波パワー依存性

前述の偏向器設置に伴い、偏向器の熱負荷による損傷を回避する目的で、マイクロ波入射タイミングを制御するシーケンサ（図 3）を設計製作した。マイクロ波入射はプラズマ生成領域に磁場が印加されている時間内の必要があり、さらに、マイクロ波入射中にダイバータ試験領域の磁場の印加や計測を行う必要がある。そこで既存のダイバータ試験領域の磁場電源（コンデンサバンク）の充放電と連携させた。

ダイバータ試験領域へのガス供給量の最適化を図るための、真空容器内のガス圧力分布計算について、これまで分子流を仮定したモデルで計算を行っていたが、粘性流（粘性層流）および中間流における解法を考案した。これによりモンテカルロ計算と比較して格段に高速で分子流の計算（線型連立方程式の求解）と同程度の計算時間で中間流領域のガス圧力分布を計算することが可能となった。真空容器に注入するガス流量を変化させ排気する実験を行い、圧力の実測値を計算と比較した。再結合プラズマ実験に適用するような大流量のガス供給では、真空容器内のガス圧力が上昇し、部分的に中間流領域となる。図 4 に示すように、このような条件で従来の分子流の計算が実測から逸脱していたところ、本研究で開発した手法により実測を再現することが可能となった。中間流領域の気体流れは NUMBER の再結合プラズマ実験だけでなく、核融合原型炉のダイバータ排気配管においても想定され、今後このような分野への本手法の適用が期待される。

ダイバータ試験領域にはプラズマ終端板を設置した。構造は中央と外側の同心二重円で、それぞれ独立に真空容器に対してバイアス電圧を印加できる。この終端板に電位差を付けてバイアスすることで、径方向電場を生成しプラズマを ExB ドリフトにより周方向へ回転させることに成功した。プラズマ中の電位分布を静電プローブで計測して得られた ExB ドリフト速度の径方向分布と方向性プローブで得られた周方向回転速度の径方向分布はよく一致し、同時に軸方向（沿磁力線方向）にも下流向きの流れの大きさが径方向位置により異なることを見出した。

ダイバータ試験領域へのガス供給量を調整し、右回り円偏波モードでマイクロ波を入射することで、ダイバータ試験領域における電子密度を 2 倍以上増大させることに成功し、図 5 に示す体積再結合過程に伴って観測されるスペクトルの取得に成功した。実験はヘリウムで行った。ヘリウム原子 n^3D 状態からの可視線スペクトルが主量子数 $n = 13$ まで観測され、ボルツマンプロット法により電子温度 $T_e = 0.055$ eV と電子密度 $n_e = 1.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ を得た。このことから、プラズマ中で体積再結合が誘起されていると結論付けた。これまで多くの直線型プラズマ実験装置

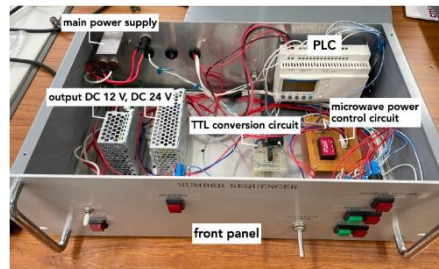


図 3 製作したシーケンサ

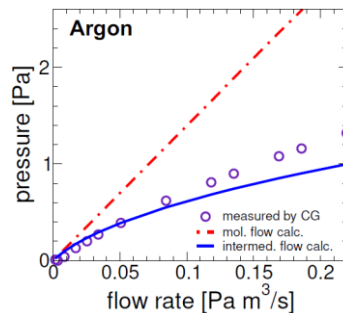


図 4 真空容器内の圧力のガス流量依存性の例。実線は本研究の計算手法、1 点鎖線は従来の分子流計算、丸は実測を示す。

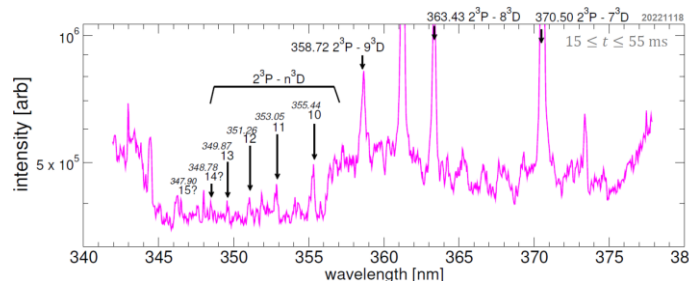


図 5 体積再結合に伴うヘリウム原子高励起状態からのスペクトル

や環状閉じ込め装置で体積再結合は発現していたが、電子サイクロトロン共鳴で生成されたプラズマにおいて観測されたのは、本研究が初めてである。

(2) エネルギー分布計測

電子エネルギー分布を直接計測可能なレーザートムソン散乱計測システムを開発し、NUMBER に設置した。プラズマを電子サイクロトロン共鳴により生成・加熱すること、プラズマ生成領域とダイバータ試験領域の間に磁気ミラーが生じることから、NUMBER のプラズマでは電子エネルギー分布に非等方性が生じたり、それが実験条件により緩和されたりする可能性が考えられた。そこで、エネルギー分布の磁力線垂直方向成分と平行方向成分を区別して計測できる配置を検討した。理想的には磁力線に対して 45 度の角度でレーザーを入射し、レーザー入射と直交する方向（磁力線に対して -45 度および 135 度の角度）で散乱光を集光することで、そのような計測が可能となる。一方で NUMBER の前述の観測対象領域には径方向に 1 対の計測ポートのみが存在し、理想的な配置は困難であった。既存の計測ポート内を利用しつつエネルギー分布の非等方性を計測できるように光路を工夫し、磁力線に対して 80 度の角度でレーザーを入射し、磁力線に対して -85 度および 95 度の角度で散乱光を集光する光学系を設計製作した。入射光学系のミラー配置を図 6 に示す。真空容器内のレーザー入射光路には迷光を抑制するためのバッフルを設置し、入射窓はブリュースター角で真空容器中心から 1m ほど離れた場所に設置した。散乱光集光の立体角を最大化するため、プラズマ表面近傍に集光レンズを設置し、真空境界となる窓を介して光ファイババンドルへ結像する光学系を構築した。狭い空間の中で光ファイババンドルの位置の 4 自由度を調整できるようにした。真空容器にアルゴンガスを封入し、レイリー散乱光強度のガス圧力依存性（図 7）を取得した。レイリー散乱光強度は理想的にはガス圧力に比例するが、低圧力の極限で有限の強度が残る。これが入射レーザーが意図しない場所で散乱・反射を繰り返し集光光学系に到達する迷光であり、迷光強度により計測システムの性能を評価した。迷光強度は 1kPa のアルゴンによるレイリー散乱光強度と等価であり、この値は、過去に報告された他の装置と比較して遜色ないレベルである。他の装置と比較すると迷光抑制対策に制約が多い状況であり、高性能の光学系を構築できたといえる。

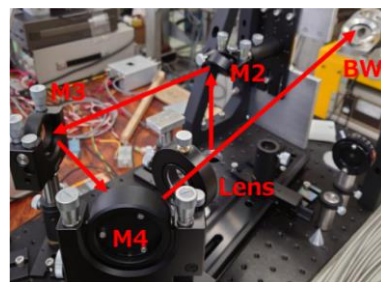


図 6 トムソン散乱計測用レーザー入射光学系。BW はブリュースター窓。

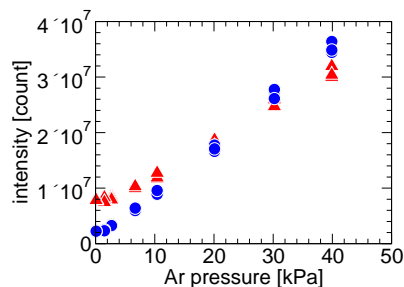


図 7 封入アルゴンガス圧力に対する散乱光強度の例。●は迷光が抑制された視線、▲は調整不十分で迷光の影響が大きい視線。

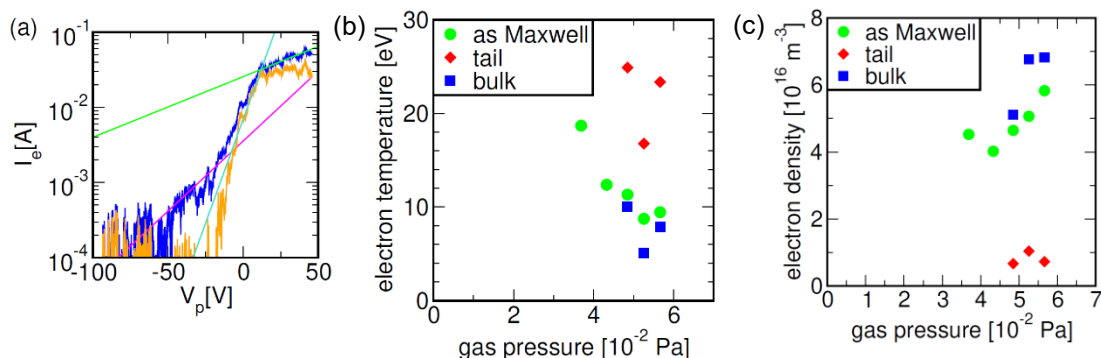


図 8(a)テイル成分を含むラングミュアプローブ電流電圧特性の例。バルク成分■とテイル成分◆の(b)電子温度および(c)電子密度。●は単一マクスウェル分布を仮定した解析。

ラングミュアプローブの電流電圧特性から非平衡な成分を抽出した。動作ガス圧力の低い条件において、図 8 に示すテイル成分が観測された。0.05 Pa 程度のヘリウムプラズマにおいて、バルク電子温度 5 - 10 eV に対してテイル成分の温度は 15 - 25 eV 程度であった。密度はバルク電子密度 $6 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ の 10 - 20%程度であった。また浮遊電位に間歇的な負のスパイクが発生するプラズマを発見し、条件付き抽出法を適用することで、図 9 に示すような負のスパイクが発生する短い時間 (10 マイクロ秒程度) のプローブ電流電圧特性を取得した。解析の結果、負のスパイクが発生する時間は電子温度が高いことが判明し、高温バブルとして発散磁場配位の電子サイクロトロン共鳴プラズマで知られている現象が、収束磁場配位 (NUMBER のダイバータ試験領域) においても存在することを初めて明らかにした。

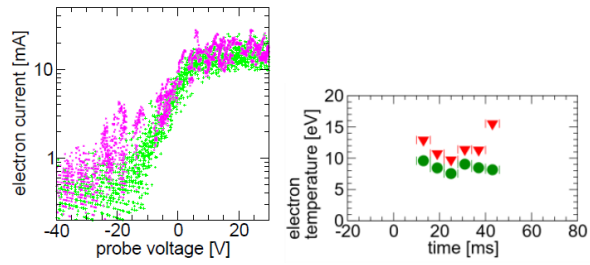


図 9 プローブ電流電圧特性および電子温度の時間発展。●は浮遊電位の負スパイク発生 ($V_f < \mu - 3\sigma$) の条件付き抽出。▼はそこから得られた電子温度。●は負スパイクなしの条件付き抽出の結果。

静電エネルギーアナライザーを開発し、イオンエネルギー分布を取得した。例えば電子温度 4 eV、電子密度 $4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ のプラズマで得られたイオンエネルギー分布はイオン温度 1.2 eV のマクスウェル分布であった。一方で、電子密度依存性を詳細に調査すると、アナライザーのコレクター電流が高電子密度領域で飽和していることが明らかとなった。このことについてアナライザーの各グリッドに流れる電流を計測するとともに PIC コードを用いて数値的に検証し、グリッド間のイオンによる空間電荷の効果で電流が減少することを明らかにした。

(3) 衝突輻射モデルの開発

水素原子について電子衝突およびイオン衝突による励起・脱励起・電離を考慮した衝突輻射モデルを構築した。これまでイオン衝突の影響は電子衝突と比較し小さいため無視できるとされていたが、磁場閉じ込め核融合炉のダイバータ領域のような比較的高温・高密度のプラズマでは図 10 に示すように 10%程度の相違がイオン衝突により生じることを明らかにした。また、そのような状況ではイオン衝突の影響を考慮する必要があることを逆手にとって、水素原子の主量子数 $p = 3, 4, 10$ の線スペクトル強度比からイオン温度を推定できることを提案した。

非等方エネルギー分布への拡張に関して、衝突断面積から速度係数を計算するとき速度空間で積分することで、磁力線平行方向と垂直方向の二つの温度を有するマクスウェル分布の取り扱いを可能にした。等価な等方温度における等方エネルギー分布の場合の衝突輻射モデルと励起状態占有密度や電離速度係数などを比較した。通常想定されるパラメータ領域においては、イオンエネルギー分布の非等方性の影響は数%以内であることを明らかにした。

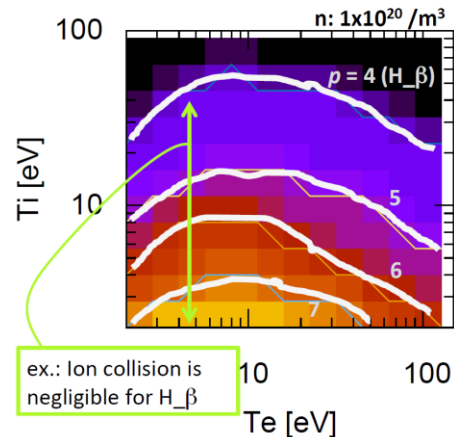


図 10 イオン衝突の有無で励起状態占有密度が 10%変化する主量子数の等高線。

(4) 線スペクトル強度からのパラメータ推定

ヘリウムプラズマを対象とした実験で 3-4 本の線スペクトル強度から電子温度・電子密度を推定する手法がよく知られている。本研究ではその手法を拡張した。具体的には、実験装置 NUMBER のダイバータ試験領域において円柱プラズマの中心を通る単一径方向視線について可視領域のヘリウム原子線スペクトル 9 本の強度を計測し、図 11 のように電子密度の径方向分布を推定した。電子密度の分布は妥当な関数形を仮定し、電子温度の径方向分布はプローブ計測結果に基づき一様とした。ダイバータ試験領域の磁場強度に応じてプラズマ径が変化することが、プローブ計測により知られていたが、本手法はそれを概ね再現することができた。この逆問題の求解において、パラメータ最適値の探索にネルダー・ミード法が有効であったこと、どのような線スペクトル強度比がパラメータ推定に有用であるか感度係数を導入して検討できることが明らかとなった。これらの知見は、今後のエネルギー分布推定においても活用される。

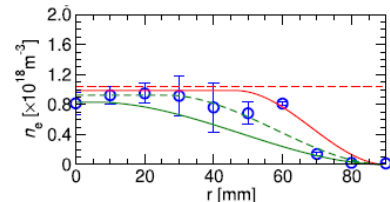


図 11 電子密度の径方向分布の例。プローブ局所計測と本手法の比較。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kimata Sora, Okamoto Atsushi, Fujita Takaaki, Arimoto Hideki, Yasuda Kouhei, Kado Keitaro, Tsunoda Keishi	4. 巻 12
2. 論文標題 Power balance in the smallest tokamak	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 045204 ~ 045204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0085770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takahashi H., Winarto M. N., Okamoto A., Boonyarittipong P., Seino T., Kusabiraki K., Sakata Y., Yoshimura K., Nishimura R., Kitajima S., Matsuyama A., Tobita K.	4. 巻 29
2. 論文標題 On electron temperature rise in divertor relevant recombining plasma along magnetic field line	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 032508 ~ 032508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0073896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Okamoto	4. 巻 2319
2. 論文標題 Ion Collision Effect in Collisional Radiative Processes in Magnetized Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 030007-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Minami SUGIMOTO, Atsushi OKAMOTO, Takaaki FUJITA, Hideki ARIMOTO, Shunya HIGUCHI and Konan YAGASAKI	4. 巻 16
2. 論文標題 Radial Profile Estimation of Electron Density in a Linear Plasma Device NUMBER Using a Single Line-of-Sight Signal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401042-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2401042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Ochiai, A. Okamoto, T. Fujita, H. Arimoto, H. Hachikubo, M. Sugimoto, K. Iizuka	4. 巻 15
2. 論文標題 Development and evaluation of ion energy analyzer for energetic ion measurement in a linear plasma device NUMBER	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401040-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2401040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki HACHIKUBO, Atsushi OKAMOTO, Takaaki FUJITA, Hideki ARIMOTO, Ryosuke OCHIAI, Minami SUGIMOTO and Kento IIZUKA	4. 巻 15
2. 論文標題 Magnetic Field Dependence of Transition to High Electron Density Phase in a Linear Plasma Device NUMBER	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401042-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2401042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Atsushi, Higuchi Shunya, Yamada Yuto, Sato Koki, Koike Muneo, Yagasaki Konan, Sugimoto Minami, Fujita Takaaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Structure of intermittent variation of floating potential in converging field following a magnetic beach ECR plasma source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acdada	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計50件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 A. Okamoto, S. Kimata, K. Tsunoda, K. Kado, K. Yasuda, T. Fujita
2. 発表標題 Power balance in TOKASTAR-2 small tokamak for feasibility study on light source application
3. 学会等名 The 15th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Okamoto, S. Higuchi, Y. Yamada, K. Sato, M. Koike, K. Yagasaki, M. Sugimoto, T. Fujita
2. 発表標題 Intermittent variation of electron temperature in converging field following a magnetic beach ECR plasma source
3. 学会等名 11th International Conference on Reactive Plasmas / APS 2022 Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本敦, 藤田隆明, 星野一生, 高橋宏幸
2. 発表標題 原型炉ダイバータプラズマにおける荷電交換反応によるエネルギー輸送の影響評価
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樋口舜也, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生
2. 発表標題 直線型ECRプラズマ装置NUMBERにおけるレーザートムソン散乱計測システムの開発
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢ヶ崎誇楠, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 樋口舜也, 小池宗生, 佐藤剛貴, 山田悠斗
2. 発表標題 直線型ECRプラズマ装置NUMBERにおける入射マイクロ波の偏波制御によるプラズマの高密度化
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本敦, 山田悠斗, 杉本みなみ, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生, 佐藤剛貴, 藤田隆明
2. 発表標題 NUMBERにおける間歇的な浮遊電位低下の空間構造
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池宗生, 藤田隆明, 岡本敦, 杉本みなみ, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 佐藤剛貴, 山田悠斗
2. 発表標題 小型トーラス装置におけるイオン流速計測のためのマルチチャンネルマッハプローブの開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢ヶ崎誇楠, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 樋口舜也, 小池宗生, 佐藤剛貴, 山田悠斗
2. 発表標題 直線ECRプラズマ装置NUMBERにおける再結合プラズマ生成のための電子密度の増大
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樋口舜也, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生, 佐藤剛貴, 山田悠斗
2. 発表標題 NUMBER における電子温度非等方性計測のためのレーザートムソン散乱システムの構築
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生, 佐藤剛貴, 山田悠斗
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いたノイズの多い静電プローブ特性の解析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunya Higuchi, Atsushi Okamoto, Takaaki Fujita, Minami Sugimoto, Konan Yagasaki, Muneo Koike, Koki Sato, Yuto Yamada
2. 発表標題 Design and development of Laser Thomson Scattering system in the linear ECR plasma experimental device NUMBER
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yagasaki, A. Okamoto, T. Fujita, M. Sugimoto, S. Higuchi, M. Koike, K. Sato, Y. Yamada
2. 発表標題 Increasing the electron density for volumetric recombination in the linear ECR device NUMBER
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本敦, 矢ヶ崎誇楠, 杉本みなみ, 樋口舜也, 小池宗生, 佐藤剛貴, 山田悠斗, 藤田隆明
2. 発表標題 ダイバータ排気経路に適用可能なガス圧力分布計算手法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会2023年春の年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 矢ヶ崎 誇楠, 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 小池 宗生, 佐藤 剛貴, 山田 悠斗
2. 発表標題 NUMBERの再結合プラズマ生成実験における高励起準位からの発光の観測
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本 敦, 樋口 舜也, 杉本 みなみ, 矢ヶ崎 誇楠, 小池 宗生, 佐藤 剛貴, 山田 悠斗, 藤田 隆明
2. 発表標題 非等方電子エネルギー分布計測のためのレーザートムソン散乱法のNUMBERへの適用
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 剛貴, 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 矢ヶ崎 誇楠, 小池 宗生, 山田 悠斗
2. 発表標題 衝突輻射モデルを用いた直線ECRプラズマ装置NUMBERにおけるHeイオン価数分布計測手法の検討
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第54 回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 悠斗, 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 矢ヶ崎 誇楠, 小池 宗生, 佐藤 剛貴
2. 発表標題 電子サイクロトロン共鳴プラズマにおける間歇的な浮遊電位揺動発生時のイオン温度計測
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第54 回研究発表会
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Atsushi Okamoto, Shunya Higuchi, Muneo Koike, Yangyi Ma, Minami Sugimoto, Konan Yagasaki, Hiroyuki Takahashi, and Takaaki Fujita
2 . 発表標題 Divertor relevant plasma physics in converging field in NUMBER
3 . 学会等名 International Mini-Workshop on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Sugimoto, A. Okamoto, T. Fujita, H. Arimoto, S. Higuchi, K. Yagasaki, M. Koike, and Y. Ma
2 . 発表標題 Radial Profile Estimation of Electron Density and Temperature in a Linear Plasma Device NUMBER Using a Single Line-of-Sight He I Line Emission Intensity Ratio
3 . 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 A. Okamoto, S. Kimata, T. Fujita, H. Arimoto, K. Yasuda, K. Kado, and K. Tsunoda
2 . 発表標題 Electron and ion stored energy in the smallest tokamak
3 . 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 A. Okamoto, S. Togo, and N. Ezumi
2 . 発表標題 Effect of velocity distribution anisotropy in collisional radiative model
3 . 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Takahashi, M. N. Winarto, P. Boonyarittipong, T. Seino, K. Kusabiraki, Y. Sakata, K. Yoshimura, R. Nishimura, A. Okamotoa, A. Matsuyamab, S. Kitajima, K. Tobita
2. 発表標題 Observation of Electron Temperature Rise in Divertor Relevant Recombining Plasma along Magnetic Field Line
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢ヶ崎誇楠, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 杉本みなみ, 樋口舜也, 小池宗生, 馬洋一
2. 発表標題 中間流領域における中性ガス圧力分布計算手法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢ヶ崎誇楠, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 樋口舜也, 小池宗生, 馬洋一
2. 発表標題 直線型ECRプラズマ装置NUMBERにおけるプラズマの高密度化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口舜也, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生, 馬洋一
2. 発表標題 直線型ECRプラズマ装置NUMBERにおけるレーザートムソン散乱計測の受光系の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本敦, 杉本みなみ, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 小池宗生, 馬 洋一, 有本英樹, 藤田隆明, 高橋宏幸
2. 発表標題 直線型磁化プラズマ装置NUMBERを用いた非等方・非平衡速度分布における原子分子過程の検証実験
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本敦, 馬洋一, 樋口舜也, 小池宗生, 杉本みなみ, 矢ヶ崎誇楠, 藤田隆明
2. 発表標題 NUMBERにおける間歇的な浮遊電位低下の観測
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢ヶ崎 誇楠, 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 小池 宗生, 馬 洋一
2. 発表標題 中間流領域における中性粒子圧力分布計算手法の直線型プラズマ装置への適用
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬 洋一, 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 矢ヶ崎 誇楠, 小池 宗生
2. 発表標題 非熱平衡状態のプラズマにおける条件付き平均法のための浮遊電位計測
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第 5 3 回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池 宗生 , 岡本 敦, 藤田 隆明, 杉本 みなみ, 樋口 舜也, 矢ヶ崎 誇楠, 馬 洋一
2. 発表標題 プラズマ流速の径方向分布計測に向けたマルチチャンネルマッハプローブの開発
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第 5 3 回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minami SUGIMOTO, Atsushi OKAMOTO, Takaaki FUJITA, Hideki ARIMOTO, Shunya HIGUCHI, Konan YAGASAKI
2. 発表標題 Estimation of Radial Profile of Electron Density in a Linear Plasma Device NUMBER Using Single Line-of-sight Signal
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本敦, 杉本みなみ, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 有本英樹, 藤田隆明, 高橋宏幸
2. 発表標題 電子サイクロトロン共鳴プラズマ源での水素プラズマ生成とバルマー線強度診断
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおけるエンドプレートを用いた電子密度分布制御
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本敦
2. 発表標題 イオン衝突を含む水素原子衝突輻射モデルの開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBER における単一視線分光信号を用いた電子密度・温度分布推定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける視線積分されたHe原子線強度比を用いた電子密度・温度分布推定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本敦, 杉本みなみ, 樋口舜也, 矢ヶ崎誇楠, 有本英樹, 藤田隆明, 高橋宏幸
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBER試験領域における水素原子バルマー線強度計測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢ヶ崎誇楠, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 樋口舜也
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける再結合プラズマ生成のための中性粒子圧力分布の制御
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第52 回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口舜也, 岡本敦, 藤田隆明, 杉本みなみ, 矢ヶ崎誇楠
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける静電プローブを用いた電子エネルギー分布計測手法の検討
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第52 回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Okamoto
2. 発表標題 Ion Collision Effect in Collisional Radiative Processes in Magnetized Plasma
3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Okamoto, H. Takahashi
2. 発表標題 Volumetric Recombination under Existence of Energetic Electron and Ion in DT-ALPHA
3. 学会等名 The 10th International Symposium of Advanced Energy Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Hiroki HACHIKUBO, Atsushi OKAMOTO, Takaaki FUJITA, Hideki ARIMOTO, Ryosuke OCHIAI, Minami SUGIMOTO, Kento IIZUKA
2. 発表標題	Magnetic field dependence of transition to high ion saturation current phase in a linear plasma device NUMBER
3. 学会等名	The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	R. OCHIAI, A. Okamoto, T. Fujita, H. Arimoto, H. Hachikubo, M. Sugimoto, K. Iizuka
2. 発表標題	Development and evaluation of ion energy analyzer for energetic ion measurement in a linear plasma device NUMBER
3. 学会等名	The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 落合亮輔, 鉢窪宏規, 飯塚健斗
2. 発表標題	直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける分割型エンドプレートを用いた径方向分布制御
3. 学会等名	日本物理学会第75回年次大会(2020年)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	鉢窪宏規, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 落合亮輔, 杉本みなみ, 飯塚健斗
2. 発表標題	直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける高イオン飽和電流モード形成の磁場依存性
3. 学会等名	プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 落合亮輔, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 鉢窪宏規, 杉本みなみ, 飯塚健斗
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおけるイオンエネルギーアナライザの開発と高エネルギーイオンの測定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本みなみ, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 落合亮輔, 鉢窪宏規, 飯塚健斗
2. 発表標題 単一視線の分光信号を用いた線スペクトル強度比法による円柱プラズマの径方向分布推定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本敦
2. 発表標題 再結合プラズマの衝突輻射過程にイオン衝突が及ぼす影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 落合亮輔, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 鉢窪宏規, 杉本みなみ
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBERにおける高エネルギーイオン計測のためのイオンエネルギーアナライザの開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鉢窪宏規, 岡本敦, 藤田隆明, 有本英樹, 落合亮輔, 杉本みなみ
2. 発表標題 直線型プラズマ実験装置NUMBER における高イオン飽和電流モードへの遷移の磁場依存性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 宏幸 (Takahashi Hiroyuki) (30768982)	東北大学・工学研究科・講師 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------