

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18699

研究課題名(和文)消えゆくプラズマの空間構造と電子エネルギー分布の歪みとの関わり

研究課題名(英文)Relation between spatial structure of disappearing plasma and deformation of electron energy distribution

研究代表者

高橋 宏幸(Takahashi, Hiroyuki)

東北大学・工学研究科・講師

研究者番号：30768982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：体積再結合によって消えゆくプラズマの空間構造と電子エネルギー分布の歪みとの関わりを明らかにするため、長尺シングル/ダブルプローブを設計・製作して再結合プラズマ中の電子温度と電子密度の磁力線方向分布を計測した。再結合フロントで約0.4 eV程度であった電子温度が、僅か0.15 m下流側で3 eV程度にまで増加した。下流に向けた電子温度の増加傾向は継続し、最終的に14 eV程度にまで増加した。その途中で温度の増加率が大きく変化する点が確認されたが、この点は軸磁場が大きく変化する点に対応した。電子温度増加率の変化は軸磁場の空間構造に関連した現象であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再結合フロントの下流領域を計測した例は複数報告されており下流方向への電子温度増加の兆候が見られていたが、再結合フロントとエンドプレート間の距離が短く全体像を捉える事は困難であった。本研究では再結合フロントをエンドプレートから約0.4m離れた位置に生成する事で再結合フロントの下流領域を広範囲かつ詳細に計測し、電子温度増加の様子を全体的に捉えた。電子温度の増加が2段階に分けて進行する事が分かり、従来の再結合プラズマの空間分布の理解と異なる新しい結果を得た。再結合/非接触プラズマによる熱制御を前提とする核融合炉ダイバータの熱設計や、熱制御性能の向上を目指した研究を捉え直すきっかけとなり得る。

研究成果の概要(英文)：Spatial structure of electron temperature and electron density along magnetic field direction were investigated by using long single/double Langmuir probes to study relation between disappearing plasma (recombining/detached plasma) and deformation of electron energy distribution. It was found that electron temperature increased to approximately 3 eV at 0.15 m downstream of the recombination front region, even though electron temperature at the recombination front was about 0.4 eV. Electron temperature kept to increase toward further downstream region. At 0.2 m downstream of the recombination front region, increasing rate of the electron temperature showed significant change and it increased up to approximately 14 eV. This point corresponds to the position where axial magnetic field significantly changes. This indicates that sudden increase of the electron temperature likely attributed to magnetic field configuration.

研究分野：磁場閉じ込め核融合

キーワード：磁場閉じ込め核融合 非接触ダイバータ 体積再結合 電子エネルギー分布 高周波プラズマ DT-ALPHA

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉では閉じ込め領域から漏れ出すプラズマはダイバータと呼ばれる機器で終端する。ダイバータには莫大なプラズマ熱流が集中するため、強力な熱制御手法を確立することは磁場閉じ込め核融合炉の実現に向けた重要課題である。ITER や現在各国で概念設計が進められている核融合原型炉では、プラズマがダイバータ板の前面で消滅する非接触ダイバータによる熱制御が行われる。プラズマが消滅する過程では電離の逆過程である体積再結合が極めて重要な役割を果たし、体積再結合の反応率はプラズマの電子温度と電子密度に大きく依存性する。非接触ダイバータの熱制御性能を評価するためには、非接触状態にあるプラズマ(非接触プラズマもしくは再結合プラズマと呼ぶ)中の電子温度・電子密度の空間分布を精度良く予測しなければならず、ITER よりも核融合出力の大きい原型炉の熱設計活動においては、プラズマパラメータの予測精度の向上が重要となっている。

非接触/再結合プラズマにおいて再結合反応が盛んに生じる空間を再結合フロントと呼び、再結合フロントからプラズマ対向壁(ダイバータ板・エンドプレート)にかけて電子温度は単調減少するものと考えられてきた。様々なダイバータプラズマ模擬装置からもこの理解を支持する計測結果が報告されている。ところがそれらの結果を注意深く観察すると、再結合フロントからエンドプレートにかけて電子温度が増加する兆候を見出す事ができる。装置・放電ガス・プラズマ診断手法を問わず見られる兆候である事から、非接触/再結合プラズマに普遍的な現象である可能性が高い。しかしながら上記の報告例では再結合フロントとエンドプレートとの間隔が短く電子温度増加の全体像を捉える事が困難であった。この現象に着目した研究も行われておらず、メカニズムの理解も進んでいなかった。高い信頼性のもとで非接触ダイバータの熱制御性能を評価するためには、電子温度と電子密度の空間分布を高い精度で予測する事が重要となる。上で述べた電子温度増加が非接触/再結合プラズマに普遍的なものであるならば、核融合炉の熱設計もそれを踏まえたものでなければならない。そのためには温度増加を引き起こすメカニズムの解明が必要不可欠であり、まずは温度増加の全体像を捉えた非接触/再結合プラズマの全体的な計測が必要となる。

このような背景のもと我々の研究グループでも再結合プラズマの空間分布計測を実施し、空間 2 点での計測に限られるが、再結合フロント下流での電子温度の増加が観測されていた[1]。しかし、計測ポートおよび計測器の制限から空間分布全体を捉える事は困難であった。

## 2. 研究の目的

研究代表者のグループで所有する DT-ALPHA 装置において生成したヘリウム再結合プラズマに対し、再結合フロントからエンドプレートまでの領域で電子温度および電子密度の磁力線方向分布を計測可能な長尺ラングミュアプローブを設計・製作し、長尺プローブを用いて再結合フロント下流域での電子温度増加の全体像を捉えることを目的とした。

## 3. 研究の方法

東北大学の高周波プラズマ源 DT-ALPHA を用いて実施した。前述した目的を遂行する上で解決すべき課題を 2 項目に分類して進めた。各項目に対する研究方法は以下の通りである。

### (1) 長尺ラングミュアプローブの設計・製作

DT-ALPHA 装置は全長 2 m の小型の直線装置である。上流から下流に向けて  $z$  軸を定義しており、軸方向位置は  $z$  座標を用いて指定される。典型的な実験条件では再結合フロントは  $z=1.43$  m に生成され、プラズマが終端するエンドプレートは  $z=1.85$  m 付近に設置されている。この約 0.4 m の領域の電子温度および電子密度をラングミュアプローブで計測した。ラングミュアプローブとしては比較的表面積の小さいシングルプローブおよびダブルプローブを採用し、形状としては直線型とした。ここで、DT-ALPHA には  $z=1.13-1.28$  m,  $1.28-1.43$  m,  $1.58-1.85$  m にコンダクタンス制限用のオリフィスユニット(内径 20 mm)が設置されている。エンドプレートからプローブを挿入して再結合フロントまでを計測するためには、オリフィスユニットに接触させる事なくプローブを駆動させる必要がある。プラズマ中を 0.4 m 程度の長さで渡り計測を行うためのプローブ長は 1 m 程度となるが、DT-ALPHA ではこれまで長尺プローブを製作・運用した先行研究はなく、それを実現するための課題点の洗い出しから着手した。

### (2) 再結合フロントからエンドプレートにかけてのプローブ計測

本研究ではヘリウム再結合プラズマを計測対象とした。 $z=1.43$  m に再結合フロントを生成し、(1)で製作した長尺シングルプローブと長尺ダブルプローブを  $z$  軸方向に駆動して電子温度および電子密度の磁力線方向分布を得た。再結合フロントの下流域で広範囲な計測を実施し、DT-ALPHA を含む複数の装置で兆候が観測されている電子温度増加の全体像を捉えた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 長尺ラングミュアプローブの設計・製作

本研究ではラングミュアプローブを  $z$  軸方向に駆動し再結合フロントからエンドプレートまでの間の電子温度および電子密度の磁力線方向分布を得た。前述したように DT-ALPHA には内径 20 mm のオリフィスユニットが設置されており、オリフィスユニットに接触しないプローブ形状や駆動方法を検討する必要がある。そのような駆動が可能なプローブの形状としては、図 1 に示すように直線型もしくは L 字型が考えられる。ラングミュアプローブによるプラズマ計測ではプラズマに浸るプローブの表面積が小さいほど低擾乱であり望ましい。従ってプラズマ計測の観点からは L 字とする事が望ましいが、オリフィスユニットを通過させる事が困難となる。L 字とする事で  $z$  軸分布だけでなく  $xy$  平面での分布も得る事ができるが、オリフィスに衝突する事なく角度を調節する事が容易ではないという課題点もある。そこで上記の課題を回避するために本研究では直線型のプローブを採用する事にした。最も典型的なラングミュアプローブは 1 つの電極から成るシングルプローブである。このシングルプローブを再結合/非接触プラズマへ用いた場合、電流-電圧特性に異常性が生じ電子温度が過大評価される事が知られているが [2], 1 eV を下回る温度でも計測が可能であるとの報告もある。2 つの電極から成るダブルプローブでは再結合/非接触プラズマの計測が可能であり、トムソン散乱計測と良好に一致するという報告がある [3]。長尺プローブの運用実績を積むこと、再結合フロント以外の領域ではシングルプローブでの計測も可能であることの 2 点から、まず初めに長尺シングルプローブを設計・製作・運用し、長尺プローブの課題点を洗い出したのちにダブルプローブの設計に取り組む事とした。

図 2 に示すのは設計・製作した長尺シングルプローブである。アルミナ絶縁管・エンドプレート・フランジ・プローブシャフト・ゲージポートから構成される。エンドプレートの中心には 16 mm の穴が設けられており、プローブが貫通できる構造となっている。アルミナ絶縁管部はプラズマへの擾乱を低減し、また自重によるたわみを回避するために段階的に径を細くする構造とした。エンドプレートに近い側から  $\phi 4.0$  mm x 2.0 mm,  $\phi 1.5$  mm x 1.0 mm,  $\phi 0.8$  mm x 0.4 mm の絶縁管を用い、 $\phi 0.8$  mm x 0.4 mm の絶縁管の先端からモリブデン線が露出している。長尺プローブによる再結合プラズマの計測結果は後述するが、長尺プローブを運用するに当たっての課題点として以下が明らかとなった。

- ① エンドプレートと長尺プローブの同軸の維持が困難でありプローブの挿入に伴いプローブ先端が周辺部へ偏ること
- ② ビューイングポートの設置位置や数の制限からプローブがエンドプレートやオリフィスを貫通する様子を観察する事が困難であること
- ③ プローブシャフトと絶縁管を固定するアダプタ(SUS 製)がプラズマと接触する可能性があること

この知見を踏まえて製作した長尺ダブルプローブを図 3 へ示す。①の原因の一つは絶縁管組み立て時の同軸のズレである。そこで絶縁管組立時に同軸が維持されるような治具を製作する事で①への対応とした。②は安全に長尺プローブを運用する上で大きな課題である。DT-ALPHA のエンドプレートは六方管内に設置されており、六方管側面にはビューイングポート(ICF152)が取り付けられている(図 1 参照)。しかし長尺シングルプローブの構造では六方管側面のビューイングポートからエンドプレートに設けた穴を視認する事が困難であったため、長尺ダブルプローブではエンドプレート支持柱の長さを短くする工夫を行った。また、図 3 に示すようにフランジに 4 つのビューイングポート(ICF34)を設ける事によって  $z$  軸方向からもプローブが挿入される様子を確認できる構造とした。③に対してはアダプタの材質をステンレスからセラミックに変更する事で対応した。シングルプローブと同じくダブルプローブの絶縁管も段階的に細くする構造を採用し、 $\phi 4.0$  mm x 3.0 mm,  $\phi 2.8$  mm x 0.7 mm,  $\phi 0.5$  mm x 0.2 mm の絶縁管を採用した。

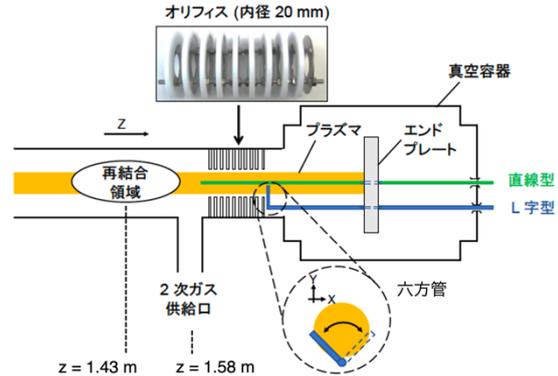


図 1. DT-ALPHA における再結合フロントおよびエンドプレート周辺概念図。

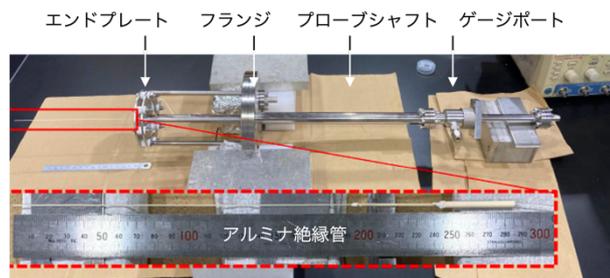


図 2. 設計・製作した長尺シングルプローブ

$\phi 0.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  の絶縁管先端からは  $1.0 \text{ mm}$  程度のモリブデン線が露出している。計測対象とするプラズマの直径が  $20 \text{ mm}$  程度である事を踏まえ、モリブデン線同士の間隔は  $1.5 \text{ mm}$  とした。

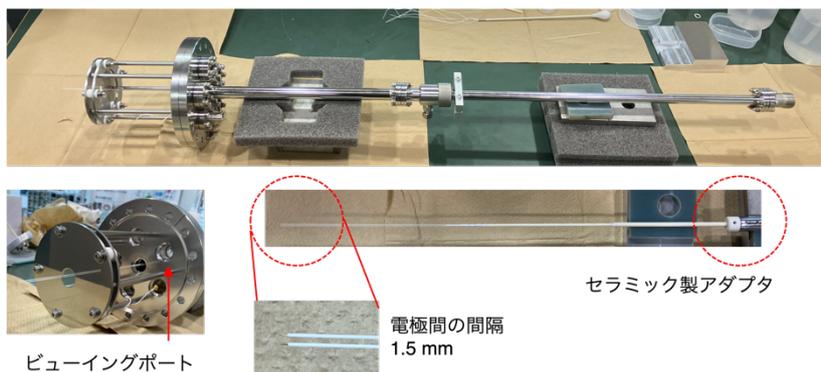


図3. 設計・製作した長尺ダブルプローブ.

## (2) 再結合フロントからエンドプレートにかけてのプローブ計測

DT-ALPHA においてヘリウム再結合プラズマを生成し再結合フロント下流からエンドプレートにかけての計測を行った。前述したように再結合フロントは  $z = 1.43 \text{ m}$  に形成され、エンドプレートは  $z = 1.85 \text{ m}$  付近に設置されている。また  $z = 1.58 \text{ m}$  から  $1.85 \text{ m}$  にかけてはオリフィスユニットが設置されている。図4に示すのは長尺シングルプローブで計測した電子温度・電子密度の磁力線方向分布である。シングルプローブを用いた非接触/再結合プラズマの計測では電流-電圧特性の異常性が知られている事から、再結合フロントは計測対象に含めず  $z = 1.6 \text{ m}$  程度までにとどめる事とした。図4(左)

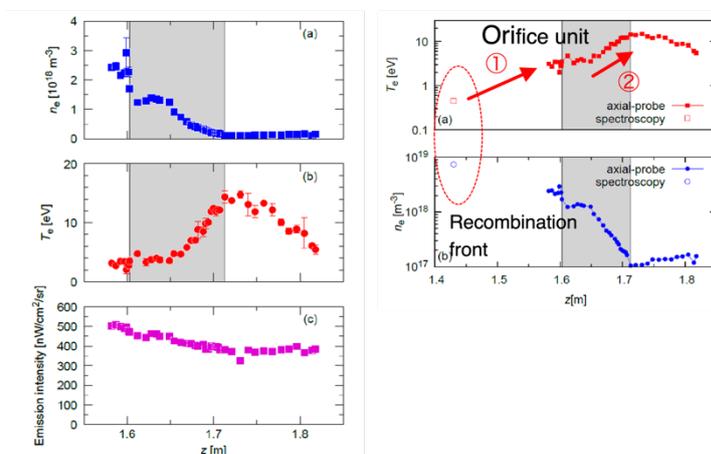


図4. 長尺シングルプローブで計測した電子温度および電子密度の軸方向分布。(右)は再結合フロントにて分光で取得した値も含めたものである。

は上から順に電子温度・電子密度・ $2^3\text{P}-9^3\text{D}$  遷移の発光強度である。横軸は長尺シングルプローブの位置を示す。 $2^3\text{P}-9^3\text{D}$  は三体再結合に由来するヘリウム原子の遷移で、この発光は再結合フロント形成位置である  $z = 1.43 \text{ m}$  で分光器により取得したものである。プローブ位置によらずほぼ一定の発光強度であり、プローブが深く挿入されても再結合フロントが維持されている事を示している。図4(左)において  $z = 1.58 \text{ m}$  での電子温度は  $2\text{--}3 \text{ eV}$  であり、再結合が消失している事を示唆する結果である。そこで、同様の実験を行い  $z = 1.43 \text{ m}$  と  $1.58 \text{ m}$  とで同時に発光スペクトルを取得した結果が図5である。図5(左)の横軸は波長、縦軸は空間、色は発光強度を表わす。 $z = 1.43 \text{ m}$  に設置した視線では三体再結合に伴う線スペクトル( $2^3\text{P}-n^3\text{D}$ ,  $n$  は主量子数)が  $1000$  から  $1100$  ピクセルに確認できるが、 $1.58 \text{ m}$  に設置した視線では消失している事が分かる。これを空間方向に積分したものが図5(右)である。 $z = 1.43 \text{ m}$  で出現する線スペクトル群(水色で示した領域)が  $1.58 \text{ m}$  では消失している事が分かる。分光計測によって僅か  $0.15 \text{ m}$  の間で再結合が消失する事が確認でき、図4と矛盾しない結果が得られた。 $z = 1.43 \text{ m}$  では  $2^3\text{P}-9^3\text{D}$  のような線スペクトルに加えて放射再結合による連続スペクトルも観測された。連続スペクトルから解析された電子温度と電子密度はそれぞれ 約  $0.4 \text{ eV}$  および  $8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  であった。これらの値を含めて図4(左)をプロットしたものが図4(右)である。図4(右)の①に示すように、 $z = 1.43 \text{ m}$  から  $1.58 \text{ m}$  にかけて数  $\text{eV}$  の温度上昇が発生している事が分かる。参考文献1では計測点が  $1.58 \text{ m}$  に限定されていたが、本研究によりその周囲の点も計測可能となり、 $z = 1.58 \text{ m}$  周辺で数  $\text{eV}$  の値が連続的に分布している事が確かめられた。 $z = 1.58 \text{ m}$  から  $1.7 \text{ m}$  にかけて電子温度は単調に増加する傾向を見せるが、②で示すようにオリフィスユニット中央部で増加率が急激に増加する点の確認された。 $z = 1.7 \text{ m}$  よりも下流からエンドプレートにかけて電子温度は単調に減少した。電子密度に関しては、再結合フロントからエンドプレートに向けて単調減少傾向である。 $z = 1.6 \text{ m}$  付近で急激な現象を示すが、この点はオリフィスユニットの上流端に対応する。オリフィスによってプラズマが削られた事により電子密度が低下したものと考えられる。オリフィスユニットの上流付近では電子密度は大きく変化しないが、上で述べた②点において急激な減少が確認さ

れた。オリフィスユニット下流端からエンドプレートにかけては電子密度は大きく変化せず  $10^{17}$   $\text{m}^{-3}$  程度で一定であった。

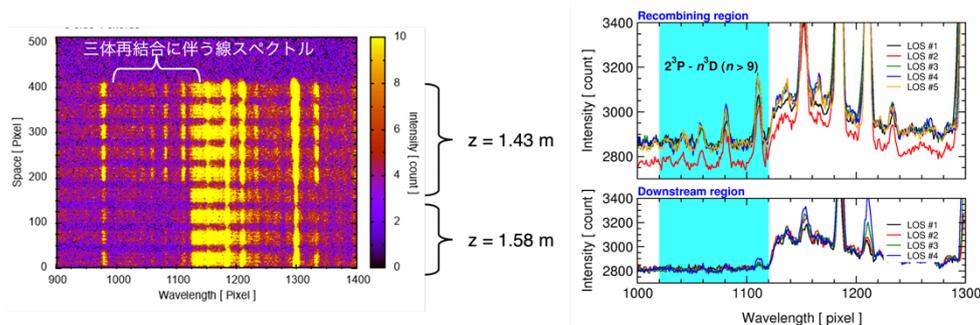


図5. 再結合フロントおよびその下流領域で同時計測したプラズマ発光スペクトル。左図のイメージングデータを空間方向に積分したものが右図である。

上で述べたように、再結合フロント下流における電子温度の増加は①と②の2段階に分けて進行するという結果が得られた。①については(i)体積再結合による低エネルギー電子の枯渇[1]、(ii)再結合プラズマと電離進行プラズマ間の遷移[4]、(iii)三体再結合によるバルク電子の加熱[5]などの影響が考えられる。また、DT-ALPHAでは2電子温度プラズマが生成される事から、(iv)高温電子とバルク電子との温度緩和が進行した事で温度増加が引き起こされている可能性もある。(i)に関しては電子エネルギー分布関数を得る事で評価できるものと考えられ、その取り組みを進めている。(ii)に関しては浮遊電位もしくはイオン飽和電流の時間発展から評価できる可能性がある。三体再結合によるバルクプラズマの加熱効果は0.5 eV程度である事から、(iii)の影響は限定的であると考えられる。また、高温電子とバルク電子の温度緩和時間を見積もると閉じ込め時間よりも十分に長いことから(iv)の影響も限定的であると考えている。

図6は2段階目の温度増加②が観測された領域を拡大し、かつ磁束密度の分布と比較したものである。2段階目の温度増加が開始する点は磁束密度が低下する点に対応している事が分かる。また電子温度と電子密度の積である電子静圧は単調に減少している事が分かる。動圧も含めて議論する必要があるが、2段階目の温度の増加は電子圧力の保存ではなく、磁場構造に起因するものではないかと考えられる。この可能性を検証するため、磁場構造(勾配の大きさや位置)を変更した実験を進めているところである。

図4および図6で得られた長尺シングルプローブ運用時の課題点や計測結果を踏まえて図3に示す長尺ダブルプローブの設計・製作し、同様の実験を行った。しかしながら図4に示したような位置依存性は明確には確認されず、再結合フロントからエンドプレート近傍にかけて15-20 eV程度の電子温度が得られた。再結合フロントでは再結合に伴う線・連続スペクトルが得られている事から、長尺ダブルプローブでの計測が適切に行われていなかった可能性がある。この結果への対応策として、電流-電圧特性の解析方法を参考文献3に記されている方法へ変更する計画である。また、現在のダブルプローブ測定回路はフローティング電源により回路と装置とを絶縁しているが、絶縁トランスを用いた回路に変更する事も検討している。本研究で使用したダブルプローブはDT-ALPHAでこれまで運用されたどのプローブよりも長尺であるため、高周波ノイズの混入や電線同士のクロストークが懸念される。プローブサイズは大きくなるが絶縁管内に金属製のパイプを設置し高周波ノイズを減衰させる事も並行して検討している。

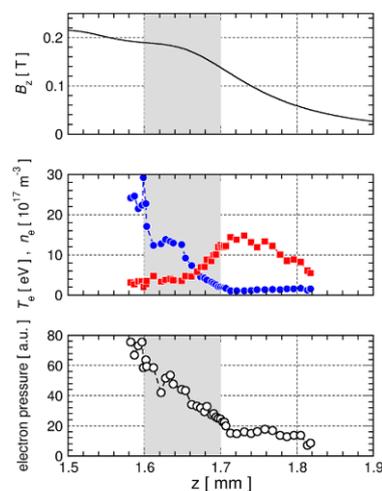


図6. (上)磁束密度、(中)電子温度および電子密度、(下)電子静圧の軸方向分布。

## 参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, *Physics of Plasmas* **29**, 032508 (2022).
- [2] N. Ezumi *et al.*, *Contributions to Plasma Physics* **38**, S 31 (1998)
- [3] Y. Hayashi *et al.*, *Contributions to Plasma Physics* **59**, e201800088 (2019).
- [4] Tanaka *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **62**, 075011 (2020).
- [5] Tanaka *et al.*, *Physics of Plasmas* **27**, 102505 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 KAGAYA Shigetaka, TAKAHASHI Hiroyuki, SEINO Tomohiro, YOSHIMURA Keigo, NISHIMURA Ryota, KANNO Akihiro, TAKAHASHI Yusaku, HARA Tomoya, OISHI Tetsutarou, MATSUYAMA Akinobu, TOBITA Kenji	4. 巻 19
2. 論文標題 Determination of Parallel and Perpendicular Ion Temperatures Based on Selective Ion Transmission in a Retarding Field Analyzer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201021 ~ 1201021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.19.1201021	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., Seino T., Nishimura R., Yoshimura K., Kanno A., Hara T., Takahashi Y., Kagaya S., Matsuyama A., Hayashi Y., Tobita K.	4. 巻 30
2. 論文標題 Impact of selective ion transmission on measurement by retarding field analyzer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 053506-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0144798	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋宏幸, 清野智大, 吉村溪冴, 西村涼汰, 菅野耀広, 原智也, 高橋優作, 松山顕之, 飛田健次
2. 発表標題 磁力線に対して垂直方向の速度成分を持つイオンの混入がRetarding field analyzerを用いた平行方向イオン温度計測に及ぼす影響の検証
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 吉村溪冴, 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰, 菅野耀広, 高橋優作, 原智也, 松山顕之, 飛田健次
2. 発表標題 直線型プラズマ装置DT-ALPHAにおける水素バルマー系列線の中性粒子圧力応答
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 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰, 吉村溪汰, 菅野耀広, 原智也, 高橋優作, 松山頭之, 飛田健次
2. 発表標題 円形アパチャーを有したRetarding field analyzerを用いた平行および垂直方向イオン温度の同時推定
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村溪汰, 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰, 菅野耀広, 高橋優作, 原智也, 松山頭之, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHAにおける水素分子振動・回転温度の中性粒子圧力依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------