

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01883

研究課題名（和文）実験室プラズマで解き明かす非接触ダイバータの構造形成過程と非定常ダイナミクス

研究課題名（英文）Study on structure formation and non-steady-state dynamics of detached divertor by laboratory plasma experiments

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：DT-ALPHAで水素分子活性化再結合(MAR)プラズマ形成時特有の挙動を観測した。基底水素分子の振動・回転分布計測手法を構築した。電子密度のロールオーバーにおいてイオン交換に起因するMARが主要な役割を果たす事を示した。体積再結合による低エネルギー電子の枯渇が電子エネルギー分布を歪める可能性を指摘した。Retarding field analyzerの速度選択性を活用し磁力線平行・垂直方向イオン温度を同時に得る方法を提案した。運動論的計算とレート方程式に基づく解析からイオン源内の水素イオン比を改善する運転条件を調べた。高エネルギーイオンビームを背景プラズマから分離して計測する手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波放電装置において、水素分子活性化再結合プラズマの生成および背景プラズマから分離した高エネルギーイオンビームの計測を可能とした。既存の装置では高エネルギーイオン衝突が引き起こす励起水素原子・分子の生成および消滅過程を研究する事は困難であったが、それを可能とする環境の構築に成功した。また、体積再結合の進展に伴い電子エネルギー分布に歪みが生じ得る事や、単一の計測器で異なる2方向のイオン温度を得る可能性を示した。得られた結果や開発したプラズマ計測手法は実験装置に制限されない成果であり、核融合エネルギーの利用実現に向けた課題であるダイバータの熱制御性能の改善のための研究に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The unique behavior attributed to hydrogen molecular activated recombination (MAR) was observed in the DT-ALPHA device. A method for measuring rotational and vibrational distributions of hydrogen molecules based on the hydrogen molecular spectroscopy was developed. It was confirmed that the MAR attributed to ion conversion reaction played important role in rollover of the electron density. It was indicated that depletion of low-energy electrons due to volumetric recombination could deform electron energy distribution. By utilizing the selective ion transmission of retarding field analyzers, a method for determining parallel and perpendicular ion temperatures was proposed, and its validity was investigated experimentally. Operating conditions for improving proton ratio in an ion beam source was analyzed by combing a kinetic code simulation and rate equations for hydrogen ions. A method for measuring energetic ion beam penetrating in a bulk plasma was developed.

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 電子#8211;イオン再結合 分子活性化再結合 高周波プラズマ DT-ALPHA 高エネルギーイオン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉を構成する機器のうち、閉じ込め領域から漏れ出したプラズマが終端する機器をダイバータと呼ぶ。ダイバータに対する熱負荷や粒子負荷の低減が大きな課題であるが、核融合炉では非接触ダイバータ(非接触プラズマ)と呼ばれる運転モードによる制御が念頭に置かれている。非接触ダイバータの形成過程では電離の逆過程である体積再結合が重要な役割を持ち、体積再結合は電子-イオン再結合と分子活性化再結合とに大別される。

核融合原型炉の熱設計では非接触ダイバータを前提とした解析が行われるが、ダイバータプラズマコードによる非接触状態の再現性は必ずしも良好ではなく、実験を通して非接触化過程における粒子バランスやエネルギーバランスを解き明かす必要性が指摘されている。しかしながら、比較的計測が容易な電子だけでなくイオンや様々な励起状態にある中性粒子も含めた総合的な計測が必要となるため、計測の難しさが課題とされていた。

また、核融合炉では閉じ込め領域から間欠的に放出される高エネルギーイオン流が非接触ダイバータに流入するものと予想されている。突発的に発生する高エネルギーイオンの衝突効果を組み込んだダイバータプラズマコードは開発段階にあり、実験による研究が必要である。研究代表者の先行研究では高エネルギーイオンにより電子-イオン再結合の反応率が低下する事が指摘されていた[1]。分子活性化再結合に対しても同様の影響を及ぼすものと想定されるが、分子活性化再結合が強く進行するプラズマと高エネルギーイオンとの共存環境を実現可能な装置はこれまで存在せず、実験研究を阻む要因となっていた。

2. 研究の目的

本研究は研究代表者のグループで所有する DT-ALPHA 装置において、①既存装置では困難な分子活性化再結合が強く進展するプラズマと高エネルギーイオンとの共存環境を実現すること、②ダイバータプラズマの非接触化過程における粒子バランス・エネルギーバランスを解き明かすために電子・イオン・励起中性粒子の総合的な計測環境を確立す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小項目に分類し並行して進めた。各小項目に対する研究方法は以下の通りである。

(1) 電子・イオン・励起水素分子計測環境の構築

非マックスウェル的なエネルギー分布を持つ電子の計測手法は研究代表者の先行研究で完了していた[2,3]。そこで本研究ではイオンと励起中性粒子の計測環境の構築に注力した。Retarding field analyzer(RFA)に対して、イオンラーマー運動の効果が磁力線平行方向イオン温度の計測にどのような影響を及ぼすのかを明らかにした。小型 RFA を設計・製作し、低擾乱かつ空間電荷効果の影響を回避した計測を可能とした。水素 Fulcher- α 帯の発光強度から、電子基底状態にある水素分子の振動分布・回転分布を評価する手法を確立した。

(2) 体積再結合と電子エネルギー分布の関わり

可視分光と静電プローブを併用した計測をヘリウム再結合プラズマに対して実施し、電子温度・電子密度・電子エネルギー分布が磁力線方向にどのような構造を有するかを調べた。

(3) 水素分子活性化再結合プラズマ生成

磁場配位と中性粒子圧力を最適化することで高密度水素プラズマを生成した。生成された高密度プラズマに対して水素二次ガスを導入し水素分子活性化再結合を誘起した。(1)で開発した手法による計測を行い、水素分子活性化再結合の反応率を定量的に得た。

(4) 高エネルギーイオンの生成と計測

背景プラズマを貫通する高エネルギーイオン流を計測する手法を確立した。また、運動論的計算コードと水素イオンのレート方程式を組み合わせた解析を行い、高強度の水素イオン(H^+)ビームを生成するための最適なイオン源運転条件を探索した。

4. 研究成果

(1) 電子・イオン・励起水素分子計測環境の構築

本研究では Retarding field analyzer (RFA) に着目した。RFA は磁力線平行方向イオン温度(T_{\parallel})を計測するための機器で、プラズマ対向面にスリットを備えた構造が一般的である。しかし本研究ではイオン捕集量を増やすために円形のアパチャーを有する構造を念頭に置いた。このような RFA ではイオンラーマー半径・イオン案内中心・アパチャー半径の関係によってイオンが捕集されるか否かが決定される。ラーマー半径の大きさは垂直方向イオン温度(T_{\perp})と関わるため、

RFA で計測されるイオン電流は T_{\parallel} に加えて T_{\perp} にも依存する。その結果、速度空間で特定の条件を満たしたイオンのみが捕集される速度選択性が生じる。そこで、速度選択性が生じた場合 RFA で得られる電流-電圧特性 (I - V 特性) がどのように変化するかを解析した。図 1 は $T_{\parallel} = T_{\perp} = 1$ eV として計算した結果である。横軸はイオンエネルギー弁別用のグリッド電位を表す。図 1(a) は特定の案内中心位置および全ての案内中心位置に由来するイオン電流、図 1(b) はイオン電流の傾きから求める平行方向イオン温度である。図 1(a) 中の破線は速度選択性を考慮しない結果であるが、速度選択性が生じる事で I - V 特性の傾きが変化する事が分かる。その結果、図 1(b) に示すようにグリッド電位の小さい領域では T_{\parallel} が 1 eV を上回り、最大で 2 倍程度イオン温度を過大評価する事が分かった。しかしグリッド電位の大きい領域での傾きを利用する事で速度選択性の影響を回避できる事も分かった。

I - V 特性の形状が T_{\parallel} と T_{\perp} に依存する性質を逆手に取る事で、実験的に取得した I - V 特性と計算した I - V 特性とを比較する事によって RFA 単独で T_{\perp} を計測する方法を提案した。次いで RFA と Ion sensitive probe (ISP) を併用した実験を実施した。電子密度 $4.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 14 eV 程度の希薄なヘリウムプラズマを対象にした実験を行い、RFA からは $T_{\parallel} = 1.2$ eV および $T_{\perp} = 2.1$ eV が得られた。同じプラズマを ISP で計測したところ $T_{\perp} = 2.0$ eV が得られ、良い一致を確認した。RFA の速度選択性を逆手に取る事により T_{\parallel} に加えて T_{\perp} までも計測可能である事を示した。

水素分子活性化再結合 (MAR) の反応率を評価するためには、電子基底状態にある水素分子の振動・回転分布を計測する必要がある。そこで、水素分子の Fulcher- α 帯発光強度を用いた振動・回転分布計測手法を構築した。高分散分光器により (0-0)Q1 から (3-3)Q3 までの 12 本の線スペクトル計測し、その発光強度から振動・回転分布を得る事に成功した。振動・回転分布は振動温度・回転温度で特徴づける事ができるが、DT-ALPHA 装置の典型的な振動・回転温度はそれぞれ 3000 K と 400 K 程度であった。

(2) 体積再結合と電子エネルギー分布の関わり

DT-ALPHA 装置にヘリウム再結合プラズマを生成し、再結合フロントおよび再結合フロントから 0.15 m 下流 (以下では下流域と呼称) での計測を行った。結果は図 2 に示す通りである。横軸は下流域で計測した中性粒子の圧力である。図 2(a) に示すように高励起ヘリウム原子の発光は 6.5 Pa から 7.8 Pa で大きく、この圧力帯で再結合フロントが形成されている。再結合フロントでは体積再結合に伴うスペクトルが明確に確認でき、連続スペクトルから求めた電子温度と電子密度はそれぞれ 0.5 eV および $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度であった。ところが下流域では再結合スペクトルが消失する事が分かった。そこで静電プローブによる計測を行ったところ、図 2(b) に示すように 2 eV 程度の電子温度であった。DT-ALPHA のような装置では体積再結合は 1 eV 以下の低電子温度領域で進行する。従って、静電プローブの計測結果は再結合スペクトルの消失と矛盾しない結果である。このように、0.15 m 程度の間に磁力線方向に電子温度が 1 eV 以上増加する現象を観測した。そこで、再結合に伴う低エネルギー電子の枯渇に着目してヘリウム衝突・輻射コードを用いた解析を行った。図 3 に示すように、静電プローブで計測された電子温度の値は枯渇後の電子の平均エネルギーやそこから求める実効的な電子温度と近い値を示した。体積再結合に伴う低エネルギー電子の枯渇が電子エネルギー分布を変化させる事や、見かけの電子温度の上昇を生じる可能性を指摘した。

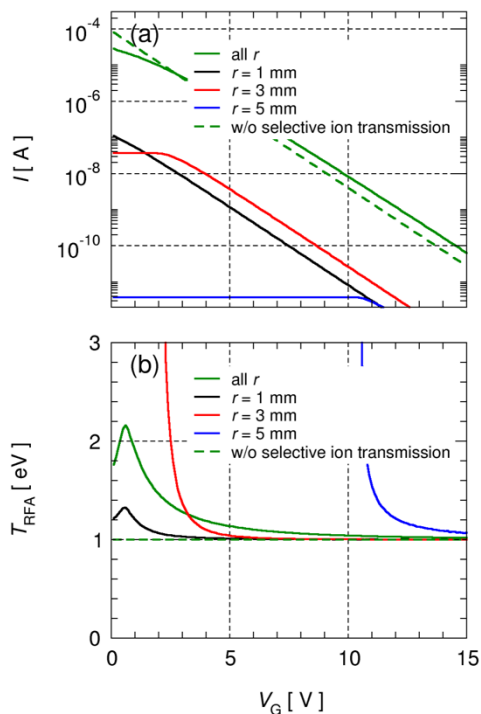


図 1. 速度選択性が電流-電圧特性に与える影響。

RFA の速度選択性を逆手に取る事により T_{\parallel} に加えて T_{\perp} までも計測可能である事を示した。

水素分子活性化再結合 (MAR) の反応率を評価するためには、電子基底状態にある水素分子の振動・回転分布を計測する必要がある。そこで、水素分子の Fulcher- α 帯発光強度を用いた振動・回転分布計測手法を構築した。高分散分光器により (0-0)Q1 から (3-3)Q3 までの 12 本の線スペクトル計測し、その発光強度から振動・回転分布を得る事に成功した。振動・回転分布は振動温度・回転温度で特徴づける事ができるが、DT-ALPHA 装置の典型的な振動・回転温度はそれぞれ 3000 K と 400 K 程度であった。

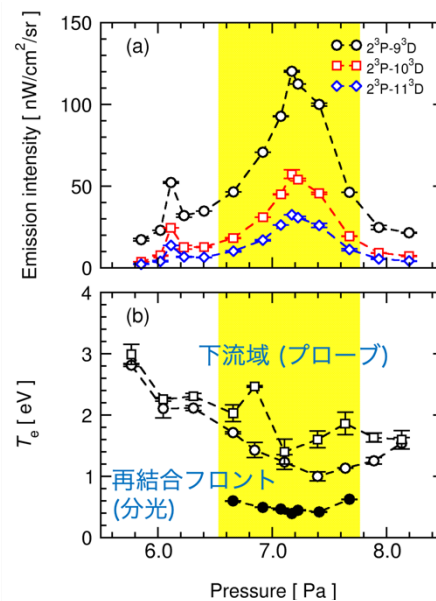


図 2. (a) 高励起 He 原子発光強度および (b) 電子温度の圧力依存性。

再結合に伴う低エネルギー電子の枯渇が電子エネルギー分布を変化させる事や、見かけの電子温度の上昇を生じる可能性を指摘した。

(3) 水素分子活性化再結合プラズマ生成

本項目は①磁場配位と中性粒子圧力の最適化による高密度水素プラズマの生成、および②水素二次ガス導入実験の2段階に分けて実施した。

まず①では、複数の磁場配位のもとで高周波アンテナ(RF)アンテナ近傍の電子密度を計測した。磁場配位が最適化されていない場合、1 kW 程度の RF 電力を用いてもアンテナ近傍の電子密度は 10^{16} m^{-3} を下回った。しかしアンテナ近傍で低域混成共鳴条件が満たされる場合、同じく 1 kW において 10^{17} m^{-3} を上回る電子密度を得る事に成功した。次いで、最適な放電圧力の探索にも取り組んだ。図 4 に示すのはアンテナ近傍で計測した電子温度・電子密度の放電圧力(p)依存性である。図 5(b)に示すように 10^{17} m^{-3} を超える電子密度を得るためには 0.8 Pa 程度の値が最適である事が判明した。 $p < 0.7 \text{ Pa}$ および $p > 1.2 \text{ Pa}$ では電子密度の値が急激に減少し、 10^{16} m^{-3} 以下程度になる事が分かった。

①を達成したのち②に取り組んだ。これまでの DT-ALPHA での二次ガス供給方法では供給量の多さや供給量の緻密な制御が課題である事が分かったため、水素ガス用マスフローコントローラーを二次ガス供給系に整備した。プラズマ生成部近傍の電子密度を 10^{17} m^{-3} に維持しつつ、二次ガス供給領域の圧力を 3.4 Pa まで増加させる事に成功した。その上で二次ガス供給領域の電子密度・電子温度のガス圧力依存性を調査したところ図 5 が得られた。圧力の増加に伴う電子温度の単調減少や電子密度のロールオーバーなど、分子活性化再結合プラズマ形成時特有の変化が得られた。DT-ALPHA で初めて水素分子活性化再結合の誘起に成功した。

(4) 高エネルギーイオンの生成と計測

高強度の水素イオン(H^+)ビームを生成するためには、イオンビーム源内部の H^+ 割合を改善する必要がある。そこで慶應大学で開発された KEIO-MARC コード[4]と水素イオンのレート方程式[5]を組み合わせた解析を行い、高い H^+ 割合を得るための最適な運転条件の探索を行った。まず我々が所有するバケット型イオン源の寸法・磁石配置・磁石表面での磁束密度を調査し、それを基にイオン源内部の磁場配位を計算した。この磁場やアーク電流等の放電条件をインプットパラメータとし、バケット内部の電子温度・電子密度の空間分布を KEIO-MARC で計算した結果の例が図 6 である。横軸がバケットの長手方向、縦軸がバケットの半径方向に対応する。装置内圧力・アーク電圧・アーク電流はそれぞれ 1 Pa, 80 V, 3 A である。電子密度の値はおよそ 10^{17} m^{-3} 程度で、バケット全体にほぼ一様に分布する事が分かった。電子密度と電子温度の値から参考文献 5 の方法によって水素イオン比($\text{H}^+ / (\text{H}^+ + \text{H}_2^+)$)を計算する事が可能である。ここで、参考文献 5 では電子温度・電子密度を一定と仮定していたが、我々は KEIO-MARC による計算結果と文献値 6 の断面データを用いて各電子温度に対する速度係数を計算する方法を採用した。水素イオン比の計算結果は図 7 のようになり、与えた放電条件の下では H^+ 割合が 10%程度である事が分かった。電子温度や電子密度に対する感度解析も実施し、数 eV の電子温度と 10^{18} m^{-3} 程度の電子密度とする事によって 50%に迫る H^+ 割合を実現できる事が分かった。

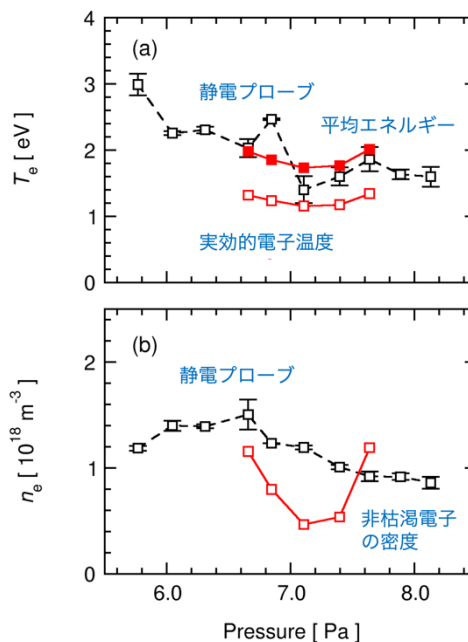


図 3. 再結合フロン下流域における(a)電子温度および(b)電子密度。

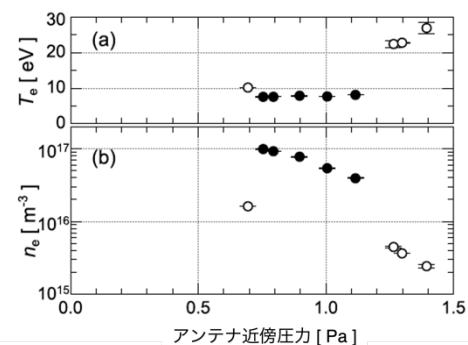


図 4. 高周波アンテナ近傍の(a)電子温度および(b)電子密度の圧力依存性。

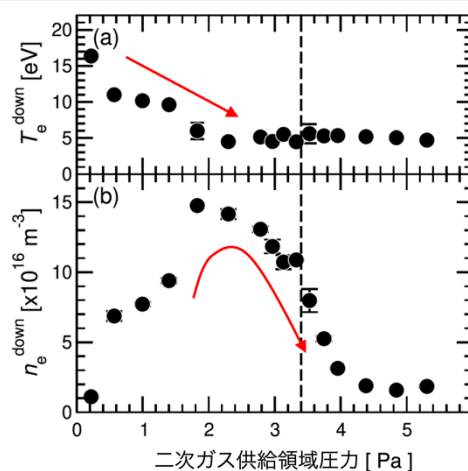


図 5. 二次ガス供給領域の(a)電子温度および(b)電子密度の圧力依存性。

体積再結合の反応率に対して高エネルギーイオンの衝突がどのような影響を及ぼすのかを明らかにするためには、プラズマを貫通するイオンビームの強度を実測する必要がある。そこで3枚のグリッドと1枚のコレクタから構成されるRFAを用いてイオンビームを背景プラズマから分離して計測する手法を構築した。プラズマ対向側からGrid 3, Grid 2, Grid 1と呼称し、それぞれの電位を $V_{G3} = V_f$, $V_{G2} = 50 \text{ V}$, $V_{G1} = -350 \text{ V}$ とした場合の計測結果を図8に示す。横軸は時間を表し、時刻 $t = 2\text{--}5 \text{ s}$ にかけてイオンビームを生成した。縦軸はRFAで計測された電流である。図8(a)はプラズマ生成を行わない場合の計測結果であるが、イオンビーム生成と同期して $1 \mu\text{A}$ 程度の電流が得られている事が分かる。図6(b)はプラズマ生成を行った場合の計測結果である。 $t < 2 \text{ s}$ で $0.5 \mu\text{A}$ 程度の信号が計測されているが、バルクイオンの流入によるものと考えられる。イオンビーム生成が開始される $t = 2 \text{ s}$ 以降、コレクタ電流は $0.3 \mu\text{A}$ 程度の増加を示す。背景プラズマと分離したイオンビーム計測を行う事ができたが、ビーム電流値はプラズマ生成の無い場合の $1/3$ 程度であった。背景プラズマの電子密度を変更してプラズマの有無によるイオンビーム電流の差を調査したところ、差は背景プラズマの電子密度に依存する事が分かった。このことから、背景プラズマによってイオンビームの空間電荷効果が中和される可能性が示唆された。

参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, Physics of Plasmas **23**, 112510 (2016).
- [2] H. Takahashi *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **57**, 322 (2017).
- [3] H. Takahashi *et al.*, Physics of Plasmas **26**, 033506 (2019).
- [4] I. Fujino *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A510 (2008).
- [5] Y. Okumura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **55**, 1 (1984).
- [6] R. K. Janev, D. Reiter, U. Samm. Collision processes in low-temperature hydrogen plasmas. FZJ Report. 2003;Juel-4105.

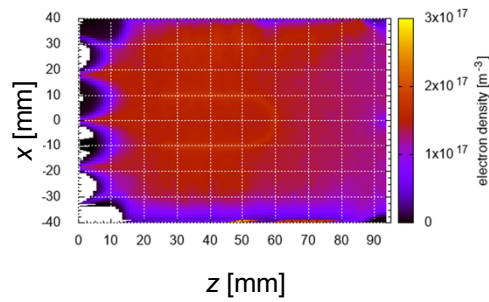


図 6. KEIO-MARC で計算したイオン源内部の電子密度の空間分布。

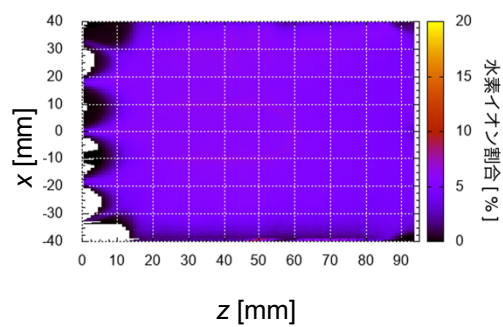


図 7. レート方程式をもとに計算した水素イオン割合。

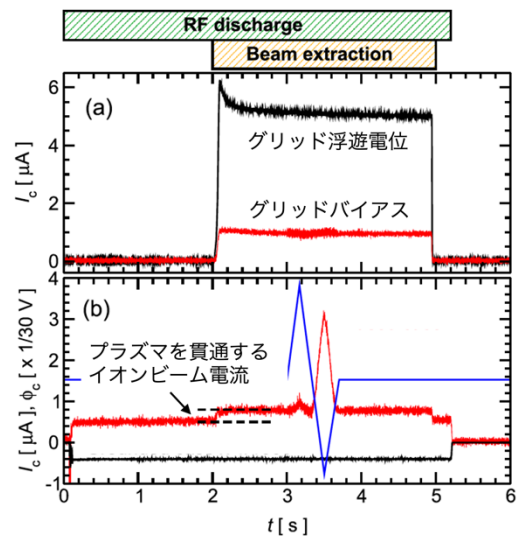


図 8. RFA で計測した(a)背景プラズマが無い場合と(b)ある場合のイオンビーム電流。

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 7件）

1. 著者名 YOSHIMURA Keigo, TAKAHASHI Hiroyuki, SEINO Tomohiro, KUSABIRAKI Kaoru, SAKATA Yuki, NISHIMURA Ryota, MATSUYAMA Akinobu, TOBITA Kenji	4. 巻 17
2. 論文標題 Observation of Electron Density Rollover in Hydrogen Plasma Produced with DT-ALPHA Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201082 ~ 1201082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1201082	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 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 -

1. 著者名 Nishimura Ryota, Seino Tomohiro, Yoshimura Keigo, Takahashi Hiroyuki, Matsuyama Akinobu, Hoshino Kazuo, Oishi Tetsutarou, Tobita Kenji	4. 巻 7
2. 論文標題 Spatial Distribution Analyses of Axially Long Plasmas under a Multi-Cusp Magnetic Field Using a Kinetic Particle Simulation Code KEIO-MARC	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma	6. 最初と最後の頁 64 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plasma7010005	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 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., 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Hiroyuki, Okamoto Atsushi, Kitajima Sumio, Tobita Kenji	4. 巻 10
2. 論文標題 Development of an ion beam measurement instrument for divertor simulation experiments in radio-frequency plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 085018 ~ 085018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009321	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 SEINO Tomohiro, TAKAHASHI Hiroyuki, BOONYARITTIPOONG Peerapat, SAIKYO Takeshi, OGASAWARA Kenta, OKAMOTO Atsushi, KITAJIMA Sumio, TOBITA Kenji	4. 巻 15
2. 論文標題 Dependence of Plasma Parameters in Hydrogen Discharges on Magnetic Field Configuration and Neutral Pressure in the DT-ALPHA Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201056 ~ 1201056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.1201056	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 H. Takahashi, R. Nishimura, T. Seino, K. Yoshimura, A. Kanno, T. Hara, Y. Takahashi, T. Oishi, A. Matsuyama, K. Tobita, K. Hoshino
2. 発表標題 Evaluation of proton density ratio in a bucket-type ion source based on kinetic code plasma simulation and rate equation for hydrogen ions
3. 学会等名 Global Plasma Forum in Aomori (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Yoshimura, H. Takahashi, T. Seino, R. Nishimura, A. Kanno, Y. Takahashi, T. Hara, S. Kagaya , T. Oishi, A. Matsuyama, K. Tobita
2 . 発表標題 Analysis of Molecular Activated Recombination in Hydrogen Plasma Produced in Radio Frequency Plasma Source DT ALPHA
3 . 学会等名 Global Plasma Forum in Aomori (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Takahashi, T. Seino, K. Yoshimura, R. Nishimura, S. Kagaya, Y. Takahashi, A. Kanno, T. Hara, A. Matsuyama, T. Oishi, K. Tobita
2 . 発表標題 Determination of Ion Temperature Parallel and Perpendicular to Magnetic field by Retarding Field Analyzer Based on Selective Ion Transmission
3 . 学会等名 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Yoshimura, H. Takahashi, T. Seino, R. Nishimura, A. Kanno, Y. Takahashi, T. Hara, T. Oishi, A. Matsuyama, K. Tobita
2 . 発表標題 Production of Hydrogen Molecular Activated Recombining Plasma in Radio Frequency Plasma Source DT ALPHA
3 . 学会等名 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Takahashi, Y. Sakata, T. Seino, K. Kusabiraki, W. Muhammad Naufal, K. Yoshimura, R. Nishimura, P. Boonyarittipong, S. Kitajima, K. Tobita, A. Matsuyama, A. Okamoto
2 . 発表標題 Parallel and perpendicular ion temperature measurement in divertor simulating plasma produced with RF discharge
3 . 学会等名 25th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Takahashi, M. N. Winarto, P. Boonyarittipong, T. Seino, K. Kusabiraki, Y. Sakata, K. Yoshimura, R. Nishimura, S. Kitajima, K. Tobita, A. Okamoto, A. Matsuyama
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 加賀谷重考, 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰, 吉村溪冴, 菅野耀広, 原智也, 高橋優作, 大石鉄太郎, 松山顕之, 飛田健次
2. 発表標題 Retarding Field Analyzerにおける速度選択性を利用した2方向イオン温度の同時計測手法の構築
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024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, 加賀谷重考, 松山顕之, 大石鉄太郎, 飛田健次, 澤田圭司
2. 発表標題 水素イオン温度計測と衝突・輻射モデルに基づくDT ALPHAの水素プラズマにおけるIC-MAR反応率評価
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加賀谷重考, 高橋宏幸, 清野智大, 吉村溪冴, 西村涼汰, 菅野耀広, 高橋優作, 原智也, 大石鉄太郎, 松山顕之, 飛田健次
2. 発表標題 Retarding Field Analyzerにおけるイオン選択性を用いた磁力線垂直方向イオン温度計測手法の検証
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋宏幸, 西村涼汰, 清野智大, Boonyarittipong Peerapat, 吉村溪冴, 菅野耀広, 原智也, 高橋優作, 大石鉄太郎, 松山顕之
2. 発表標題 KE10-MARCコードに基づくマルチカスプ型磁場配位イオン源における水素イオン比向上方法の検討
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉村溪冴, 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰A, 菅野耀広, 高橋優作, 原智也, 松山顕之, 大石鉄太郎, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHAにおけるダイバータ模擬水素プラズマ中のイオン温度計測
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023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 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年物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村涼汰, 清野智大, 吉村溪冴, 菅野耀広, 高橋優作, 原智也, 高橋宏幸, 松山顕之, 星野一生, 飛田健次
2. 発表標題 多重極カスプ磁場を用いた直線プラズマ装置の概念研究
3. 学会等名 日本物理学会2023年物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋宏幸, 清野智大, 西村涼汰, 吉村溪冴, 菅野耀広, 原智也, 高橋優作, 松山顕之, 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 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, 草開薫, 清野智大, 坂田裕紀, Muhammad Naufal Winarto, 吉村溪冴, 西村涼汰, Boonyarittipong Peerapat, 飛田健次, 松山顕之, 岡本敦
2. 発表標題 高周波プラズマ源DT-ALPHA における水素原子線および分子線分光を組み合わせた水素原子密度の評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村溪冴, 高橋宏幸, Boonyarittipong Peerapat, 清野智大, 草開薫, 坂田裕紀, Muhammad Winarto Naufal, 西村涼汰, 北島純男, 飛田健次, 松山顕之, 岡本敦
2. 発表標題 DT-ALPHA における中性粒子圧力制御性の改善と圧力制御下の水素原子線計測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋宏幸, Muhammad Naufal Winarto, Boonyarittipong Peerapat, 清野智大, 草開薫, 坂田裕紀, 吉村溪冴, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHA におけるヘリウム再結合プラズマの空間分布計測
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 高橋宏幸, Boonyarittipong Peerapat, 清野智大, 草開薫, 坂田裕紀, Muhammad Naufal Winarto, 吉村溪冴, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 高周波プラズマ源DT-ALPHAにおける水素ガスバフプラズマの原子分子線計測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋期大会
4. 発表年 2020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	飛田 健次 (Tobita Kenji) (50354569)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	岡本 敦 (Okamoto Atsushi) (50396793)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	木崎 雅志 (Kisaki Masashi) (70598945)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	削除：2021年1月14日

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