

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14895

研究課題名（和文）ダイバータ熱流予測性能向上のための高速水素イオン衝突時の水素粒子生成消滅過程解明

研究課題名（英文）Production and extinction processes of hydrogen particles caused by energetic hydrogen ion impact for improvement of divertor heat load prediction

研究代表者

高橋 宏幸 (Takahashi, Hiroyuki)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：30768982

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め核融合炉では高エネルギーのイオンが閉じ込め領域から周期的に放出される。非接触ダイバータは体積再結合で維持されるため、高エネルギーイオンの流入による体積再結合反応率の低下が懸念されている。そこで高周波プラズマ源DT-ALPHAとイオンビーム源を併用したビーム重畳実験による調査を実施した。高エネルギーイオン衝突が励起水素原子・分子の生成・消滅過程を変化させる事を明らかにした。ダイバータ模擬プラズマの電子・イオンの診断技術開発にも取り組んだ。非マックスウェル分布を持つプラズマに対してボルツマンプロット法を用いると電子温度と電子密度が著しく過小評価される事を数値計算と実験によって実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波プラズマとイオンビーム源を併用する事でダイバータプラズマの模擬が可能である事を示した。ダイバータに周期的に流れ込む高エネルギーイオンが励起水素粒子の生成・消滅過程に対して無視できない影響を及ぼす事を明らかにした点に学術的意義がある。また、非マックスウェル分布プラズマに対してボルツマンプロット法を適用すると電子温度や電子密度が著しく過小評価される事を示した。核融合炉ダイバータに限らず、体積再結合が進展するような低温・高密度プラズマに対してボルツマンプロット法を適用する場合に、電子エネルギー分布関数の形状によっては再結合反応率の過大評価に陥る事を計算と実験で実証した点も学術的に意義深い。

研究成果の概要（英文）：In magnetically confined fusion reactors, energetic ions are periodically exhausted from confinement region and transported into divertor region. Detached divertor is sustained by plasma volumetric recombination. So there is a concern that reaction rate of volumetric recombination is decreased by periodic energetic ion inflow. But such study has not been conducted enthusiastically. We performed ion beam injection experiments using the DT-ALPHA device and an ion beam generator to simulate transient divertor plasma behavior. It was confirmed that energetic ions could change production and extinction rates of excited hydrogen atoms and molecules. In addition, we developed electron and ion diagnostic techniques. It was demonstrated that the Boltzmann plot method considerably underestimates both electron temperature and electron density when it is utilized for non-Maxwellian plasma diagnostics. This results in overestimation of volumetric recombination rate in divertor plasma.

研究分野：核融合炉ダイバータプラズマ

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 高エネルギーイオン 高周波プラズマ源 イオンビーム源 DT-ALPHA

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では閉じ込め領域から漏れ出したプラズマや不純物粒子がダイバータ板に集中するため、ダイバータの熱負荷は数十 MW にのぼると見積もられている。そのためダイバータ板の受熱量を制御する手法の開発が重要な課題として認識されている。最も有望な手法は、ダイバータ板前面で体積再結合を引き起こし、ダイバータ板とプラズマとが隔離された状態である非接触ダイバータを形成する熱制御である。現在核融合原型炉の概念設計が進められているが、原型炉でも非接触ダイバータの形成が念頭に置かれている。

核融合の熱設計活動は数値シミュレーションにより行われる。しかし荷電粒子と中性粒子が強く結合するダイバータプラズマの時間発展を取り扱う事は容易ではなく、シミュレーションは定常状態に限られる事が多い。一方、核融合炉では閉じ込め領域から周期的に放出される高エネルギーのイオンが非接触ダイバータに流れ込む事が知られており、高エネルギーイオンの衝突による熱流制御性能の劣化が懸念される。ダイバータの非接触状態は分子活性化再結合(MAR)と電子-イオン再結合(EIR)により維持される。そのため、非定常的な振る舞いを解明するためには高エネルギーイオンの流入によって引き起こされる MAR・EIR 過程の反応率変化を明らかにする必要がある。ところが体積再結合が強く進展するプラズマ(再結合プラズマ)と高エネルギーイオンとの共存環境を実現する事は容易ではなく、高エネルギーイオンが引き起こす現象の実験的調査や定量化の試みは行われていなかった。

### 2. 研究の目的

MAR 過程と EIR 過程は最終的に励起状態原子を生成する。また、MAR 過程の一連の反応は振動励起状態の分子を起点としている。このことから、高エネルギーイオンが励起原子・励起分子の生成および消滅過程をどのように阻害もしくは促進するのかを実験的に調査する事を本研究課題の目的とした。

### 3. 研究の方法

核融合炉の燃料は水素同位体であるため実験には水素プラズマを用いた。しかし、水素プラズマの非接触化は MAR・EIR の両過程が競合して進行するため、それぞれの反応率を独立に調査する事は困難である事が予想された。そのため、本研究では EIR 過程に関する調査は単原子系であるヘリウムプラズマを用いる事とした。東北大学の高周波プラズマ源 DT-ALPHA に生成したダイバータ模擬プラズマに対してイオンビームを重畳するダイバータプラズマ模擬実験を実施した。MAR や EIR 過程の反応率はプラズマの温度・密度に強く依存する事から、観測対象となる再結合プラズマの診断技術の開発も行った。

具体的な実施項目は、(1)水素 MAR・EIR プラズマ生成に向けた水素プラズマの高密度化、(2)再結合反応率を評価するためのプラズマ診断技術の開発、(3)高エネルギー水素イオンの生成および輸送系の開発、(4)プラズマ中でのイオンビーム計測技術の開発、および(5)水素プラズマを用いた高エネルギーイオンビーム重畳実験の 5 項目である。

### 4. 研究成果

#### (1) 水素 MAR・EIR プラズマ生成に向けた水素プラズマの高密度化

水素 MAR プラズマの生成には電子密度  $n_e = 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度  $T_e = 10 \text{ eV}$  程度のプラズマが、水素 EIR プラズマの生成には  $n_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e = 1 \text{ eV}$  程度のプラズマ生成が必要となる。高周波(RF)放電では、RF の周波数( $\omega_{\text{RF}}$ )と低域混成周波数( $\omega_{\text{LH}}$ )が一致すると高密度のプラズマが得られる事が知られている。13.56 MHz の高周波を用いる DT-ALPHA の場合、水素プラズマでは  $B > 0.02 \text{ T}$  の場合のみ  $\omega_{\text{RF}} = \omega_{\text{LH}}$  の共鳴条件が満たされる。 $B = 0.02 \text{ T}$  に近い低磁場では広い電子密度に渡り共鳴条件が満足される事に着目し、RF アンテナ近傍の磁束密度を  $0.02 \text{ T}$  程度とし、1 kW 程度の高周波電力を印加する事で高い電子密度が得られる事を明らかにした。更に、温度や密度の値は中性粒子圧力にも強い依存性を持つ事も確かめられた。図 1 は水素プラズマの電子温度および電子密度の中性粒子圧力依存性である[1]。計測位置はプラズマ生成部近傍で、高周波電力は 600 W 程度である。 $p = 1.2 \text{ Pa}$  付近では電子密度が  $n_e = 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  を下回る低密度であるものの、 $p = 0.7 \text{ Pa}$  程度とする事で  $T_e = 10 \text{ eV}$ 、 $n_e > 10^{17} \text{ m}^{-3}$  の水素プラズマが得られる事が分かった。温度・密度ともに水素 MAR

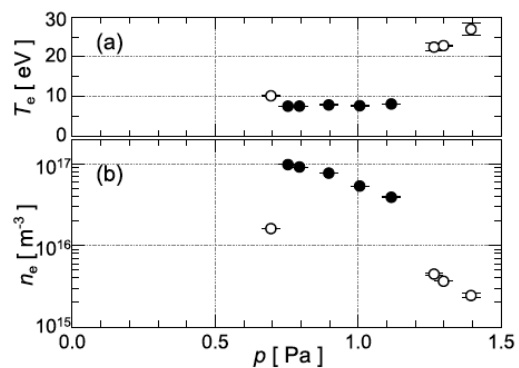


図 1. RF アンテナ近傍で取得した(a)電子温度と(b)電子密度の中性粒子圧力依存性[1]。

プラズマの生成に大きな期待が持てるパラメータ領域に到達する事ができた。

(2) 再結合反応率を評価するためのプラズマ診断技術の開発

励起原子や励起分子の生成・消滅量を評価するためにはプラズマの温度・密度の診断が必要不可欠である。RF プラズマでは電子エネルギー分布関数(EEDF)がしばしばマックスウェル分布から逸脱する事から、EEDF の非マックスウェル分布化が  $n_e, T_e$  の分光診断に対してどのような影響を及ぼし得るかを明らかにした。初めにマックスウェル分布、即ち 1 電子温度を前提として構築されたヘリウム衝突・輻射モデル(CR モデル)を 2 電子温度に拡張した。拡張した CR モデルを用いて励起ヘリウム原子の占有密度を計算し、得られた占有密度を用いたボルツマンプロット法により電子温度( $T_e^B$ )・電子密度( $n_e^B$ )を算出した。その結果を高電子温度成分の密度比  $n_e^H/n_e^L$  で整理した結果が図 2 である[2]。バルク電子としては再結合プラズマに典型的な( $n_e^L, T_e^L$ ) = ( $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}, 0.2 \text{ eV}$ )を与えた。高温成分の電子温度としては  $T_e^H = 30 \text{ eV}$  を与えている。図 2 に示すように、 $n_e^H/n_e^L = 10^{-5}$  付近では( $T_e^B, n_e^B$ )の値は( $T_e^L, n_e^L$ )とほぼ同程度となり、2 電子温度化の影響は無視できる。ところが  $n_e^H/n_e^L = 10^{-3}$  程度となると( $T_e^B, n_e^B$ )が( $T_e^L, n_e^L$ )を大きく下回る事が判明した。バルク電子による衝突・輻射過程に対して高温電子による衝突・輻射過程が無視できない程大きい事が原因である。三体再結合の反応率は低電子温度領域で大きくなる事から、EEDF の形状によっては体積再結合の反応率が過大評価される可能性を指摘する結果である。

拡張した CR モデルの計算結果を実験的に検証するため、DT-ALPHA で 2 電子温度を有するヘリウム再結合プラズマを生成し計測を行った[3]。その結果は図 3 に示す通りである。図中の(■)は実験的に得られた連続光から算出した電子温度と電子密度( $T_e^C, n_e^C$ )を示す。同様に、図中の(●)は実験的に得られた線スペクトル強度をボルツマンプロット法に与えて算出した電子温度と電子密度( $T_e^B, n_e^B$ )である。CR モデルによる計算によると、ボルツマンプロット法は高電子温度成分の影響を強く受ける事が予想される。一方、放射再結合により出現する連続光はその影響を受けにくいと考えられる。(■)と(●)とを比較すると、(●)の値が大きく過小評価されており、計算結果を支持する実験結果が得られた。更に、連続光から得られた( $T_e^C, n_e^C$ )と静電プローブから得られた  $T_e^H$  を 2 電子温度に拡張した CR モデルに与え、図 2 と同じ手順でボルツマンプロット法による温度・密度評価を行った。それが図中の(○)であるが、(○)は(●)と非常に近い値を示す事が分かった。計算で予想されていた高温成分による( $T_e^B, n_e^B$ )の過小評価が実際に生じる事を実証した結果と言える。

分光を用いた電子の診断技術の整備と並行して、イオン温度診断技術の整備にも取り組んだ。コレクタ電極とガード電極から構成されるイオンセンシティブプローブ(ISP)を製作し、DT-ALPHA において初めてイオン温度( $T_i$ )の計測に着手した[4]。得られる  $T_i$  の値が 2 つの電極の位置関係や電極同士の電位差にどのように依存するのかを網羅的に調査した。電極間距離や電位差を最適化しながら、イオン温度の高周波電力依存性を調査した。この時の電子温度および電子密度の値は  $T_e = 5-10 \text{ eV}, n_e = 10^{15}-10^{17} \text{ m}^{-3}$  である。得られたイオン温度は  $T_i = 3-5 \text{ eV}$  程度であった。DT-ALPHA のプラズマは電子加熱により維持

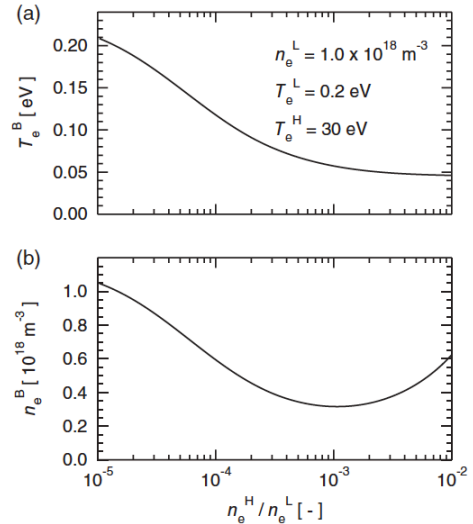


図 2. CR モデルとボルツマンプロット法により計算した(a)電子温度と(b)電子密度の  $n_e^H/n_e^L$  比依存性[2]。

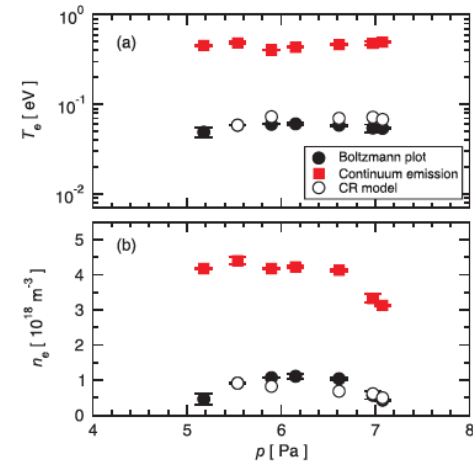


図 3. 連続光(■)、ボルツマンプロット法(●)および CR モデル(○)で評価した(a)電子温度および(b)電子密度の中性子体圧力依存性[3]。

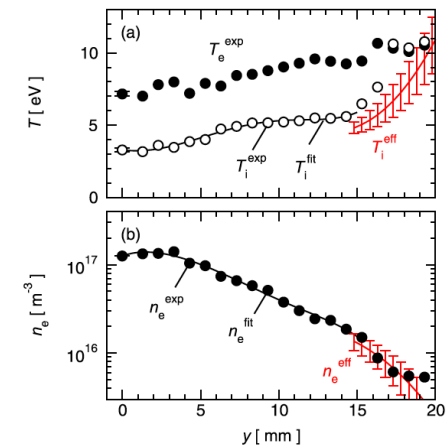


図 4. ISP で計測した(a)イオン温度および(b)イオン密度の径方向分布。イオン密度は電子密度に等しいとしている[5]。

されると考えられる事、用いたプラズマが高温・低密度であり電子-イオン間の温度緩和が生じにくい事の 2 点を考えると、得られたイオン温度の値は妥当であると考えられる。HeII ( $\lambda = 468.6 \text{ nm}$ )のドップラー広がりから算出したイオン温度と ISP で得られたイオン温度を比較し、両者の値が良く一致する事も確認している。円柱プラズマ周辺部( $y > 15 \text{ mm}$ )で ISP 計測を実施すると、図 4 に示すように周辺領域でイオン温度が増加する傾向が観測された[5]。円柱プラズマ内部のイオン温度( $T_i^{\text{in}}$ )を用いて、ISP のコレクタ電極に到達できるほど大きいラーマー半径を持つイオンのみを考慮した計算を行い実効的イオン温度( $T_i^{\text{eff}}$ )と実効的イオン密度( $n_i^{\text{eff}} = n_e^{\text{eff}}$ )を見積もった。その結果、( $T_i^{\text{eff}}, n_i^{\text{eff}}$ )は  $y > 15 \text{ mm}$  での実験結果を良く再現できる事が分かった。この結果は、有限の境界を持つプラズマに対して境界の外側で ISP によるイオン温度計測を行うとイオン温度の過大評価に陥るという事を意味するものである。

### (3) 高エネルギー水素イオンの生成および輸送系の開発

ビーム重畳実験では入射するイオンビームが単一のイオン種で構成される事が望ましい。そこで電場と磁場を利用した  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  フィルタを採用する事とした。フィルタの導入に先立って、イオン軌道計算ソフト SIMION を用いてフィルタによるイオン種の弁別効果を検証した。軌道計算はイオン源と DT-ALPHA 本体との間に  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  フィルタを導入した状態を想定し、幾何的な条件は実際の装置のものと同様である。イオン軌道計算により  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  フィルタで水素イオン( $\text{H}^+, \text{H}_2^+, \text{H}_3^+$ )の弁別が可能である事が確かめられた。特定のイオン種(例えば  $\text{H}^+$ )を引き出す場合、フィルタ通過前後でのイオンの位置変化が 0 となるように電場を調整する必要がある。しかし、フィルタの漏れ磁場や漏れ電場の影響によって必要となる電場の値は理論的な値と異なる事が判明した。 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  フィルタのイオン弁別性能が確認できたのち、 $\text{H}^+$ イオンビーム電流密度を最大とするアインツェルレンツ電圧を調査した。その結果が図 5 である。

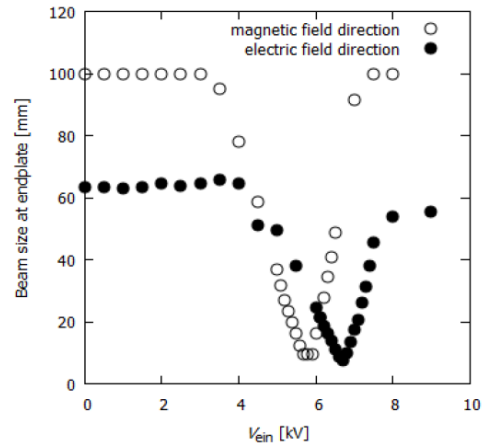


図 5. SIMION で計算した  $\text{H}^+$ イオンの電場方向および磁場方向の広がり [6]。

図 5 は DT-ALPHA の上流端に設置されているエンドプレート位置での  $\text{H}^+$ イオンの広がり(フィルタの電場方向と磁場方向)をアインツェルレンツ電圧( $V_{\text{ein}}$ )について整理した結果である[6]。エンドプレートのアパチャーサイズは  $10 \text{ mm}$  であるため、 $\text{H}^+$ イオンの広がりを  $10 \text{ mm}$  以下まで抑制できる事が望ましい。図 5 に示すように  $V_{\text{ein}}$  を最適化する事によって電場方向と磁場方向の  $\text{H}^+$ イオンの広がりを  $10 \text{ mm}$  程度まで低減できる事が分かった。しかし、それぞれの広がりを同時に最小化する事が困難である事も判明した。

イオンビーム源から引き出される  $\text{H}^+$ ビームの強度はイオン源内部で生成される  $\text{H}^+$ の密度に比例する。そこで、SIMION の計算と並行して我々の所有するイオン源における水素イオン比の見積もりを行った。 $\text{H}_3^+$ を考慮しないなどの仮定を含むものの、電子密度・電子温度・装置の幾何的なサイズからイオン比  $\text{H}^+/\text{H}_2^+$ を評価する手法が知られており、その手法を適用した。評価にはイオン源内部の  $n_e, T_e$ の値が必要であるものの、現有のイオン源は観測ポートを備えていないという問題があった。そこで、幾何的なサイズ・磁場形状・磁場強度が似通った他のバケツ型イオン源で取得した  $n_e, T_e$ を推定に用いる事にした。その結果、現在用いているイオン源では 10%-20%程度の  $\text{H}^+$ イオン比が期待できる事、電子温度を大きくする事で  $\text{H}^+$ イオン比を向上できる事が分かった。

### (4) プラズマ中でのイオンビーム計測技術の開発

高エネルギーイオン衝突により引き起こされる粒子の生成・消滅過程を定量的に評価するためにはプラズマを貫通するイオンビームのその場計測が必要不可欠である。そこで本研究ではグリッド付きエネルギーアナライザ(GEA)によるイオンビーム計測を試みた[7]。3枚のグリッドと1枚のコレクタからなる GEA を製作した。図 6 は(a)プラズマ生成を行っていない場合と(b)行っている場合に GEA で得られた信号( $I_c$ )を示している。図中の"Grounded case"はグリッドとコレクタが全て接地されている条件、"Biased case"は最適な電位構造を用いた条件を示している。図 6(a)に示すように、最適な電位構造を用いない場合はビーム電流を 5 倍程度過大評価する事

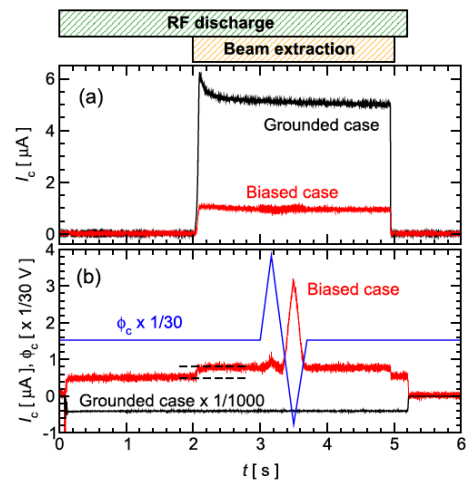


図 6. 開発した GEA で取得したコレクタ電流。(a)は背景プラズマの生成が無い場合、(b)は背景プラズマの生成が行われている場合の計測結果である[7]。

が判明した。また、過大評価の原因はコレクタ表面からの二次電子の放出で定量的に説明できる事を見出した。図 6(b)は背景プラズマがある場合の計測であるが、イオンビームの引き出し開始( $t = 2$  s)に伴って GEA の信号が有意に増加している。これはプラズマとイオンビームとを切り分けた計測が可能である事を示す結果である。図 6(b)の  $t = 2$  s における  $I_c$  の増分は  $0.3 \mu\text{A}$  程度である。この結果から、プラズマを貫通するイオンビーム電流は約  $0.3 \mu\text{A}$  と見積もる事ができた。イオンビームの生成条件を一定に保ちながら背景プラズマの密度を変化させて同様の実験を行った所、プラズマを貫通するイオンビームは背景プラズマによる空間電荷の緩和効果の影響を強く受ける事を示唆する結果を得た。

#### (5) 水素プラズマを用いた高エネルギーイオンビーム重畳実験

$\text{H}^+$ イオンビームと水素体積再結合プラズマを用いたビーム重畳実験の参照用データを取得する目的で、 $\text{He}^+$ ビームと水素電離進行プラズマを用いたビーム重畳実験を行った[8]。標的となる水素プラズマの電子温度および電子密度は、プラズマ中心近傍で  $T_e = 2\text{-}3$  eV,  $n_e = 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  程度である。 $\text{He}^+$ ビームのエネルギーは  $E = 10$  keV である。図 7 にイオンビーム入射時の水素原子線( $\text{H}\alpha$ ,  $\text{H}\beta$ ,  $\text{H}\gamma$ )の発光強度の時間応答を示す。イオンビームの入射は  $t = 2$  s で開始されるが、この時刻において各原子線の発光強度が増加する事が分かった。ビーム入射前の発光強度からの増分( $\Delta I$ )を評価してみると、 $\text{H}\alpha > \text{H}\beta > \text{H}\gamma$  となっており、上準位の主量子数が小さいほど  $\Delta I$  が大きくなる傾向がある。得られた結果はビームイオンによる水素原子のイオン衝突励起を反映している可能性がある。これはイオン衝突によって励起水素原子の生成・消滅バランスが変化する事を示唆する結果であると言える。同様に、 $\text{He}^+$ ビームの有無で水素分子線の発光強度を比較した。比較したのは Fulcher- $\alpha$  帯の発光である。その結果、(0-0)Q1 から(3-3)Q1 の 4 つの遷移の発光強度がビーム存在下で増加する事が分かった。これは Fulcher- $\alpha$  発光の上準位である d-state の占有密度がイオン衝突により変化した事を示すものである。d-state の占有密度は電子基底状態の X-state と関連づけて考える事ができ、X-state の振動励起水素分子は MAR 過程の起点である事から、高エネルギーイオン衝突が MAR 過程の反応率変化を引き起こし得る事を示唆する結果である。

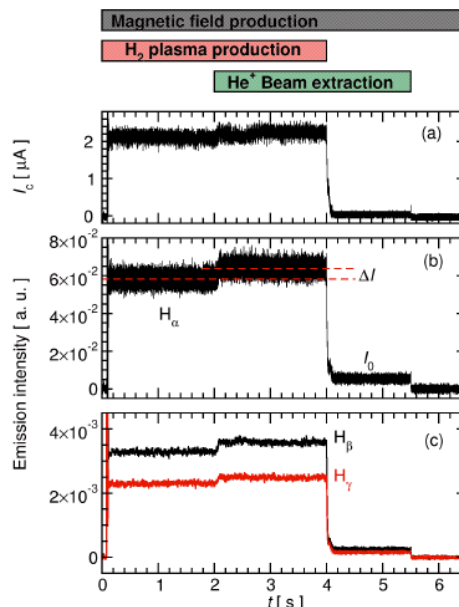


図 7.  $\text{He}^+$ イオンビーム入射時の水素原子線発光強度の応答。 $\text{H}\alpha$ 発光強度は(b)に、 $\text{H}\beta$ と  $\text{H}\gamma$ の発光強度は(c)にプロットされている[8]。

#### 【引用文献】

- [1] Tomohiro SEINO, Hiroyuki TAKAHASHI, Peerapat BOONYARITTIPONG, Takeshi SAIKYO, Kenta OGASAWARA, Atsushi OKAMOTO, Sumio KITAJIMA and Kenji TOBITA, Plasma Fusion Res. **15**, 1201056 (2020).
- [2] H. Takahashi, A. Okamoto, S. Kitajima, T. Kobayashi, P. Boonyarittipong, T. Miura, D. Nakamura, J. Kon, T. Saikyo, Y. Tanaka and M. Goto, Contrib. Plasma Phys. **57**, 322 (2017).
- [3] H. Takahashi, A. Okamoto, P. Boonyarittipong, T. Saikyo, K. Ogasawara, T. Seino, K. Tobita and S. Kitajima, Phys. Plasmas **26**, 033506 (2019).
- [4] Takahiko KOBAYASHI, Hiroyuki TAKAHASHI, Sumio KITAJIMA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Peerapat BOONYARITTIPONG, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA and Hidetoshi HASHIZUME, Plasma Fusion Res. **13**, 3401090 (2018).
- [5] H. Takahashi, K. Ogasawara, P. Boonyarittipong, T. Saikyo, T. Seino, S. Kitajima, A. Okamoto and K. Tobita, Phys. Plasmas **26**, 022511 (2019).
- [6] Peerapat BOONYARITTIPONG, Hiroyuki TAKAHASHI, Sumio KITAJIMA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Takahiko KOBAYASHI, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA and Hidetoshi HASHIZUME, Plasma Fusion Res. **13**, 3402102 (2018).
- [7] Hiroyuki Takahashi, Atsushi Okamoto, Sumio Kitajima, and Kenji Tobita, AIP Advances **10**, 085018 (2020).
- [8] Hiroyuki TAKAHASHI, Takahiko KOBAYASHI, Peerapat BOONYARITTIPONG, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Sumio KITAJIMA and Hidetoshi HASHIZUME, Plasma Fusion Res. **13**, 3401053 (2018).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 SEINO Tomohiro, TAKAHASHI Hiroyuki, BOONYARITTIPONG 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 -
1. 著者名 Takahashi H., Okamoto A., Boonyarittipong P., Saikyo T., Ogasawara K., Seino T., Tobita K., Kitajima S.	4. 巻 26
2. 論文標題 Influence of the formation of a bi-Maxwellian distribution on volumetric recombining plasma spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 033506 ~ 033506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078580	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 Takahashi H., Ogasawara K., Boonyarittipong P., Saikyo T., Seino T., Kitajima S., Okamoto A., Tobita K.	4. 巻 26
2. 論文標題 Validation of ion temperature measurement using an ion sensitive probe technique in finite boundary RF plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022511 ~ 022511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5083214	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 BOONYARITTIPONG Peerapat, TAKAHASHI Hiroyuki, KITAJIMA Sumio, OKAMOTO Atsushi, TOBITA Kenji, KOBAYASHI Takahiko, SAIKYO Takeshi, ISHIKAWA Yusuke, OGASAWARA Kenta, HASHIZUME Hidetoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of a High Energy Hydrogen Beam Injection System for Divertor Plasma Simulation Experiments on the DT-ALPHA Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3402102 ~ 3402102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3402102	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 KOBAYASHI Takahiko, TAKAHASHI Hiroyuki, KITAJIMA Sumio, OKAMOTO Atsushi, TOBITA Kenji, BOONYARITTIPONG Peerapat, SAIKYO Takeshi, ISHIKAWA Yusuke, OGASAWARA Kenta, HASHIZUME Hidetoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Development of Ion Sensitive Probe and Its Application to RF Plasma Device DT-ALPHA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401090 ~ 3401090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3401090	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., Okamoto A., Kitajima S., Kobayashi T., Boonyarittipong P., Miura T., Nakamura D., Kon J., Saikyo T., Tanaka Y., Goto M.	4. 巻 57
2. 論文標題 Influence of electron energy distribution on helium recombining plasma diagnostics using line emissions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 322 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201700014	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 TAKAHASHI Hiroyuki, KOBAYASHI Takahiko, BOONYARITTIPONG Peerapat, SAIKYO Takeshi, ISHIKAWA Yusuke, OGASAWARA Kenta, OKAMOTO Atsushi, TOBITA Kenji, KITAJIMA Sumio, HASHIZUME Hidetoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Divertor Plasma Simulation Experiment Using Hydrogen Ionizing Plasma and Helium Ion Beam in an RF Plasma Source DT-ALPHA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401053 ~ 3401053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3401053	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 H. Takahashi, P. Boonyarittipong, T. Saikyo, K. Ogasawara, T. Seino, S. Kitajima, K. Tobita, and H. Hashizume
2. 発表標題 Application of an RF plasma source for divertor plasma study and its recent results
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 清野智大, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHA 装置を用いた非磁化プラズマに対する Ion Sensitive Probe 計測適用の検証
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 清野智大, 高橋宏幸, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 小笠原健太, 岡本敦, 飛田健次, 北島純男
2. 発表標題 DT-ALPHA装置を用いた非磁化プラズマに対するIon Sensitive Probe 計測適用の検証
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 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 清野智大, 草開薫, 坂田裕紀, Muhammad Naufal Winarto, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHAにおけるダイバータ模擬プラズマ中の軸方向イオン温度計測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 高橋宏幸
2. 発表標題 プラズマ-気相境界の動的振る舞いと衝突・輻射物理
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 清野智大, 西京毅, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 高周波放電装置を用いたダイバータプラズマ中の 電子・イオン・中性粒子間エネルギーバランス研究
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Takahashi, K. Ogasawara, P. Boonyarittipong, T. Saikyo, T. Seino, S. Kitajima, A. Okamoto, K. Tobita
2. 発表標題 Ion temperature measurement of divertor-simulating plasma aiming for detached divertor formation study
3. 学会等名 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 P. Boonyarittipong, H. Takahashi, K. Ogasawara, T. Saikyo, T. Seino, S. Kitajima, A. Okamoto, K. Tobita
2. 発表標題 Ion beam production with LaB6 hot cathode for divertor plasma simulation experiments in DT-ALPHA device
3. 学会等名 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 清野智大, 北島純男, 飛田健次
2. 発表標題 ダイバータ模擬プラズマ中における中性粒子制御下の電子・イオン・中性粒子間エネルギー輸送評価
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清野智大, 高橋宏幸, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 小笠原健太, 岡本敦, 飛田健次, 北島純男, 橋爪秀利
2. 発表標題 DT-ALPHA装置における高密度水素プラズマ生成に向けた基礎研究
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 清野智大, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHAを用いた体積再結合進展過程における電子・イオン・中性粒子間エネルギーフロー調査
3. 学会等名 第35回年プラズマ・核融合学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋宏幸, 小笠原健太, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 清野; 智大, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次
2. 発表標題 DT-ALPHA におけるダイバータ模擬プラズマ中の エネルギーフロー評価
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 P. Boonyarittipong, H. Takahashi, K. Ogasawara, T. Saikyo, T. Seino, S. Kitajima A. Okamoto, K. Tobita, H. Hashizume
2 . 発表標題 High Energy H+ Beam Production for Divertor Plasma Simulation Experiments in DT-ALPHA Device
3 . 学会等名 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hiroyuki TAKAHASHI, Takahiko KOBAYASHI, Peerapat BOONYARITTIPONG, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Sumio KITAJIMA and Hidetoshi HASHIZUME
2 . 発表標題 Divertor plasma simulating experiment using hydrogen ionizing plasma and helium ion beam in an RF plasma source DT-ALPHA
3 . 学会等名 26th International Toki Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Peerapat BOONYARITTIPONG, Hiroyuki TAKAHASHI, Sumio KITAJIMA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Takahiko KOBAYASHI, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA and Hidetoshi HASHIZUME
2 . 発表標題 Development of High Energy Hydrogen Beam Injection System for Divertor Plasma Simulation Experiments in DT-ALPHA Device
3 . 学会等名 26th International Toki Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Takahiko KOBAYASHI, Hiroyuki TAKAHASHI, Sumio KITAJIMA, Atsushi OKAMOTO, Kenji TOBITA, Peerapat BOONYARITTIPONG, Takeshi SAIKYO, Yusuke ISHIKAWA, Kenta OGASAWARA and Hidetoshi HASHIZUME
2 . 発表標題 Development of ion sensitive probe and its application to the RF plasma device DT-ALPHA
3 . 学会等名 26th International Toki Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 小林鷹彦, 高橋宏幸, Boonyarittipong Peerapat, 西京毅, 石川裕介, 小笠原健太, 北島純男, 岡本敦, 飛田健次, 橋爪秀利
2. 発表標題 高周波プラズマ源DT-ALPHAにおけるIon sensitive probeによるイオン温度計測
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Boonyarittipong Peerapat, Kobayashi Takahiko, Saikyo Takeshi, Ogasawara Kenta, Ishikawa Yusuke, Takahashi Hiroyuki, Kitajima Sumio, Okamoto Atsushi, Tobita Kenji, Hashizume Hidetoshi
2. 発表標題 Development of proton beam injection system for divertor plasma simulation experiment in DT-ALPHA device
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------