

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26420848  
研究課題名(和文) ダイバータ領域励起水素分子の高エネルギーイオンによる生成消滅ダイナミクスの解明  
  
研究課題名(英文) Energetic ion induced excitation dynamics of hydrogen molecule in divertor 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：気体を電離させた状態がプラズマであり、電離の逆過程を再結合と呼ぶ。磁場閉じ込め核融合プラズマには積極的に再結合過程を誘起してプラズマから気体へ戻すダイバータ領域が存在する。本研究ではダイバータ領域に流入する高エネルギーイオンが再結合過程に及ぼす影響を調査した。プラズマ実験装置にイオンビーム入射装置を組み合わせることで、実験条件の制御が容易な模擬環境の構築に成功した。これにより高エネルギーイオンの密度増加に伴い再結合過程に特徴的な励起状態の密度が減少することを実験的に初めて明らかにした。励起状態の生成・消滅過程に高エネルギーイオンの影響を取り込んだモデルを構築し、定性的に実験結果を説明した。

研究成果の概要(英文)：Plasma, the ionized state of gas, suffers from recombination, reverse process of ionization, in the divertor region of magnetically confined fusion devices. Effect of energetic ion flowing into the divertor region on the recombination processes is investigated. Combining a plasma experimental device and a ion beam injector, we have developed a divertor plasma simulating environment, which enables us to control experimental condition more precisely and more easily than actual fusion devices. We have found population density of excited states, which is an indicator of the recombining processes, decreases when the energetic ion density increases experimentally for the first time. A model we have developed by including the effect of energetic ion on production-annihilation processes of excited state qualitatively agree with the experiment.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：境界層プラズマ プラズマ・核融合 原子分子過程 高エネルギーイオン 再結合プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマの研究では、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)での熱流束の低減が一つの重要な課題となっている。ダイバータ領域で体積再結合を促進することで、プラズマがダイバータ板へ到達する前に、熱流束を分散させることができる。ところが、突発的に発生する高エネルギー粒子を伴うプラズマ流が各国の装置で観測され、このような高エネルギープラズマ流によりプラズマの再結合効率が低下し熱流束の分散能が低減することが懸念されている。

励起状態水素分子は分子活性化再結合とよばれる一連の反応により再結合を促進する重要な分子である。しかし原子と比べて多様な励起状態を有するために、高エネルギーイオンと励起水素分子の衝突過程は断面積が未解明の場合が多い。そのため分子活性化再結合が支配的なダイバータプラズマでは、高エネルギーイオンの影響を予測することが困難な状況にあった。

### 2. 研究の目的

研究代表者はこれまでの研究で、主にヘリウムのような単原子分子から構成されるプラズマで高エネルギーイオンが及ぼす影響を明らかにしてきた。本研究の目的は、これまでの研究を進展させ励起状態の水素分子への影響を解明することである。そのために必要となる二つの研究を並行して遂行する。一つは、単原子分子系においてより精密な実験を実施し高エネルギーイオンの影響を定量評価することである。これは水素原子を含む一般的な原子励起状態に対する影響の予測を可能にする。もう一つは、励起状態水素分子による再結合過程を誘起しつつ、高エネルギー水素イオンを重畳する実験環境を構築することである。

それらのために本研究では以下の項目を実施する。(1) 主成分イオンの質量選択と高エネルギー定常ビーム引き出しを行うこと。(2) プラズマ中の高エネルギーイオン密度の診断手法を確立すること。(3) 原子に着目した実験により構築した高エネルギーイオン+水素プラズマ環境の検証を行うこと。(4) 高密度水素プラズマ生成と水素分子活性化再結合の誘起を行うこと。(5) 微弱な分子スペクトルを計測し励起状態水素分子の診断を行うこと。(6) 高エネルギーイオンが再結合プラズマ中の励起状態占有密度分布に与える影響を記述するモデルを構築すること。これらにより、励起水素分子の生成消滅への高エネルギーイオンの影響を明らかにすることを旨とする。

### 3. 研究の方法

(1) 高エネルギー水素イオンビーム引き出しのための質量選択

イオン源内部にアークプラズマを生成し引き出し電極でイオンを加速させるイオンビーム入射装置では、陽子( $H^+$ )ビームの引き出し時に分子イオン( $H_2^+$ ,  $H_3^+$ )も同時に引き出されることが知られている。これらの分子イオンによるビームは陽子ビームとは異なる原子分子素過程を誘起し、また、引き出し条件と異なるエネルギーの陽子ビームを副次的に生成するため、定量的な実験を遂行する上で引き出されるイオンの種類を選択する必要があった。

そこで、イオンの質量によりビーム軌道を偏向する質量選択フィルターを、ダイバータ模擬プラズマ実験装置 DT-ALPHA のイオンビーム入射装置に整備する。実験装置への設置と並行して計算機シミュレーションによりビーム軌道を調査し、フィルターへの印加電圧などの事前検討を行う。

(2) プラズマ中の高エネルギーイオン密度の診断手法の確立

イオンビームと再結合プラズマを用いたこれまでの実験では、プラズマ中のイオンビーム密度を直接計測することが困難で、ビーム引き出し部およびプラズマ通過後のビーム密度から内挿せざるを得なかった。

そこで、DT-ALPHA 装置のプラズマ試験領域に設置可能で、かつ、プラズマ存在下でも動作可能なビーム電流モニタを開発する。また分光学的なビーム電流モニタ手法の可能性を調査し、実験により実証する。

(3) 再結合プラズマへの高エネルギーイオン重畳実験

高エネルギーイオンが励起水素分子に及ぼす影響を明らかにするためには、高エネルギーイオン粒子束を制御パラメータとした占有密度計測実験が不可欠である。しかし、これまでの研究において高エネルギーイオン粒子束を変化させた系統的な実験には未着手であった。

そこで、ビーム入射装置の制御システムを改修し、高エネルギーイオン粒子束を制御パラメータとした実験を可能にする。単一イオン種のビーム引き出しが確実なヘリウムビームと体積再結合の実現に実績のあるヘリウムプラズマの組み合わせで、高エネルギーイオンが励起状態占有密度分布に与える影響を調査する実験を行う。

(4) 高密度水素プラズマ生成と水素分子活性化再結合の誘起

DT-ALPHA 装置は高周波放電で高密度プラズマを生成し、2次ガスを導入することで電子温度低下により体積再結合を誘起する実験が可能である。水素ガスを導入することで高密度水素プラズマ生成と水素分子活性化再結合の誘起を目指す。水素における高密度プラズマ生成のために磁場配位の最適化を行う。

(5) 分子スペクトルによる励起状態水素分子の診断

高分解能分光器を整備し、水素分子 Fulcher 帯スペクトルを取得する。得られたスペクトルから水素分子の振動・回転温度を導出する。導入する水素ガス圧力を変化させた時の振動・回転温度の変化を取得する。

(6) 励起状態占有密度分布を記述するモデルの構築

励起状態占有密度分布は衝突輻射(CR)モデルで一般に記述される。しかし一般的なCRモデルでは衝突過程としてバルクプラズマ中の電子衝突のみが考慮されていた。そこで、高エネルギーイオンの衝突過程もバルク電子と同様に考慮したモデルを構築し、同時に、必要となるイオン衝突断面積を調査する。構築したモデルをもとにコードを開発し、高エネルギーイオン粒子束依存性などを計算する。

#### 4. 研究成果

(1) 高エネルギー水素イオンビーム引き出しのための質量選択

質量選択フィルターを検討し、電場と磁場をビーム軸に直交して印加する  $E \times B$  フィルターが最適であるとの結論を得た。条件に合致したイオン種の大電流ビームが直進してフィルターを通過できる。続いて、整備した  $E \times B$  フィルターの実形状をもとにビーム軌道の数値解析を行った。その結果、既設のアイツェルレンズの調整によりエネルギー 10keV 程度の  $H^+$  ビームはプラズマへの入射口(直径 10mm)に十分収束して入射されつつ、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$  ビームは入射されない運転条件を見出すことができた。一方で、軌道が逸れた  $H_2^+$ 、 $H_3^+$  ビームが熱衝撃に弱い場所へ照射されることも判明した。この結果により、フィルター設置に先立ち当該箇所の保護を検討することができた。

(2) プラズマ中の高エネルギーイオン密度の診断手法の確立

真空容器の計測用ポートから導入可能な小型のビーム電流モニタを開発した。プラズマ中で計測可能なように3枚の電圧印加グリッドを併せ持つエネルギーアナライザー型とした。適切なバイアス電圧の印加によりプラズマ中で高エネルギーイオンビーム電流を計測することに成功した。これによりプラズマ中の高エネルギーイオン密度の導出が可能となった。一方でビーム電流計測にバルクプラズマが影響を及ぼしている条件も見いだされ、より広範囲の実験条件で適用するためにはエネルギーアナライザーの調整が必要であることも明らかとなった。

またプラズマを生成せず He ガスのみプラズマ実験と同様に注入した状態では、ビームイオン衝突由来の He I 発光の観測に成功し

た。コロナモデルを仮定してビーム密度を求めたところ、ビーム進行に伴ってビーム密度が減少する傾向が確認できた。ビーム電流の直接計測との相違は4倍以内であった。このことから発光に関するモデルの改善と精密なガス圧力測定により、プラズマの無い状態ではファラデーカップによるビーム電流計測法と相補的な計測が可能であることを見出した。

(3) 再結合プラズマへの高エネルギーイオン重畳実験

制御システムの改修により、図1に示すような高エネルギーイオン粒子束を変化させた実験が可能となった。図1では縦軸に体積再結合に伴う線スペクトル放射(励起状態占有密度を代表する)の高エネルギーイオン重畳時の減少割合を横軸に粒子束をプロットしている。高エネルギーイオン粒子束の変化に比例して線スペクトル放射が減少していることが、この実験により初めて明らかとなった。

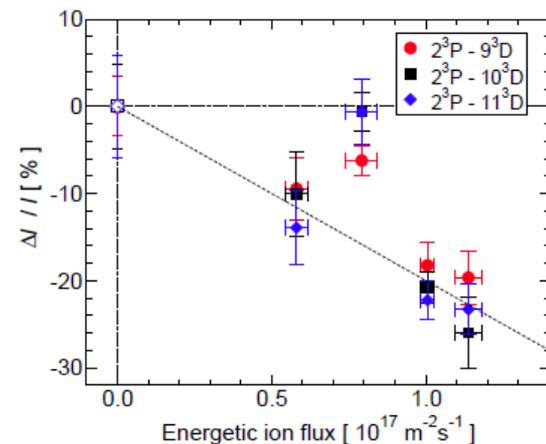


図1. ヘリウム原子線スペクトル強度の高エネルギーイオン重畳による減少割合の、高エネルギーイオン粒子束依存性。

これにより DT-ALPHA 装置において高エネルギーイオン粒子束を変化させ再結合プラズマ中に入射する実験が可能であることを実証した。また図1の結果をもとに現象を支配している原子分子過程の検討を行い、励起状態原子に対しては高エネルギーイオンとの荷電交換反応が重要であるという知見が得られた。実験はヘリウムプラズマと  $He^+$  ビームの組み合わせのみ行われたが、得られた知見は一般的な励起状態原子に対して有効であると考え、研究の展開を図っている。

(4) 高密度水素プラズマ生成と水素分子活性化再結合の誘起

ヘリコン波放電によるプラズマ生成を行う場合、印加する RF 周波数  $\omega$  と低域混成周波数  $\omega_{LH}$  の大小関係によって、プラズマの加熱が行われる空間位置が異なり、 $\omega < \omega_{LH}$  を満たす強磁場条件下では、プラズマの加熱位

置が密度の低いプラズマ周辺部に局在化する。そのため、その領域を通る磁力線を中心部に収束させることで、プラズマ中心部に高密度プラズマを生成可能である可能性を見出した。また、イオン種による違いを検討し、プラズマの加熱位置が他の重いガスによるプラズマと比較して水素プラズマの場合は周辺部に局在化しやすく、高密度化が難しいことを示した。

強磁場条件下において、ヘリコン波によるプラズマの加熱が行われる領域が周辺部に局在化していること、磁場配位を収束配位とすることでその領域を中心部へ移行可能であることを実験的に確かめた。その評価方法として、電子圧力がよい指標となることを示した。適切な収束率の磁場配位を調査し、アンテナ領域の磁場強度は高密度近似した低域混成共鳴磁場強度  $B_{LH-HD}$  を超えている必要があることを見出した。DT-ALPHA において下流テスト領域に高密度水素プラズマを生成するための収束磁場配位を提案した。それによって、電子密度  $n_e > 3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$  の高密度プラズマを水素プラズマの場合でも生成することに成功した。

#### (5) 分子スペクトルによる励起状態水素分子の診断

高分散分光器を DT-ALPHA 装置に整備することで、波長 600-640nm 付近に存在する水素分子 Fulcher- $\alpha$  帯スペクトルの観測に成功した。振動・回転状態を区別した 10-15 本程度の線スペクトルの強度を元に、図 2 に示すような振動温度・回転温度を得た。

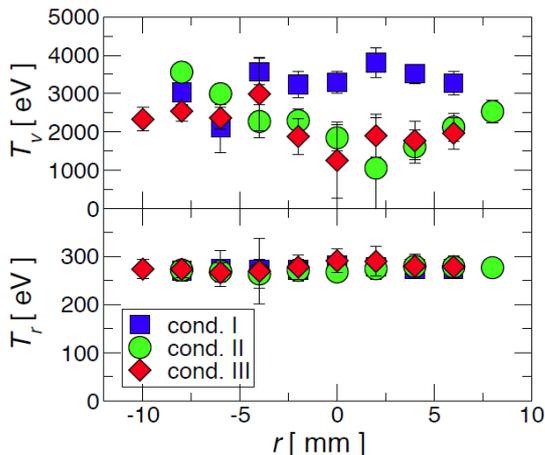


図 2. 様々なガス圧力条件において取得した、水素分子振動温度  $T_v$  および回転温度  $T_r$  の径方向分布。Cond. I, II, III のガス圧力はそれぞれ 3.5, 5.2, 6.6 Pa である。

観測領域における水素ガス圧力を変化させると振動温度が変化すること、回転温度はガス温度程度で従来の報告と矛盾ないことが明らかとなった。分子活性化再結合の中間生成物である負イオン ( $\text{H}^-$ ) や分子イオン ( $\text{H}_2^+$ ) が水素分子から生成される反応速度係数は、振動励起状態に強く依存することが知

られている。得られた振動温度の変化が、負イオンや分子イオンの生成の速度係数、および、それらを介した再結合過程の速度係数の変化へ与える影響について数値解析に着手した。

#### (6) 励起状態占有密度分布を記述するモデルの構築

高エネルギーイオン衝突による荷電交換・電離・励起を考慮した衝突輻射 (CR) モデルを水素原子について構築した。各励起状態占有密度をそれぞれ未知数とする連立方程式を整理することにより、一般的な CR モデルに現れる電離進行成分、再結合成分の他に、高エネルギーイオン密度に比例する成分 (イオン衝突成分) が発生することを明らかにした。また、電離進行成分・再結合成分であっても、特に主量子数の大きな励起状態では高エネルギーイオンの励起状態への直接の作用により非線形に高エネルギーイオンの影響を受けることを初めて明らかにした。

高エネルギーイオン密度を変化させて励起状態占有密度の変化を調査した計算結果を図 3 に示す。高エネルギーイオン密度に比例して増加するイオン衝突成分よりも通常の電離進行成分の方が大きな割合を占めていることが明らかになった。その結果、高エネルギーイオン密度が増加するほど、特に主量子数の大きな励起状態では、励起状態占有密度が減少する、という現象が起きることを見出した。

このモデル計算の結果は、主量子数に対する応答および高エネルギーイオン密度に対する応答の二つの観点から、前述の実験結果を定性的に正しく説明するものである。このことから、今後の様々な装置における実験の解釈や将来の装置設計における予測に有用となり得るモデルを本研究で構築できたと考えている。

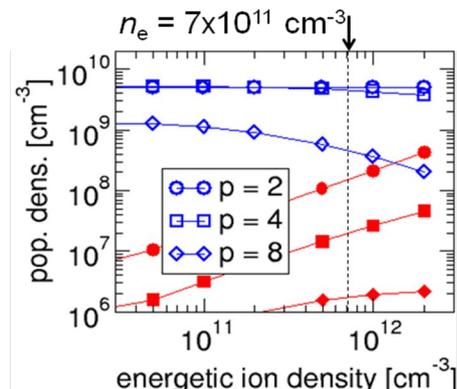


図 3. 水素原子励起状態 (主量子数  $p = 2, 4, 8$ ) 占有密度の高エネルギーイオン密度依存性。白抜きのプロットは通常の電離進行成分を、塗りプロットはイオン衝突成分を表している。電子温度が高いプラズマのため、再結合成分は縦軸の下限より小さい。

以上により、高エネルギーイオンが再結合過程に及ぼす影響を明らかにしてきた。励起状態水素分子による再結合過程の誘起と、高エネルギー水素イオンを重畳する実験環境を整備した。従来より精密な実験が可能となり、水素原子を含む一般的な原子励起状態に対する高エネルギーイオンの影響の予測ができるようになってきた。しかし構築したモデルと実験とを比較すると定量的には一致しない点も見られた。モデルの改善に資する実験遂行が今後の主たる課題となる。高エネルギーイオンとの相互作用を考慮する観点からは、特に電子およびイオンのエネルギー分布に着目した研究が重要となる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1. H. Takahashi, A. Okamoto, D. Nakamura, T. Miura, P. Boonyarittipong, and S. Kitajima, *Experimental study of the volumetric recombination under energetic ion flow using a radio-frequency plasma source*, *Physics of Plasmas*, **23** (2016) 112510, 査読有, DOI: 10.1063/1.4968239
  2. H. Takahashi, A. Okamoto, T. Miura, D. Nakamura, P. Boonyarittipong, S. Sekita and S. Kitajima, *Helium Volumetric Recombining Plasma Formation for Energetic Ion Injection in Radio-Frequency Plasma Device DT-ALPHA*, *Plasma and Fusion Research*, **11** (2016) 2402059, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.11.2402059
  3. H. Takahashi, A. Okamoto, T. Takahashi, and S. Kitajima, *Energetic Helium Ion Injection into Helium Recombining Plasma in Radio-Frequency Plasma Source*, *Fusion Science and Technology*, **68** 190-195 (2015), 査読有, DOI: 10.13182/FST14-910
- 〔学会発表〕(計34件)
1. 三浦隆嗣, 岡本敦, 中村大樹, 小林鷹彦, Boonyarittipong Peerapat, 今仁哉, 西京毅, 高橋宏幸, 北島純男:「ダイバータプラズマ模擬装置 DT-ALPHA における水素プラズマ中の分子活性化再結合過程評価」, 日本物理学会第 72 回年次大会(2017年), 大阪大学(大阪府・豊中市), 2017年3月17-20日
  2. 岡本敦, 高橋宏幸:「高エネルギーイオン衝突を考慮した水素原子衝突輻射モデル」, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2016年11月29日-12月2日
  3. 中村大樹, 岡本敦, 三浦隆嗣, 小林鷹彦, 田中優一, Boonyarittipong peerapat, 今仁哉, 西京毅, 高橋宏幸, 北島純男:「ダイバータプラズマ模擬装置 DT-ALPHA における背景プラズマ中の高エネルギーイオンビーム計測」, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2016年11月29日-12月2日
  4. 高橋宏幸, 中村大樹, 三浦隆嗣, Boonyarittipong Peerapat, 小林鷹彦, 田中優一, 岡本敦, 北島純男:「ダイバータプラズマ模擬のための体積再結合プラズマに対する高エネルギーイオンビーム入射」, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2016年11月29日-12月2日
  5. P. Boonyarittipong, D. Nakamura, T. Miura, T. Kobayashi, Y. Tanaka, J. Kon, T. Saikyo, H. Takahashi, S. Kitajima: 「Development of High Energy Hydrogen Beam Injection System in the Divertor Plasma Simulator DT-ALPHA」, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学(宮城県・仙台市), 2016年11月29日-12月2日
  6. 中村大樹, 岡本敦, 三浦隆嗣, 小林鷹彦, 田中優一, Boonyarittipong Peerapat, 高橋宏幸, 北島純男:「ダイバータプラズマ模擬装置 DT-ALPHA における背景プラズマ中の高エネルギーイオンビーム束評価」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学(石川県・金沢市), 2016年9月13-16日
  7. H. Takahashi, A. Okamoto, D. Nakamura, T. Miura, P. Boonyarittipong, and S. Kitajima: "Experimental study of the volumetric recombination under energetic ion flow using a radio-frequency plasma source", 22nd International conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, P3. 36, May 30 - June 3, 2016, Rome( Italy)
  8. 岡本敦, 高橋宏幸, 北島純男:「原子励起状態の占有密度分布に対する高エネルギーイオン衝突の影響」, 日本物理学会第 71 回年次大会(2016年), 東北学院大学(宮城県・仙台市), 2016年3月19-22日
  9. 三浦隆嗣, 岡本敦, 中村大樹, Boonyarittipong Peerapat, 関田秀平, 高橋宏幸, 北島純男:「ダイバータプラズマ模擬装置 DT-ALPHA における水素プラズマの水素中性粒子圧力応答特性」, 日本物理学会第 71 回年次大会(2016年), 東北学院大学(宮城県・仙台市), 2016年3月19-22日
  10. A. Okamoto, H. Takahashi, T. Takahashi and S. Kitajima: "Interaction Between Ion Beam And

*Recombining Hydrogen Plasma In Radio-Frequency Discharge Divertor Simulating Device*", 17th International Congress on Plasma Physics, BAP.O7, Sep. 15-19, 2014, Lisbon(Portugal)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岡本 敦 (OKAMOTO, ATSUSHI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：50396793

(2)研究分担者

北島 純男 (KITAJIMA, SUMIO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30161475

(3)連携研究者

高橋 宏幸 (TAKAHASHI, HIROYUKI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：30768982  
(平成 27 年度より連携研究者)