

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740357

研究課題名(和文) プラズマ 中性粒子結合系の高エネルギーイオン流れ場におけるダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics of plasma and neutral particle coupling system in high energy ion flow

研究代表者

岡本 敦 (Okamoto, Atsushi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50396793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマは気体が電離した状態として説明されるが、しばしば電離した気体(プラズマ)と通常の気体(中性粒子)は共存している。磁場閉じ込め実験装置のダイバータ領域などでは、その共存状態に更に高エネルギーイオン流れが重畳される。この重畳が気体の電離やプラズマの再結合(プラズマが中性粒子に戻ることに及ぼす影響)の解明を行った。実験手法・計測手法の開発を行い、高エネルギーイオン流に対する中性粒子の応答として荷電交換反応に伴う密度低下が特定の条件で起こることを明らかにした。プラズマ・中性粒子・高エネルギーイオンの共存状態を記述するモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：Plasmas, which are usually explained as ionized gases, sometimes coexist with neutral particles. High energy ion flow is superimposed on the coexisting state in magnetically confined plasma experimental devices. The effect of the superimposition on the ionization of neutral particles and the recombination of plasmas is investigated. Resulting from the developments of experimental method and plasma measurement method, we clarified the response of neutral particles on the high energy ion flow. A model describing coexisting of plasmas, neutral particles, and high energy ion flow is proposed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・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

核融合研究の中で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)へ到達する前に気体と接触させることで再結合を促し、熱流束を分散させることができる[例えば N. Asakura *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 795 (1996)]。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、このような突発的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[例えば N. Ohno *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 1055 (2001)]。

高エネルギーイオン流に対するプラズマの応答は、従来のダイバータプラズマ研究であまり進展が見られなかった課題である。世界各国のダイバータ模擬装置では高エネルギー粒子を含むプラズマ流の生成が困難であり、一方、大型の磁場閉じ込め核融合実験装置では計測器設置の困難さなどにより高精度の実験が容易ではなかった。

2. 研究の目的

本研究はプラズマ 中性粒子結合ダイナミクスを高エネルギーイオン流れ場中で実験的に解明することを目的とする。結合系ダイナミクスの解明にはプラズマだけでなく中性粒子の分布も考慮する必要があるが、現在の実験装置では中性粒子について計測・制御ともに不十分であり、高精度の実験とそれに基づく理論モデルの構築が困難であった。

そこで、本研究では以下の項目を実施する。(1)再結合プラズマの安定した形成に必要な中性ガス圧力空間分布の制御手法を開発すること。(2)プラズマおよび中性粒子の空間分布を計測するための分光システムを開発すること。(3)高エネルギーイオン流に対するプラズマおよび中性粒子の応答を実験的に調査すること。(4)プラズマ 中性粒子結合ダイナミクス解明のため、プラズマと中性粒子の分布を記述するモデルを構築すること。これらにより、磁場閉じ込めプラズマダイバータ領域の熱流束低減のための応用研究への展開を目指す。

3. 研究の方法

(1)中性ガス圧力空間分布の制御手法開発

高エネルギーイオン流れ場中の実験には、イオンビーム貫通可能な放電形態のプラズマ生成装置が必要となる。一方で、再結合状態の安定した形成には、高密度プラズマの生成と、試験領域へのガス注入によるプラズマの冷却が必要となる。これらの条件を満たすためには放電形態は高周波放電を採用すべきであり、なおかつ、プラズマ生成領域と試験領域の中性ガス圧力を独立に制御する必要がある。

そこで、試験領域へ流入するプラズマの密度を過度に低下させることなく中性ガスのコンダクタンスを抑制するオリフィスを開発する。また、差動排気システムを整備することで領域間の中性ガス圧力の独立性を高める。中性ガス圧力の空間分布を計算し、オリフィス開発と差動排気システム整備に反映させる。

(2)空間分布計測のための分光システム開発

プラズマ生成領域から試験領域まで磁力線に沿った空間分布計測が必要であり、また、磁力線垂直方向の分布計測も同時に行う必要がある。プラズマに与える擾乱を抑えつつ多点同時計測を行うために、プラズマからの放射を分光し得られたスペクトルから密度や温度を計測する必要がある。

そこで、波長分解能に優れる回折格子分光器と二次元撮像素子を組み合わせ、さらに適切な光ファイババンドルを適用することで、空間 5-10 点程度のスペクトルの同時計測を行う。このシステムでは微弱な線スペクトルも計測可能な、反面データ転送速度に制限され時間変化に 대응できない可能性がある。よく用いられる干渉フィルタを高電子増倍管と組み合わせたシステムは時間分解能に優れるが空間分布の計測が困難である。そのため特定の線スペクトル放射に対しては干渉フィルタを高速な二次元撮像素子と組み合わせることで、空間分布と時間変化の計測の両立を行う。得られた線スペクトル強度から密度や温度を求めるために、衝突・輻射モデルを適用する。

(3)高エネルギーイオン流に対するプラズマおよび中性粒子の応答調査

プラズマと中性粒子が共存する環境に高エネルギーイオン流を重畳させる必要がある。このような環境を実現できる実験装置を開発し、実験を行う。高エネルギーイオン流はイオンビームにより実現する。静電プローブ法と受動分光法を併用することで、プラズマと中性粒子の密度を独立に計測する。中性粒子の温度は室温程度を仮定する。電子温度は静電プローブ法や受動分光法で決定する。単原子分子であり原子分子素過程の解明に有利であること、衝突・輻射モデルの適用実績があることから、プラズマ生成・ガス注入・イオンビーム生成にはヘリウムを用いる。

(4)プラズマと中性粒子の分布を記述するモデル構築

高エネルギーイオンがプラズマや中性粒子と相互作用することで空間分布がどのように変化するかを記述するモデルを構築する。モデルの単純化のため、高エネルギーイオンは単一エネルギーのビーム状態とする。また、単原子分子の系を扱うことを最初のステップとする。

4. 研究成果

(1) 中性ガス圧力空間分布の制御手法開発

試験領域とプラズマ生成領域のガス圧力を独立に制御するために領域間でコンダクタンスを抑制するオリフィスを開発した。真空容器壁との接触部を絶縁することでオリフィス通過による電子密度低下の抑制を試みた。図1に開発したオリフィスの写真を示す。さらに試験領域とプラズマ生成領域の間で差動排気を行うことで領域間の独立性を向上させた。これらの手法により生成領域のガス圧力変動が抑制されることを見出した。

前述の手法を直線型高密度プラズマ源DT-ALPHAに適用した。試験領域ガス圧力変化時(0.5-20 Pa)の生成領域プラズマ密度変化が図2に示すように3倍程度の変動幅に収まることを見出した。

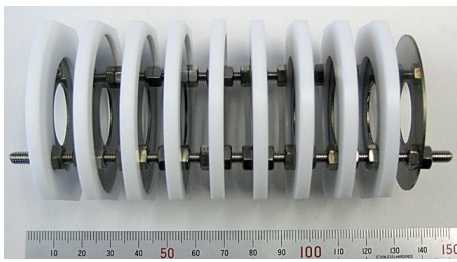


図1. 分布制御のために開発したオリフィス

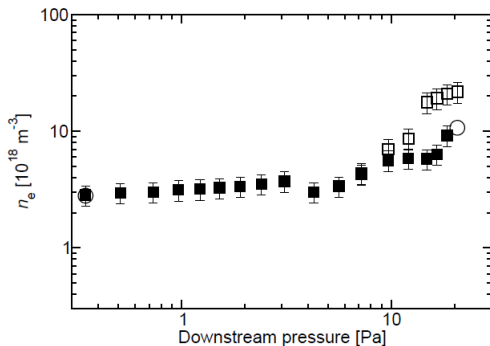


図2. 試験領域ガス圧力(横軸)に対する生成領域プラズマ密度(縦軸)

さらに、試験領域ガス圧力を増大させることで図3のようなヘリウム原子高励起状態からの線スペクトル放射を観測することに成功した。この放射は体積再結合に伴うものであることをボルツマンプロット法により確認した。これは高周波プラズマ源におけるヘリウムプラズマの体積再結合を実現した初めての実験となる。

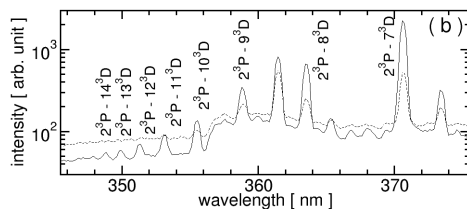


図3. ヘリウム高周波放電プラズマにおいて初めて観測された再結合スペクトル

(2) 空間分布計測のための分光システム開発

プラズマ側を分岐させた光ファイババンドルを整備し、試験領域と生成領域のプラズマの発光を同時に分光測定することに成功した。得られた He 原子線スペクトルに衝突・複写モデルを適用することで電子温度・電子密度の計測を行った。このとき準安定状態に対する準定常近似(QSS近似)が成立する条件を検討し、当該実験のガス圧力領域では QSS 近似が成立すること、低ガス圧力領域の実験で QSS 近似が破たんする可能性があり計測に注意を要することを見出した。

さらに干渉フィルタと二次元撮像素子を組み合わせた分光計測において、プリズムを用いた像の合成手法を開発した。この手法を用いて離れて存在する試験領域と生成領域のプラズマを隣接して結像することに成功し、DT-ALPHA 装置においてプラズマ生成領域と試験領域の発光強度の径方向分布を取得した。発光強度の比から求めた電子密度の空間分布を図4に示す。

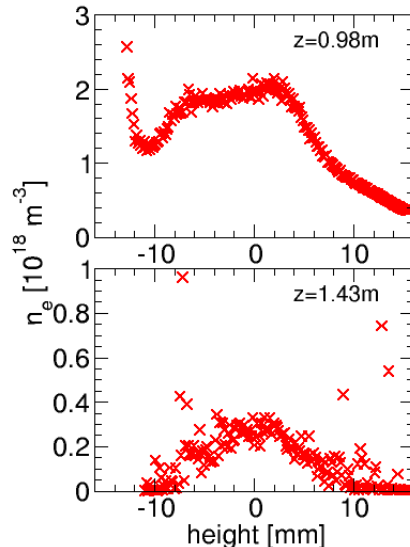


図4. プラズマ生成領域(z = 0.98 m)と試験領域(z = 1.43 m)における電子密度径方向分布。

(3) 高エネルギーイオン流に対するプラズマおよび中性粒子の応答調査

定常に維持された He 電離進行プラズマに対して He ガスパフにより電子密度を増加させる実験を行った。図5(a)はイオン飽和電流の時間変化であり、時刻 $t = 0.03$ s においてガスパフを行っている。高エネルギーイオン流として He⁺ビームを定常に入射した。ガスパフ後のイオン飽和電流上昇 I_{is} がビームの有無で異なることを見出した。同様に原子線スペクトル放射の時間変化も計測し、ビームの有無による相違を観測した。両者の比をとると電子温度依存性がほぼ相殺されて中性粒子密度 n_n の時間変化が得られることを見出した。図5(d)はそのようにして得られた中性粒子密度の時間変化である。この結果より、ビーム入射によって中性粒子密度が減少していることを明らかにした。ビームイオンと

中性粒子の荷電交換反応を考慮するとこの相違が説明できることを示した。

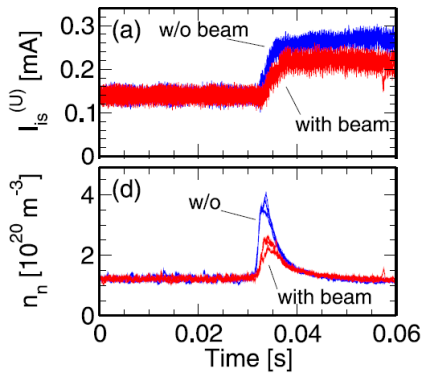


図 5. ガスパフに対する(a)イオン飽和電流の時間応答、および、(d)原子密度の時間応答の高エネルギーイオンの有無による相違

(4) プラズマと中性粒子の分布を記述するモデル構築

高エネルギーイオンと再結合プラズマの相互作用として、高エネルギーイオンが原子と衝突する過程が再結合過程と競合するモデル(図 6)を考案し、電子密度の磁力線方向の空間変化を解析的に調べた。競合過程としてイオン衝突電離を考えると解析解が得られることを見出した。図 7 に電子密度空間分布の高エネルギーイオン強度依存性を示す。高エネルギーイオンが存在しない場合($\epsilon = 0$)に電子密度が下流で減少する分布を得ることができた。これに対して高エネルギーイオンが重畳された場合に電子密度の減少が抑制されることを明らかにした。体積再結合過程により下流に向かって電子密度が減少することと、高エネルギーイオン衝突により再結合過程が抑制されることを表すモデルを構築することができた。高エネルギーイオン強度を表すパラメータ ϵ は単位時間単位体積当たりのイオン衝突電離と再結合のイベント数の比となっていることを見出した。これにより大型の環状磁場閉じ込め装置のダイバータ領域で発現する現象を、小型装置で模擬するための1つの無次元パラメータを決定することができた。

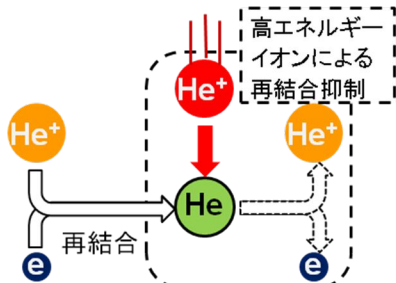


図 6. 高エネルギーイオン衝突電離による再結合過程抑制の模式図

以上により、プラズマと中性粒子の結合系において高エネルギーイオン流の存在が影

響を及ぼすことを実験とモデルの両面から示すことができたといえる。今後はより現実に即した系の現象解明が課題となり、磁場閉じ込め核融合炉のダイバータ領域に着目するならば、水素分子が関与する素過程を取り込んだ研究が重要となる。

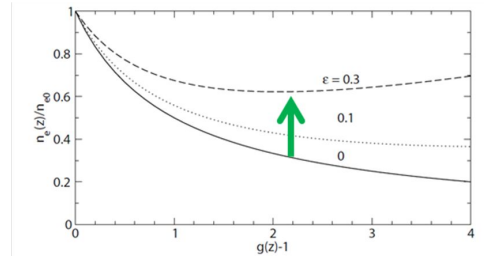


図 7. プラズマ密度の沿磁力線方向空間分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. A. Okamoto, A. Daibo, S. Kitajima, T. Kumagai, H. Takahashi, T. Takahashi, and S. Tsubota, *Effect of Energetic Ion on Spatial Distribution of Recombining Plasma*, JPS Conference Proceedings **1** (2014), 015010, 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.1.015010
2. T. Kumagai, A. Okamoto, H. Takahashi, A. Daibo, T. Takahashi, S. Tsubota, and S. Kitajima, *Ion Flow Measurement Using a Directional Langmuir Probe in the Radio Frequency Plasma Source DT-ALPHA*, JPS Conference Proceedings **1** (2014), 015043, 査読有, DOI: 10.7566/JPSCP.1.015043
3. A. Daibo, A. Okamoto, H. Takahashi, T. Kumagai, T. Takahashi, S. Tsubota and S. Kitajima, *Development of ion source for simulation of edge localized mode in divertor plasma*, Review of Scientific Instruments **85** (2013), 02B307, 査読有, DOI: 10.1063/1.4826099
4. A. Okamoto, Y. Kawamura, H. Takahashi, T. Kumagai, A. Daibo, and S. Kitajima, *Development of Multi-Port Imaging System for Divertor Simulating Linear Device*, Fusion Science and Technology **63** (2013), 1T, 205-208, 査読有, <http://www.ans.org/pubs/journals/fst/>
5. H. Takahashi, A. Okamoto, Y. Kawamura, T. Kumagai, A. Daibo, and S. Kitajima, *Line Spectra Observation of the Rydberg He Atoms due to Volumetric Recombination in the RF Plasma Source DT-ALPHA*, Fusion

- Science and Technology **63** (2013), 1T, 404-407, 査読有, <http://www.ans.org/pubs/journals/fst/>
6. A. Okamoto, M. Isobe, S. Kitajima, and M. Sasao, *Distribution of Footprint Marked by Energetic Alpha Particle Bombardment on the First Wall*, Journal of Nuclear Materials **438** (2013), S883-S886, 査読有, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.191
 7. A. Okamoto, H. Takahashi, Y. Kawamura, A. Daibo, T. Kumagai, S. Kitajima, and M. Sasao, *Steady-state recombining plasma in a radio-frequency plasma device for divertor-detachment study*, Plasma and Fusion Research **7** (2012), 2401018, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2401018
 8. A. Okamoto, H. Takahashi, S. Kitajima, and M. Sasao, *Charge Exchange Momentum Transfer due to Ion Beam Injection in Partially Ionized Plasmas*, Plasma and Fusion Research **6** (2011), 1201153, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.6.1201153
 9. A. Okamoto, M. Isobe, S. Kitajima, and M. Sasao, *Detection of Lost Alpha Particle by Concealed Lost Ion Probe*, Review of Scientific Instruments **81** (2010), 10D312, 査読有, DOI: 10.1063/1.3489968
- [学会発表](計 31 件)
1. 岡本敦, 大坊昂, 高橋宏幸, 熊谷孝宏, 高橋拓也, 坪田慎平, 北島純男:「ダイバータ模擬装置 DT-ALPHA における中性粒子密度分布に対する高エネルギーイオンの影響」, プラズマ・核融合学会第 30 回年会, 東京, 2013 年 12 月 3-6 日
 2. 岡本敦, 大坊昂, 高橋宏幸, 熊谷孝宏, 高橋拓也, 坪田慎平, 北島純男:「イオンビーム存在下における再結合プラズマ空間分布の検討」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島, 2013 年 9 月 25-28 日
 3. A. Okamoto, A. Daibo, S. Kitajima, T. Kumagai, H. Takahashi, T. Takahashi, and S. Tsubota: "Effect of Energetic Ion on Spatial Distribution of Recombining Plasma", 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, D1-4-O1, Jul. 14-19, 2013, Chiba, Japan.
 4. A. Okamoto, H. Takahashi, Y. Kawamura, T. Kumagai, A. Daibo, T. Takahashi, and S. Kitajima: "Volumetric recombining plasma in helicon source divertor simulator", 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, P1.129, Jul. 1-5, 2013, Espoo, Finland.
 5. 岡本敦, 川村悠祐, 高橋宏幸, 大坊昂, 熊谷孝宏, 高橋拓也, 北島純男:「DT-ALPHA 装置における He I 線強度空間分布の分光計測」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 東広島, 2013 年 3 月 26-29 日
 6. 岡本敦, 高橋宏幸, 川村悠祐, 熊谷孝宏, 大坊昂, 高橋拓也, 北島純男:「高周波プラズマ源 DT-ALPHA におけるヘリウム再結合プラズマの分光診断」, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 福岡, 2012 年 11 月 27-30 日
 7. A. Okamoto, Y. Kawamura, H. Takahashi, T. Kumagai, A. Daibo, and S. Kitajima: "Spectroscopic study of an RF linear plasma device for advanced divertor plasma development", Joint conference of 9th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement and 3rd International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion, O/PMIF-12, Aug. 27-31, 2012, Tsukuba, Japan.
 8. A. Okamoto, H. Takahashi, Y. Kawamura, A. Daibo, T. Kumagai, S. Kitajima, and M. Sasao: "Steady state recombining plasma in a radio-frequency plasma device for divertor detachment study", 21st International Toki Conference, P1-66, Nov. 28-Dec. 1, 2011, Toki, Japan.
 9. 岡本敦, 西内嗣浩, 高橋宏幸, 川村悠祐, 熊谷孝宏, 大坊昂, 北島純男, 笹尾眞實子:「DT-ALPHA 装置における再結合プラズマ生成のための中性粒子分布制御」, プラズマ・核融合学会第 28 回年回/応用物理学会第 29 回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会(領域 2)2011 年秋季大会, 金沢, 2011 年 11 月 22-25 日
 10. 岡本敦, 西内嗣浩, 高橋宏幸, 川村悠祐, 北島純男, 笹尾眞實子:「DT-ALPHA 装置におけるイオンビーム入射時のガスパフ応答の変化」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪, 2010 年 9 月 23-26 日
 11. A. Okamoto, H. Takahashi, T. Nishiuchi, T. Isono, S. Kitajima, and M. Sasao: "Experimental Study of a Recombining Plasma under High Energy Ion Flux", 19th International Conference on Plasma Surface Interactions, P1-89, May 24-28, 2010, San Diego, USA.
6. 研究組織
- (1)研究代表者
 岡本 敦 (OKAMOTO, ATSUSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 50396793