

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14426

研究課題名（和文）統計的磁場による不純物遮蔽がITER周辺プラズマでのタングステン輸送に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effects of impurity screening by stochastic magnetic field on tungsten transport in ITER edge plasmas

研究代表者

大石 鉄太郎 (Oishi, Tetsutarou)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：80442523

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：大型ヘリカル装置LHDにおいて、磁場閉じ込めプラズマの周辺部統計的磁場において発現する不純物遮蔽現象が、タングステンイオンに対しても効果的に作用する条件を探索した。タングステン入射に対するプラズマ放電の維持/崩壊のパラメータ領域調査、磁力線平行方向の運動量バランスによって周辺プラズマの不純物輸送を記述する理論モデルの実験的検証、低価数から高価数までのタングステンイオン多波長同時分光計測において成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タングステンが不純物イオンとしてプラズマ中に蓄積すると、74という高原子番号のため線放射によるエネルギー損失が大きくなる。この蓄積現象は、タングステンが金属表面から中性原子として放出され、低温の周辺プラズマで低電離状態のイオンとして輸送され、高温のコアプラズマに高電離状態のイオンとして蓄積する、という過程を経由する。従って、周辺プラズマにおける不純物遮蔽現象がタングステンの輸送に及ぼす影響の研究は、タングステン蓄積の制御へ向けた可能性を開拓するものである。

研究成果の概要（英文）：The impurity screening effect is caused by the edge stochastic magnetic field layer in magnetically-confined plasmas. In this study, the experimental conditions in which the impurity screening is effective on the tungsten ions were explored in the Large Helical Device (LHD). Plasma discharge parameter survey on sustain or collapse against tungsten injection, experimental verification on a theoretical impurity transport model based on the parallel momentum balance, and multi-wavelength spectroscopic diagnostics for tungsten ions from low to high charge states were conducted.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：不純物輸送 タングステン 真空紫外分光 ITER 周辺プラズマ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉では、プラズマ対向材が不純物イオンとしてコアプラズマに輸送されると、線放射によってエネルギー損失をもたらす。国際核融合実験炉 ITER ではプラズマ対向材として、第一壁にはベリリウム、熱負荷・粒子負荷が集中するダイバータ部にはタングステンの使用が予定されている。つまり ITER プラズマにおける不純物イオンの原子番号 Z の分布は低 $Z (= 4)$ のベリリウムから高 $Z (= 74)$ のタングステンに至るまで広範である。不純物イオンはまずスパッタによって材料表面から中性原子として放出され、次に低温の周辺プラズマで低電離状態のイオンとして輸送される。従って周辺プラズマでの低 Z から高 Z までの不純物イオンの線スペクトル放射を計測し、輸送特性の原子番号依存性を評価する方法を確立できれば、不純物輸送の制御に向けた可能性を開拓できる。

ITER を含むトカマクプラズマでは、周辺プラズマにおける周辺部局在モードという不安定性を緩和する必要があるが、そのためには外部から摂動磁場を印加して周辺部の磁場を統計化することが有効であることがわかっている。磁場の統計化とは、ある磁力線を追跡する際に、出発点の微小な差異がその後の軌道の大きな差異となることを指す。統計的磁場領域では結合長の異なる磁力線が折り重なって層を形成し、特徴的な輸送特性が現れる。現在提唱されている統計磁場中の不純物輸送モデルは、磁力線平行方向に不純物イオンに働く力のバランスが輸送を決定するというものである。特に不純物イオンとプラズマのバルクイオンとの間に働く摩擦力が支配的であれば不純物フローがダイバータ方向に駆動されて不純物遮蔽効果が生じ、イオン温度の勾配による熱力が支配的であれば不純物フローがプラズマ方向に駆動されて不純物侵入効果が生じる。

周辺プラズマにおける高 Z 不純物のスペクトル計測について、申請者らは核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD において真空紫外 (VUV) 分光システムを構築し研究を進めてきた。LHD の周辺部統計磁場を総称するエルゴディック層において、5 価タングステニオンの線スペクトルを核融合プラズマ実験で初めて同定したことにより、低価数から高価数までの同時観測が可能となった。さらに LHD では極端紫外 (EUV) 分光計測の結果から、鉄不純物には炭素不純物よりも不純物遮蔽効果が有効に作用することがわかっているため、より高 Z のタングステンまで含めた遮蔽効果の原子番号依存性を解明することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、磁場閉じ込めプラズマの周辺部統計的磁場において発現する不純物遮蔽現象が、タングステニオンに対しても効果的に作用する条件の探索を目的とする。実験は LHD にて行う。LHD プラズマはコア部の高温・高密度プラズマと周辺部の統計的磁場領域内で維持される低温 (電子温度 $10 \sim 500$ eV)・高密度プラズマに大別される。コア部では高電離タングステン、周辺部では低電離タングステニオンの発光を観測することができる。既に周辺部で強く発光する 5 価タングステニオンの線スペクトルが真空紫外分光計測によって波長同定されているため、発光分布を空間分解分光法を用いて計測し、低電離タングステニオンの発光強度の空間分布を得る。LHD の周辺磁場は元来より統計的磁場構造を有しており、不純物遮蔽効果がより大きな原子番号を有する不純物に有効に作用することが炭素や鉄といった既存の不純物について確認されている。さらにプラズマの密度を増加させると遮蔽効果が増大するが、これは磁力線平行方向に不純物イオンに働く力のバランスが輸送を決定すると仮定した理論モデルにおいて摩擦力がより支配的となることに対応している。そこでタングステンについても遮蔽効果の作用を検証し、理論モデルとの比較を通してタングステンの蓄積抑制へのシナリオを構築する。

3. 研究の方法

炭素樹脂内に微量のタングステン金属片を封入したペレットを LHD プラズマに入射し、タングステニオン発光線を VUV 分光及び EUV 分光で計測する。 $10^{16} \sim 10^{19}$ 個のタングステン原子を高温 (数 keV)・高密度 ($10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) プラズマに導入し、タングステニオンの十分な発光量を得る。このように多量の不純物を導入しても LHD ではプラズマが完全に放射崩壊せず安定した放電を保持することができ、本研究実現への大きな利点となる。

VUV 分光では、 3m 直入射分光器 (Mcpherson 2253, 焦点距離 3m , 検出部は背面照射型 CCD) により、波長 $300 \sim 3200 \text{ \AA}$ の発光を計測する。縦 1m 程度の大きさのプラズマを最大 1024 本の観測視線で空間分解計測する。分光器は 0.037 \AA/pixel という高い波長分散を有し、イオン発光線のドップラー分布観測が可能であり、発光強度・イオン温度・フロー速度の空間分布同時測定という点に特徴がある。

4. 研究成果

(1) タングステン入射に対するプラズマ放電の維持/崩壊のパラメータ領域調査

ペレットで入射するタングステン原子数 N_w 、プラズマの線平均電子密度 n_e 、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱パワー P_{NBI} をスキャンパラメータとし、タングステン不純物を導入してもプラズマが放射崩壊せず放電を維持することができるパラメータ領域を確定させた。図 1 に磁気軸位置 $R_{\text{ax}} = 3.6 \text{ m}$ の LHD プラズマにおける、タングステン入射に対する放電の応答を維持 (Sustained) または崩壊 (Collapsed) に分類した結果を示す。主に $n_e < 4.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ かつ $N_w <$

1.2×10^{18} においては放電が崩壊しなかった。

(2) エルゴディック層における不純物遮蔽モデルの実験的検証

エルゴディック層における不純物遮蔽効果の機構解明を目指し、炭素不純物イオンに関する分光計測の観測結果と、磁力線平行方向の運動量バランスによって不純物輸送を記述する理論モデルを用いた数値計算との比較を進めた。炭素イオンのフロー速度にはエルゴディック層最外縁部で最大値を持つ構造が観測され、その密度依存性および磁場配位依存性に関する計測データが得られた。炭素イオン温度には磁力線結合長と相関のある構造が観測され、磁力線平行方向の運動量バランスによって不純物輸送を記述する理論モデルを用いた数値計算とも良い一致を示した。高価数イオンからの発光と低価数イオンからの発光との強度比を不純物遮蔽効果の指標とし、背景プラズマが軽水素である場合と重水素である場合を比較したところ、重水素プラズマにおいて遮蔽効果がより顕著となることがわかった。不純物遮蔽現象の基礎物理となる不純物イオンの磁力線並行方向フローが背景プラズマのイオン質量に対して依存性を持つ様子も観測され、数値計算でも定性的に再現できた。

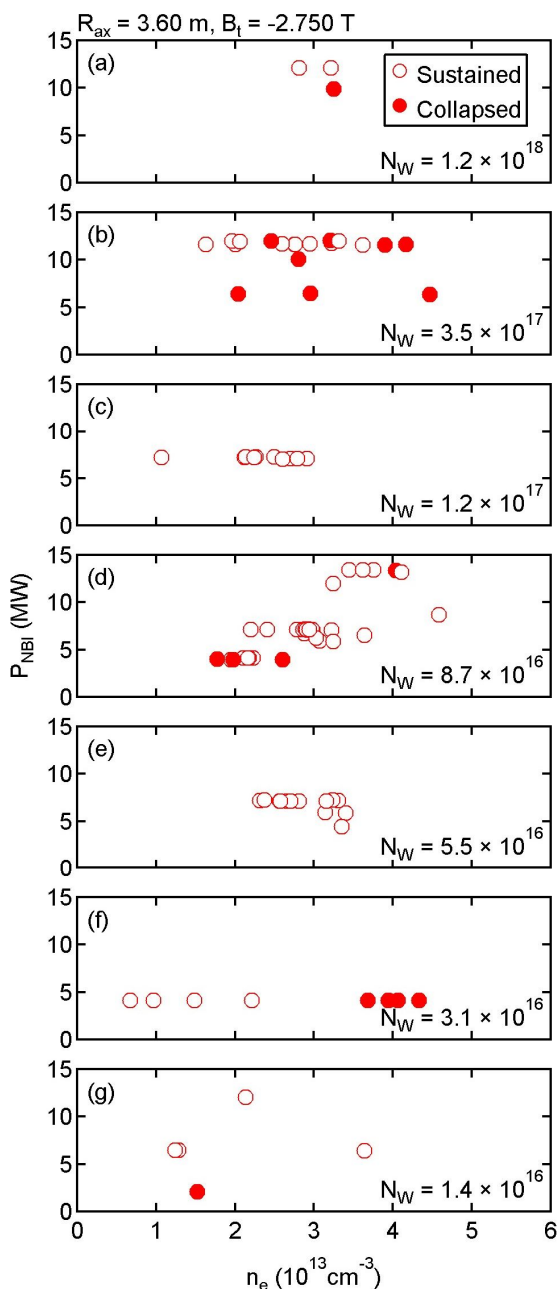


図1 磁気軸位置 $R_{ax} = 3.6$ m のLHDプラズマにおける、ペレットで入射するタングステン原子数 N_W 、プラズマの線平均電子密度 n_e 、中性粒子ビーム入射加熱パワー P_{NBI} に対する放電の応答（維持(Sustained)または崩壊(Collapsed)）。

(3) 低価数から高価数までのタングステンイオン多波長同時計測

極端紫外分光及び可視分光も併用し、タングステンイオンの多価数同時計測及び空間分布計測データの取得に成功した。図2はプラズマ加熱に用いる負イオン源 NBI(n-NBI)と正イオン源 NBI(p-NBI)が切り替わる時間帯において電子温度が減少し、エルゴディック層に分布する W^{5+} (639.7 Å (5d-6p)及び 677.8 Å (5d-6p), VUV 分光で観測) や W^{6+} (216.2 Å (5p-5d)及び 261.4 Å (5p-5d), EUV 分光で観測) といった低価数タングステンイオンからの発光が明確に観測できる放電である。また、タングステン入射後に電子サイクロトロン共鳴加熱を印加した放電では、タングステンイオンの価数分布が高価数側に变化する様子が観測された。一部の価数については空間分布も取得できており、これらは背景プラズマのパラメータと不純物輸送との相関を議論する上で基礎データとなりうるものである。

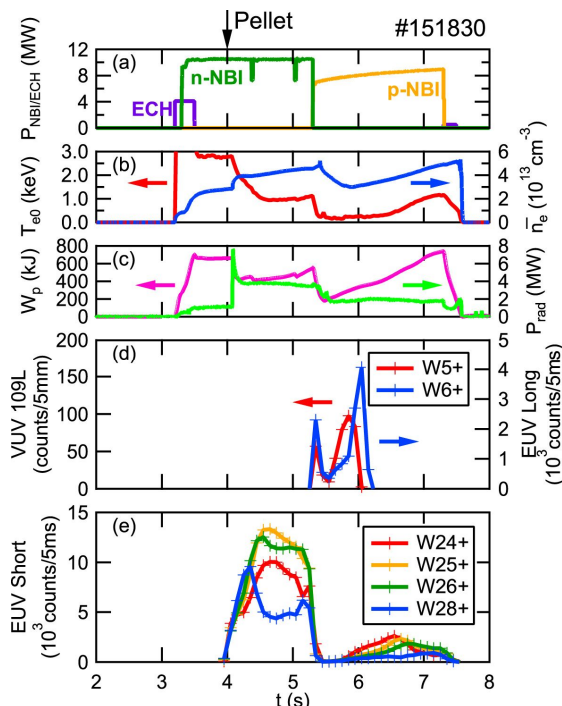


図2 低価数タングステンイオンからの発光強度の経時変化と放電波形。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 OISHI Tetsutarou, MORITA Shigeru, HUANG Xianli, LIU Yang, GOTO Motoshi, the LHD Experiment Group	4. 巻 13
2. 論文標題 Response of Plasmas to Tungsten Pellet Injection in Neutral Beam Heated Discharges in Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3402031 ~ 3402031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3402031	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 Oishi T., Morita S., Dai S.Y., Kobayashi M., Kawamura G., Huang X.L., Zhang H.M., Liu Y., Goto M., the LHD Experiment Group	4. 巻 58
2. 論文標題 Observation of carbon impurity flow in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device and its impact on the edge impurity control	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016040 ~ 016040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa8f63	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 該当する
1. 著者名 Oishi Tetsutarou, Morita Shigeru, Huang Xianli, Zhang Hongming, Liu Yang, Dai Shuyu, Kobayashi Masahiro, Kawamura Gakushi, Goto Motoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Effect of impurity source locations on up-down asymmetry in impurity distributions in the ergodic layer of large helical device	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 762 ~ 767
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.04.002	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 該当する
1. 著者名 Oishi T., Morita S., Dai S.Y., Kobayashi M., Kawamura G., Liu Y., Goto M., LHD Experiment Group	4. 巻 1289
2. 論文標題 Doppler profile diagnostics on VUV spectra for the impurity ion temperature in edge plasmas of Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012037 ~ 012037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1289/1/012037	査読の有無 無
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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 T. Oishi, S. Morita, M. Kobayashi, G. Kawamura, Y. Liu, Y. Kawamoto, M. Goto and the LHD Experiment group
2. 発表標題 Study of Carbon Impurity Transport in Deuterium and Hydrogen Plasmas in the Edge Ergodic Layer of Large Helical Device
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Oishi, S. Morita, M. Kobayashi, G. Kawamura, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group
2. 発表標題 Effect of deuterium plasmas on carbon impurity transport in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device
3. 学会等名 The 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Yang Liu, Motoshi Goto and the LHD Experiment Group
2. 発表標題 Doppler Profile Diagnostics on VUV Spectra for Emission Intensity, Ion Temperature and Flow Velocity of Impurity Ions in Edge Plasmas of Large Helical Device
3. 学会等名 24th International Conference on Spectral Line Shapes (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石鉄太郎, 森田繁, 小林政弘, 河村学思, 川本靖子, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの周辺部統計的磁場領域における不純物遮蔽効果への重水素プラズマの影響
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 大石鉄太郎, 森田繁, 戴舒宇, 小林政弘, 河村学思, 劉洋, 川本靖子, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの統計的磁場領域がもたらす 不純物制御の新展開
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石鉄太郎, 森田繁, 小林政弘, 河村学思, 劉洋, 川本靖子, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの周辺部統計的磁場領域における炭素不純物フローへの重水素プラズマの影響
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 T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group
2. 発表標題 Response of plasmas to tungsten pellet injection in neutral beam heated discharges in Large Helical Device
3. 学会等名 Joint meeting of the 26th International Toki Conference (ITC-26) and The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Shuyu Dai, Masahiro Kobayashi, Gakushi Kawamura, Xianli Huang, Yang Liu, Motoshi Goto and the LHD Experiment group
2. 発表標題 Observation of carbon impurity flow in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device and its dependence on the magnetic field configuration
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (PLASMA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石鉄太郎, 森田繁, 戴舒宇, 小林政弘, 河村学思, 劉洋, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの周辺部統計的磁場領域における炭素不純物フローの不純物輸送への影響
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 T. Oishi, S. Morita, D. Kato, I. Murakami, H. A. Sakaue, Y. Kawamoto, M. Goto and the LHD Experiment group
2. 発表標題 Temporal Evolution of Emissions from Tungsten Ions in Various Charge States Observed in Impurity Pellet Injection Experiments in Large Helical Device
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Oishi, S. Morita, M. Kobayashi, G. Kawamura, Y. Kawamoto, M. Goto and the LHD Experiment Group
2. 発表標題 Study of Impurity Transport in Deuterium and Hydrogen Plasmas in the Edge Stochastic Magnetic Field Layer of Large Helical Device
3. 学会等名 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石鉄太郎, 森田繁, 加藤太治, 村上泉, 坂上裕之, 川本靖子, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの真空紫外波長域における高電離タングステンイオンの禁制線の探索
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 大石鉄太郎, 森田繁, 小林政弘, 河村学思, 川本靖子, 後藤基志, LHD実験グループ
2. 発表標題 LHDの周辺部統計的磁場領域での不純物輸送における背景プラズマの同位体効果
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究活動状況 プラズマから「流れ去る」不純物 - 不純物遮蔽効果の分光計測による観測 - http://www.nifs.ac.jp/lhdreport/mailinfo_297.html</p>
--

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