

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800282

研究課題名(和文) ITER周辺プラズマの診断のための低電離タングステンスペクトルと不純物輸送の研究

研究課題名(英文) A study of tungsten ions at lower ionization stages and impurity transport for the diagnostics of 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置LHDにおいて低電離タングステニオンが放射する真空紫外スペクトルを、3m直入射真空紫外分光器を用いて計測した。5個タングステニオンが放射する605.926 (5d-6p)、639.683 (5d-6p)、677.722 (5d-6p)、1168.151 (6s-6p)、1467.959 (6s-6p)オングストロームにピーク波長を持つWVI線スペクトルは強度が大きく他の不純物スペクトルから独立していることがわかり、プラズマ対向材料としてタングステンをを用いるITER等の実験装置において低価数タングステニオンの分光計測を行う際に有用であることが強く示唆された。

研究成果の概要(英文)：Vacuum ultraviolet (VUV) spectra of line emissions from tungsten ions at lower ionization stages have been measured in the Large Helical Device (LHD) using a 3m normal incidence spectrometer. It was found that W VI lines at the wavelengths of 605.926 (5d-6p), 639.683 (5d-6p), 677.722 (5d-6p), 1168.151 (6s-6p) and 1467.959 (6s-6p) Angstrom are emitted with extremely high intensity and entirely isolated from other intrinsic impurity line. The result strongly suggests that those lines may be useful for the spectroscopic study in ITER and other magnetic fusion devices with tungsten materials as the plasma facing component.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：不純物輸送 低電離タングステン 真空紫外分光 ITER 周辺プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

金属タングステンは、磁場閉じ込め核融合炉におけるプラズマ対向材として用いる場合、高融点・低水素吸蔵・低スパッタリング率といった性質が利点である。そのため国際熱核融合実験炉 ITER では、熱負荷・粒子負荷が集中するダイバータ部の素材として、タングステンの使用が予定されている。

一方、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 (1) 金属表面から中性原子として放出され、(2) 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、(3) 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、周辺プラズマでの輸送過程に関連したタングステンの密度分布とその経時変化を計測し、その輸送特性を評価できれば、タングステン蓄積の制御に向けた可能性を開拓できる。

磁場閉じ込めプラズマ中でのタングステン分布計測には、線スペクトルの分光計測が有効である。これまでに、金属表面からの放出は中性原子  $W^0$  の可視分光(波長  $\lambda \sim 4000 \text{ \AA}$ ) を用いて、コアプラズマへの蓄積は高電離イオン  $W^{44+}$  や  $W^{45+}$  の極端紫外分光 ( $\lambda \sim 60 \text{ \AA}$ ) を用いてそれぞれ評価されてきた。しかし、金属表面とコアプラズマとの間をつなぐ、周辺プラズマでの低電離タングステニオンの計測例は存在しなかった。特に近年、周辺部での不純物輸送がコアプラズマの性質に大きく影響することが指摘されてきたが、タングステンについては周辺プラズマ中での価数および密度の分布が全く不明であるため、低電離タングステン計測の確立が求められていた。

### 2. 研究の目的

本課題研究では、磁場閉じ込めプラズマにおいて真空紫外領域で発光する低電離タングステニオンの線スペクトルを世界で初めて計測する。実験は核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 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  $10 \sim 500 \text{ eV}$ )・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。

まず、真空紫外分光計測によって低電離タングステニオンの発光線を波長同定し、タングステン発光空間分布計測に有用なスペクトルを決定する。次に、空間分解分光法を用いてタングステニオンからの発光分布を計測し、低電離タングステニオンの空間分布を得る。

低電離タングステニオンは束縛電子数が多いため、その線放射によるエネルギー損失量はタングステニオンからの全放射量

において大きな割合を占める。計測できる全ての低電離タングステン発光線を定量測定することにより放射損失を評価する。

一方、LHD の周辺磁場は統計的磁場構造を有しており、磁力線の統計性を示すコロモゴロフ長と不純物遮蔽効果の密接な関係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。遮蔽効果はより大きな原子番号を有する不純物により有効に作用する。タングステンについてその効果を検証し、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

LHD プラズマにタングステン固体ペレットを入射し、タングステニオン発光線を真空紫外(VUV)分光で計測する。図 1 (a)に LHD プラズマ、分光器と分光計測の光軸、及びペレット入射軌道の平面図を、(b)に磁場のポロイダル断面上における分光計測の視野角とペレット入射軌道を示す。

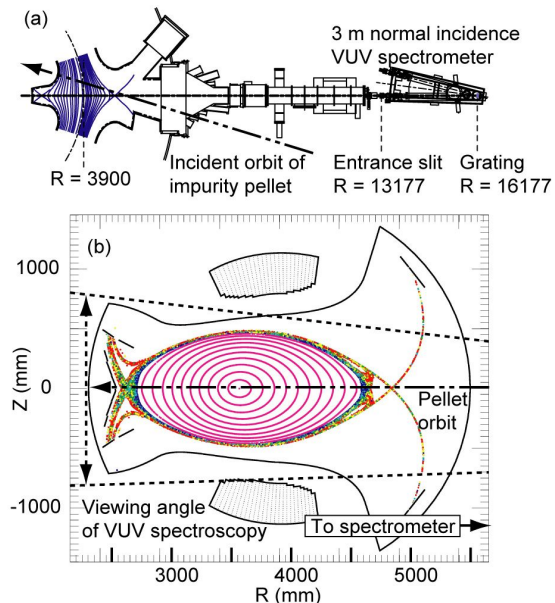


図 1 (a) LHD プラズマ、分光器と分光計測の光軸、及びペレット入射軌道の平面図。(b) 磁場のポロイダル断面上における分光計測の視野角とペレット入射軌道。

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プラズマに入射する。  $10^{18} \sim 10^{19}$  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。

3mVUV 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

Å/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、イオン温度の空間分布測定という点に特徴がある。低電離タングステンのイオン温度を計測し電離ポテンシャルと比較し、その径方向分布計測と同時に解析し、より信頼性の高いイオン価数の決定とより精度の高い波長同定を目指す。

#### 4. 研究成果

LHD プラズマに入射したタングステンペレットの溶発時に放射される発光を分光計測し、495~1475 Å の波長領域における真空紫外スペクトルの波長同定を行った。ペレット入射直後にプラズマの温度が下がった時に3価から6価にわたる多数の線スペクトルが観測された。図2に示すように、5価タングステンイオンの605.926 Å (5d-6p), 639.683 Å (5d-6p), 677.722 Å (5d-6p), 1168.151 Å (6s-6p), 1467.959 Å (6s-6p)にピーク波長を持つWVI線スペクトルは強度が大きく他の不純物スペクトルから独立しているため、プラ

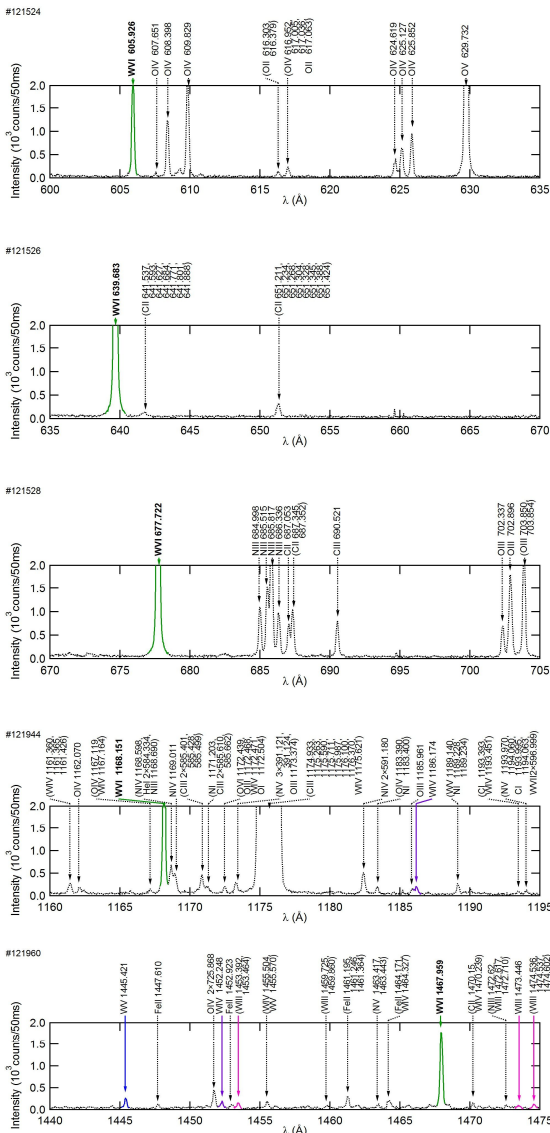


図2 5価タングステンイオンからの線スペクトル(WVI)を含む真空紫外スペクトル。

ズマ対材料としてタングステンを用いるITER やその他の実験装置において低価数タングステンイオンの分光計測を行う上で有用な線スペクトルであることが明らかになった。特に639.683 Åの一次光と二次光、及び677.722 Åの一次光はLHDで不純物のルーチンモニター計測に用いられている低分散の20cm直入射VUV分光器によっても明確に観測された。

図3(a)(b)はそれぞれタングステンペレット入射時のプラズマ中心の電子密度と電子温度、及び20cm直入射VUV分光器で計測したWVI639.683 Å線スペクトルの二次光強度の経時変化である。ペレット入射の瞬間にペレットの溶発による発光が観測され、電子温度が減少するフェーズでWVIの発光が持続する。図3(c)は3mVUV分光器で計測したペレット入射後100~200msのWVI639.683 Å線スペクトル強度の垂直方向分布である。図中の”a99”はプラズマの閉じ込め領域の上下端の位置を表す指標である。5価タングステンイオンがプラズマ閉じ込め領域の下端付近から、さらにそれよりも外側の統計的磁場を総称するエルゴディック層にかけて局在しており、その分布は上下非対称となることがわかった。

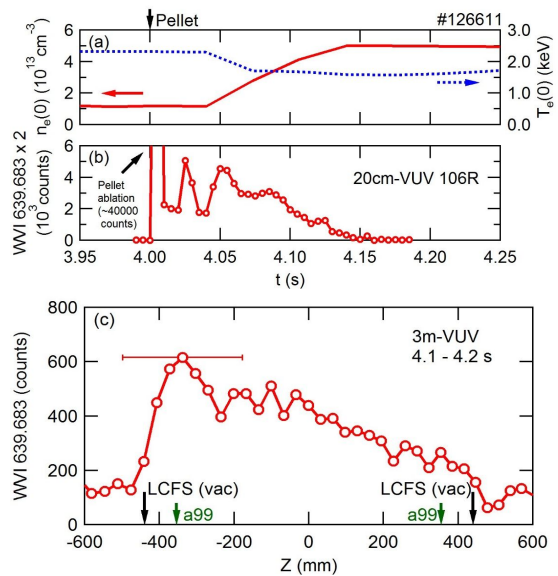


図3 タングステンペレット入射時の(a)プラズマ中心の電子密度と電子温度、及び(b)WVI 639.683 × 2 Å線スペクトル強度の経時変化。(c)ペレット入射後100~200msのWVI 639.683 Å線スペクトル強度の垂直方向分布。

図4にWVI 605.926 Å線スペクトルの二次光のドップラープロファイルを示す。ドップラー広がりから求めたイオン温度は $137 \pm 52$  eVとなり、他のWVI線スペクトルから求めたイオン温度も100eV前後の値をとった。この値はタングステン5価イオンが局在するエルゴディック層の電子温度と同等の値であるが、イオン化ポテンシャル65 eVよりも若

干高く、ペレット入射に伴う過渡的な輸送現象の影響を示唆している。

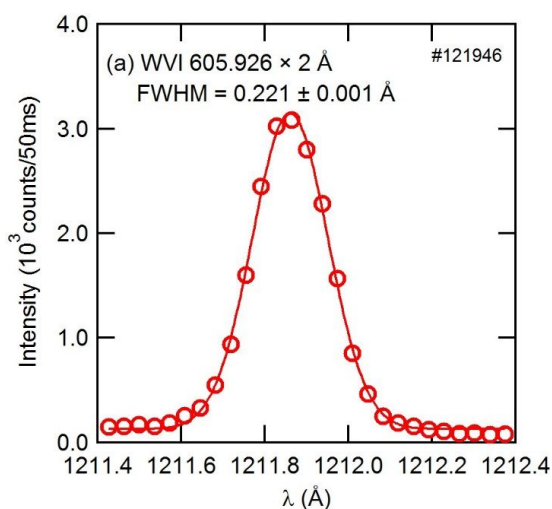


図4 WVI 605.926 Å 線スペクトルの二次光のドブラープロファイル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

(1) Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Xianli Huang, Hongming Zhang, Yang Liu, Shuyu Dai, Masahiro Kobayashi, Gakushi Kawamura, Motoshi Goto and the LHD Experiment Group, Effect of Impurity Source Locations on Up-Down Asymmetry in Impurity Distributions in the Ergodic Layer of Large Helical Device, Nuclear Materials and Energy, 査読有, 2017, in press  
DOI: 10.1016/j.nme.2017.04.002

(2) Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Xianli Huang, Hongming Zhang, Motoshi Goto and the LHD Experiment Group, Observation of W IV-W VII line emissions in wavelength range of 495-1475 Å in the large helical device, Physica Scripta, 査読有, 2016, Vol. 91, 025602  
DOI: 10.1088/0031-8949/91/2/025602

(3) Tetsutarou OISHI, Shigeru MORITA, Xianli HUANG, Hongming ZHANG, Motoshi GOTO and the LHD Experiment Group, Line Spectrum of Tungsten Ions at Low Ionization Stages in Large Helical Device in Wavelength Range of 300-2400 Å Measured Using 20 cm Normal Incidence VUV Spectrometers, Plasma and Fusion Research, 査読有, 2015, Vol. 10, 3402031  
DOI: 10.1585/pfr.10.3402031

(4) Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Chunfeng Dong, Erhui Wang, Xianli Huang, Motoshi Goto, and LHD Experiment Group, Space-resolved 3 m normal incidence spectrometer for edge impurity

diagnostics in the large helical device, Applied Optics, 査読有, 2014, Vol. 53, 6900-6912  
DOI: 10.1364/AO.53.006900

(5) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang and M. Goto, Line spectrum and ion temperature measurements from tungsten ions at low ionization stages in large helical device based on vacuum ultraviolet spectroscopy in wavelength range of 500-2200 Å, Review of Scientific Instruments, 査読有, 2014, Vol. 85, 11E415  
DOI: 10.1063/1.4885470

(6) Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Chunfeng Dong, Erhui Wang, Xianli Huang, Motoshi Goto, Ion temperature and radial profile of CII-CV located in the edge and divertor plasmas of large helical device, Journal of the Korean Physical Society, 査読有, 2014, Vol. 64, 840-843  
DOI: 10.3938/jkps.64.840

〔学会発表〕(計15件)

(1) 大石鉄太郎, 森田繁, 戴舒宇, 小林政弘, 河村学思, 黄賢礼, 劉洋, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物フローの観測と周辺不純物制御への影響, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月17日~20日, 大阪大学(大阪府・豊中市)

(2) T. Oishi, S. Morita, S. Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura, X. L. Huang, H. M. Zhang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group, Observation of carbon impurity flow in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device and its impact on the edge impurity control, The 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日~22日, 国立京都国際会館(京都府・京都市)

(3) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group, A Study of WI-WVII Line Emissions from Low-Ionized Tungsten Ions in Large Helical Device, The 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA2016), 2016年9月25日~29日, Gunsan, Korea Rep. of

(4) 大石鉄太郎, 森田繁, 戴舒宇, 小林政弘, 河村学思, 黄賢礼, 張洪明, 劉洋, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物フローの磁場配位依存性, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016年9月13日~16日, 金沢大学(石川県・金沢市)

(5) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment

group, Effect of Impurity Source Locations on Up-Down Asymmetry in Impurity Distributions in the Ergodic Layer of Large Helical Device, The 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (22nd PSI), 2016年5月30日~6月3日, Rome, Italy

(6) 大石鉄太郎, 森田繁, 戴舒宇, 小林政弘, 河村学思, 黄賢礼, 張洪明, 劉洋, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物のフローと不純物遮蔽効果との相関, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016年3月19日~22日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

(7) T. Oishi, S. Morita, S. Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura, X. L. Huang, H. M. Zhang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group, Observation of Up-Down Asymmetry in Impurity Line Emissions from the Ergodic Layer of Large Helical Device, The 10th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2015), 2015年12月14日~18日, Gandhinagar, India

(8) 大石鉄太郎, 森田繁, 黄賢礼, 張洪明, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物の発光強度・イオン温度・フロー速度の空間分布, プラズマ・核融合学会第32回年会, 2015年11月24日~27日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

(9) Tetsutarou OISHI, Shigeru MORITA, Shuyu DAI, Masahiro KOBAYASHI, Gakushi KAWAMURA, Xianli HUANG, Hongming ZHANG, Motoshi GOTO and the LHD Experiment group, Observation of carbon impurity flows in the ergodic layer of LHD using a space-resolved 3 m normal incidence VUV spectrometer, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, 2015年10月5日~9日, Greifswald, Germany

(10) 大石鉄太郎, 森田繁, 黄賢礼, 張洪明, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物のフローとイオン温度の空間分布, 日本物理学会 2015年秋季大会, 2015年9月16日~19日, 関西大学(大阪府・吹田市)

(11) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, M. Goto and the LHD Experiment group, Observation of asymmetric radial profile of tungsten ions in low ionization stages located in edge plasmas of Large Helical Device, 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2015年6月22日~26日, Lisbon, Portugal

(12) 大石鉄太郎, 森田繁, 黄賢礼, 張洪明, 後藤基志, LHD 実験グループ, LHD のエルゴディック層における炭素不純物のフローとイオン温度の計測, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015年3月21日~24日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

(13) Tetsutarou Oishi, Spectroscopic Diagnostics of Multiply Charged Ions in Fusion Plasmas, Plasma Conference 2014 (PLASMA2014), 2014年11月18日~21日, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県・新潟市)

(14) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, M. Goto and the LHD Experiment group, Line Spectrum of Tungsten Ions at Low Ionization Stages in Large Helical Device in Wavelength Range of 300-2400 Measured Using 20 cm Normal Incidence VUV Spectrometers, 24th International Toki Conference "Expanding Horizons of Plasma and Fusion Science through Cross-Fertilization", 2014年11月4日~7日, セラトピア土岐(岐阜県・土岐市)

(15) T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, M. Goto and the LHD Experiment Group, Line Spectrum and Ion Temperature Measurements from Tungsten Ions at Low Ionization Stages in Large Helical Device Based on VUV Spectroscopy in Wavelength Range of 500-2200, The 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD2014), 2014年6月1日~5日, Atlanta, USA

【その他】

ホームページ等

(1) NIFS ニュース 2014年6・7月号「光でわかるプラズマの振る舞い~真空紫外分光による不純物計測~」

<http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/218-1.pdf>

## 6. 研究組織

### (1)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