

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01201

研究課題名（和文）強制非平衡イオン分光によるタングステン多価イオンの電離断面積測定

研究課題名（英文）Non-equilibrium ion spectroscopy of tungsten highly charged ions for measurements of ionization cross sections

研究代表者

加藤 太治 (Kato, Daiji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：60370136

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：国際熱核融合実験炉（ITER）のダイバータ材料にタングステンが用いられるため、ITERの高温プラズマ中で多価イオンとなったタングステンの原子過程を正確に予測することが高性能プラズマの生成と安定な核融合反応の維持を実現するために重要な課題となっている。本研究では、大学の実験室規模で実施可能な、小型電子ビームイオントラップ（CoBIT）と極端紫外域発光線の時間分解分光によって、これまで困難であった重元素多価イオンの電子衝突電離断面積の測定に挑戦し、金の多価イオンについて電離断面積を得ることに成功した。また、理論モデルとの比較から、CoBIT内での多価イオンの電離過程の詳細な知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、今後、重元素多価イオンの電離過程における多電子相関効果、相対論効果、および量子電磁力学効果のより詳細な理解が期待できるため、学術的な波及効果は大きいと考えられる。また、本期間中には実施できなかったが、タングステン多価イオンの電離断面積の実験的検証により、ITERの炉心プラズマでのタングステン多価イオンの分布を予測する物理モデルの精度が高まり、核融合発電の進展に貢献することが期待される。このように、社会的にも大きな意義のある成果が得られたと考えている。

研究成果の概要（英文）：Since tungsten is used as a divertor material in the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), accurate prediction of atomic processes of highly charged tungsten ions in high-temperature plasmas of ITER is an important issue to generate high-performance plasmas and to sustain stable deuterium-tritium fusion reactions in the plasmas. In this subject, we attempted to measure electron impact ionization cross sections of highly charged ions of heavy elements, which had been very difficult so far, using a compact electron beam ion trap (CoBIT) and time-resolved spectroscopy of extreme ultraviolet emission lines, which can be performed in a university laboratory, and have succeeded in obtaining ionization cross sections for highly charged gold ions. In addition, detailed knowledge of the ionization processes of highly charged ions in the CoBIT was obtained by comparison with theoretical models.

研究分野：原子物理学

キーワード：多価イオン 電離断面積 電子ビームイオントラップ 極端紫外スペクトル

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 (ITER) は 2025 年の運転開始を目指し、日本・欧州連合 (EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの 7 極により、フランスで建設が進められているトカマク型核融合実験炉である。ITER 計画では、重水素と三重水素の核燃焼プラズマの制御技術、炉工学技術や炉システムの安全性などの基本的技術を開発・実証することにより、核融合エネルギーによる発電を実証する原型炉建設のための科学的、技術的可能性を実証することを目標としている。ITER のプラズマ閉じ込め容器内には、核燃焼により生成されるヘリウムや不純物を炉心プラズマから排気するためのダイバータ装置が設置されるが、その表面部には高融点で水素同位体が滞留しにくいタングステン材料が用いられる。ところが、重元素であるタングステンは数十 keV もの高温に達する炉心プラズマ中でも完全には電離されず、束縛電子による強い光放射が起こるため、炉心プラズマに混入した場合に、プラズマの放射冷却、核融合反応効率の低下、更には炉心プラズマの消滅を引き起こす可能性がある。したがって、磁場閉じ込めプラズマでのタングステンの分布を明らかにすることが、ダイバータでのタングステン材料使用と高性能核融合炉心プラズマの定常維持を両立させるための鍵となっている。

プラズマ中でのタングステンの分布は、プラズマ中での電子衝突によるタングステンの電離と再結合、および輸送に強い影響を受ける。ところが、高価数のタングステン多価イオンの電離 / 再結合断面積データの大部分が未だ理論データだけで実験的には検証されていない。再結合過程については、最近、重イオン加速器・蓄積リングを用いた実験により、従来用いられている理論データの 20 倍も大きな値が報告され (Badnell et al. Phys. Rev. A 2016)、電離断面積についても理論データ (Loch et al. Phys. Rev. A 2005) の実験的検証が喫緊の課題となっている。

比較的低価数の多価イオンの電離断面積測定は、電子サイクロトロン共鳴型イオン源から引き出したイオンビームと電子ビームを交差させる交差ビーム法が行われているが、この方法では十分な密度の高価数イオン標的を得ることが極めて困難であり、タングステンでは 1 価 ~ 10 価 (Stenke et al. J. Phys. B 1995)、17 価 (Rausch et al. J. Phys. B 2011)、19 価 (Borovik et al. Phys. Rev. A 2016) までがこれまでに測定された。より高価数の重元素多価イオンの電離断面積測定はチャレンジングな課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高価数のタングステン多価イオンの電離断面積データの実験的検証のために、電子ビームイオントラップ (EBIT) 装置を用いた、大学の実験室規模で実施できる、電離断面積の測定方法を新たに確立することである。そのため我々は、EBIT 装置内にトラップされた非平衡状態のイオンからの発光線スペクトルの時間分解分光計測から電離断面積を得る独自の方法を考案した。この方法の特長として、イオン源から引き出したイオンビームを標的とするビーム交差法では実施されることがない高価数イオンについても測定が可能であり、また重イオン加速器のような極めて大規模な施設を使用する必要がない。

3. 研究の方法

(1) 小型電子ビームイオントラップ (CoBIT)

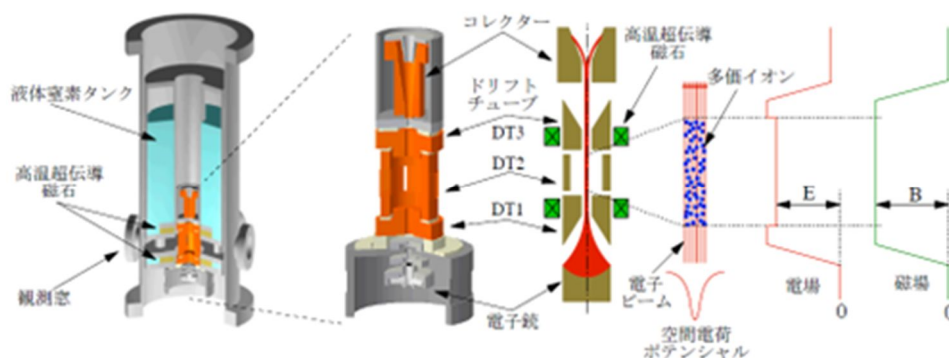


図 1 小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) の概略図

本研究で用いた小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) 装置本体は、電子銃、ヘルムホルツ型の超伝導コイル、3 つのドリフトチューブ (DT1 ~ 3)、電子コレクタで構成されている (図 1)。超伝導コイルに高温超伝導材を用いているため、液体窒素温度での運転が可能である。CoBIT 装置では、中央のドリフトチューブ (DT2) にトラップされたイオンを高密度電子ビームによる逐次電離で多価イオン化する。生成された多価イオンは、超伝導コイルによるビーム軸方向の強磁

場により圧縮された電子ビームの空間ポテンシャルにより径方向に閉じ込められる。また、ドリフトチューブの電位による井戸型の静電ポテンシャルによって軸方向にも閉じ込められる。トラップ領域内のイオンの最大価数は電子ビームエネルギーにより任意に制御することが可能で、CoBIT 装置ではタングステンであれば 10 価～30 価程度の多価イオンの生成・閉じ込めることができる。また、トラップ内は 10^{-8} Pa 程度の極高真空であり、残留中性ガスとの荷電交換が起こりにくく、多価イオンの価数分布を狭い範囲に限った分光測定が可能である。

(2) 時間分解 EUV 分光測定

CoBIT 装置内に生成・トラップされた q 価イオン (中性原子から q 個の電子が剥ぎ取られた正イオン) は、電子ビームエネルギーを瞬間的 (マイクロ 10^{-6} 秒程度) に電離エネルギーより高く上げることにより非平衡状態となり、電離が進行して時間経過とともに価数が高い $q+1$ 価イオンが生成される。このときの非平衡状態でのイオン密度の時間変化を、寿命がピコ (10^{-12}) 秒程度の電気双極子遷移によって放射される極端紫外 (EUV) 域の発光線強度の時間変化から測定することができる。本研究では、集束用の光学系を用いずに多価イオンからの微弱な発光スペクトルを検出器面上に結像させるために、平面結像型不等間隔凹面回折格子を用いた。回折格子で波長分散された極端紫外光は、位置有感型マイクロチャンネルプレート (MCP) を用いて高い時間分解で検出した。また、短い時間で統計的に十分な発光信号を得るために、電子ビームエネルギーのパルス制御と同期させて繰り返し発光スペクトル計測を行った。

(3) 理論計算

本研究グループが所有するプログラムコードを用いて相対論効果を考慮した電離断面積の理論計算を行った。標的電子の波動関数はパラメトリックポテンシャルを用いたディラック方程式を数値的に解き、電離した連続状態の電子波動関数の計算には歪曲波近似を用いた。直接電離過程の断面積は歪曲波ボルン近似により計算し、内殻電子励起からの自動電離 (励起自動電離) の効果も含めた。また、非平衡プラズマ中の多価イオンからの発光線スペクトルは、電子衝突励起と光放射脱励起を考慮した衝突・輻射モデルを用いて計算した。

4. 研究成果

電気通信大学の CoBIT 装置で行った金 (原子番号 79) 多価イオンの時間分解 EUV 分光測定で得られた実験データを解析し、金の 17 価イオン (Au^{17+}) から、18 価イオン (Au^{18+}) の基底状態 ($4f^{14}5s$) ならびに準安定励起状態 ($4f^{13}5s^2$) への電離断面積をそれぞれ得ることができた。これまで実験データの報告例はなく、本研究によって初めて得られた貴重な実験データである。また、従来の交差ビーム法では電離後のイオンの電子状態を選別した測定は不可能であったが、本研究では電離後の電子状態を選別してそれぞれの電離断面積が得られたことも特筆すべき成果である。

実験結果と比較するために、直接電離過程: $e + Au^{17+} \rightarrow Au^{18+} + e + e$ と励起自動電離過程: $e + Au^{17+} \rightarrow (Au^{17+})^* + e \rightarrow Au^{18+} + e + e$ を含めた電離断面積の理論計算を行った。図 2 に実験値と理論値の比較の結果を示す。理論値の破線は Au^{17+} イオンの基底状態 ($4f^{14}5s^2$ $J=0$) からの電離断面積の計算結果、実線は Au^{17+} の 2 つの準安定励起状態 ($4f^{13}5s^2 5p$ $J=3, 4$) からの電離断面積の寄与を含めた結果である。破線に比べて実線の方が低エネルギーで特に大きく増加し、実験値に近くなることから分かる。CoBIT 装置の電子密度 (10^{10} cm^{-3} 程度) では、寿命の長い準安定励起状態は、基底状態に光放射脱励起する前に電子衝突によって電離できるが、その寄与がかなり大きいことが本研究によって明らかになった。また、準安定励起状態からの電離の寄与を考慮してもまだ、実験値の方が理論値よりも大きな値を持つことが分かった。これは、本理論モデルに含まれていない、共鳴励起二重自動電離 (Resonant Excitation Double Autoionization: REDA): $e + Au^{17+} \rightarrow (Au^{16+})^{**} \rightarrow Au^{18+} + e + e$ が起こっている可能性を示唆している。REDA 過程についての研究例はまだ少なく、本研究によって重要な知見が得られたと考えられている。REDA 過程は特定の電子エネルギーで生じるため、今後、電離断面積の電子ビームエネルギー依存性を測定することによって

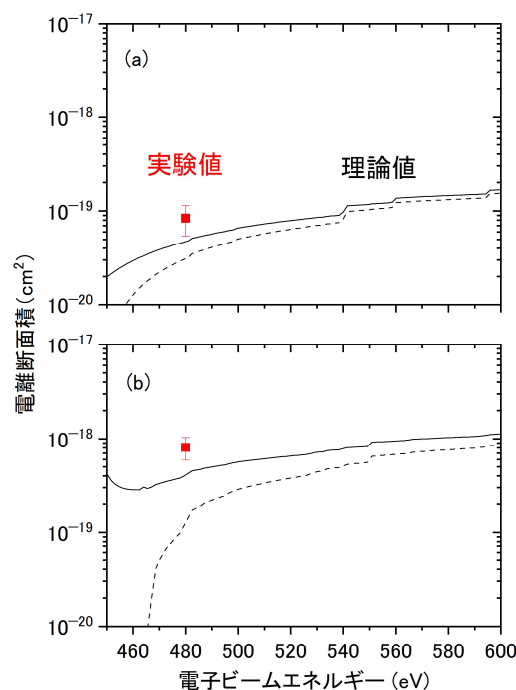


図 2 CoBIT 装置内での Au^{17+} から (a) Au^{18+} の基底状態 ($4f^{14}5s$)、(b) 準安定励起状態 ($4f^{13}5s^2$) への電離断面積の実験値と理論値の比較

検証できると考えている。

核融合科学研究所では、タングステン多価イオンの電離断面積測定を実施するために、同型の CoBIT 装置の EUV 分光器に位置有感型マイクロチャンネルプレート (MCP) の設置を行った。ところが、設置された MCP の動作不良等により課題期間中に断面積測定実験を実施することはできなかった。今後、引き続き実験を試みる予定である。

一方、CCD カメラを用いた実験によって、電離断面積測定に有用な EUV 波長領域の多価イオンの新たな発光線の探索を進めた。その結果、10 nm 付近にあるタングステンの 26 価と 27 価イオンの EUV 分光スペクトルが得られた。偶然の成果として、観測された 27 価イオンの発光線は、本研究によって電気八重極遷移による発光である事が判明し、実験室での自発遷移としては世界初の観測となった。また、高次禁制遷移であるにも関わらず、タングステンで特に強い発光を示すことが本研究によって明らかになった。また、金の 19 価～25 価の多価イオンからの 2～4 nm の EUV 発光線も多数同定された。その他、近紫外域～可視域ではあるが、300～400 nm の波長領域で 20 価～30 価のタングステン多価イオンの発光線が多数同定された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 6件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Purohit G., Kato D., Murakami I., Dhakar K. C., Gupta S., Sinha P. | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 Electron impact single ionization cross sections of W+ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal D | 6. 最初と最後の頁 219 ~ 219 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-021-00204-6 | 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 Era Shota, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Umezaki Toshiki, Nakamura Nobuyuki, Murakami Izumi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Emission Lines in 290-360 nm of Highly Charged Tungsten Ions W20+ - W29+ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 63 ~ 63 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9030063 | 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 Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Murakami Izumi, Goto Motoshi, Oishi Tetsutarou, Tamura Naoki, Funaba Hisamichi, Morita Shigeru | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Assessment of W density in LHD core plasmas using visible forbidden lines of highly charged W ions | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Fusion | 6. 最初と最後の頁 116008 ~ 116008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac22d1 | 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 Oishi Tetsutarou, Morita Shigeru, Kato Daiji, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki A., Kawamoto Yasuko, Kawate Tomoko, Goto Motoshi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Simultaneous Observation of Tungsten Spectra of W0 to W46+ Ions in Visible, VUV and EUV Wavelength Ranges in the Large Helical Device | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 69 ~ 69 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9030069 | 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 Ding Xiaobin, Zhang Fengling, Yang Yang, Zhang Ling, Koike Fumihito, Murakami Izumi, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Nakamura Nobuyuki, Dong Chenzhong | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Collisional-radiative modeling of the 5p-5s spectrum of W xiv - W xvi ions | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 042509-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.042509 | 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 Murakami Izumi, Kato Masatoshi, Emoto Masahiko, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Kawate Tomoko | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 NIFS Atomic and Molecular Numerical Database for Collision Processes | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Atoms | 6. 最初と最後の頁 71 ~ 71 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms8040071 | 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 Priti, Mita Momoe, Kato Daiji, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki A., Nakamura Nobuyuki | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Identification of visible lines from multiply charged W8+ and W9+ ions | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 042818-1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.042818 | 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, Kato Daiji, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki A, Kawamoto Yasuko, Goto Motoshi | 4. 巻 96 |
| 2. 論文標題 Observation of line emissions from Ni-like W46 + ions in wavelength range of 7-8 in the Large Helical Device | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physica Scripta | 6. 最初と最後の頁 025602 ~ 025602 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/abd0ba | 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 Murakami I., Kato D., Oishi T., Goto M., Kawamoto Y., Suzuki C., Sakaue H.A., Morita S. | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Progress of tungsten spectral modeling for ITER edge plasma diagnostics based on tungsten spectroscopy in LHD | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy | 6. 最初と最後の頁 100923 ~ 100923 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2021.100923 | 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 Oishi Tetsutarou, Morita Shigeru, Kato Daiji, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki A., Kawamoto Yasuko, Goto Motoshi, the LHD Experiment Group | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Identification of forbidden emission lines from highly ionized tungsten ions in VUV wavelength range in LHD for ITER edge plasma diagnostics | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy | 6. 最初と最後の頁 100932 ~ 100932 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2021.100932 | 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 Purohit G., Kato D., Murakami I., Gupta Shivani, Sinha P. | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 Calculation of electron induced ionization cross sections of fusion plasma relevant material: W atoms | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal D | 6. 最初と最後の頁 9-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-020-00030-2 | 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 M. Monobe, H.A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, H. Hara, T. Watanabe, N. Nakamura | 4. 巻 0 |
| 2. 論文標題 Resonant electron impact excitation of highly charged Fe ions studied with a compact electron beam ion trap | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry | 6. 最初と最後の頁 1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.3148 | 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 H.A.Sakaue, D. Kato, I. Murakami, H. Ohashi, N. Nakamura | 4. 巻 100 |
| 2. 論文標題 Observation of electric octupole emission lines strongly enhanced by the anomalous behavior of a cascading contribution | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 052515-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.052515 | 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 A. Sasaki, R.M. More, K. Fujii, D. Kato, I. Murakami | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Atomic kinetics calculations of complex highly-charged ions in plasmas in non-local thermodynamic equilibrium by using a Monte- Carlo approach | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 High Energy Density Physics | 6. 最初と最後の頁 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2019.04.005 | 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 S. Morita, C.F. Dong, D. Kato, Y. Liu, L. Zhang, Z.Y. Cui, M. Goto, Y. Kawamoto, I. Murakami and T. Oishi | 4. 巻 1289 |
| 2. 論文標題 Quantitative analysis on tungsten spectra of W6+ to W45+ ions | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012005-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1289/1/012005 | 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 PUROHIT Ghanshyam, KATO Daiji, MURAKAMI Izumi | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Electron Impact Ionization Cross Sections of Tungsten Atoms and Tungsten Ions | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 3401026 ~ 3401026 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3401026 | 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 Purohit G, Kato D | 4. 巻 51 |
| 2. 論文標題 Calculations for electron impact ionization of Be atoms and its charged states, Be ⁺ and Be ²⁺ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics | 6. 最初と最後の頁 135201 ~ 135201 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aac1ef | 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 Purohit G, Kato D | 4. 巻 51 |
| 2. 論文標題 Projectile charge effects on the differential cross sections for the ionization of molecular nitrogen by positrons and electrons | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics | 6. 最初と最後の頁 135202 ~ 135202 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aac34b | 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 Ding Xiaobin, Yang Jiaoxia, Zhu Linfan, Koike Fumihito, Murakami Izumi, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Nakamura Nobuyuki, Dong Chenzhong | 4. 巻 382 |
| 2. 論文標題 Collisional radiative model for the M1 transition spectrum of the highly-charged W 54+ ions | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters A | 6. 最初と最後の頁 2321 ~ 2325 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2018.05.046 | 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 MORITA Shigeru, HU Liqun, OH Yeong-Kook, ASHIKAWA Naoko, ISOBE Mitsutaka, KATO Daiji, KISHIMOTO Yasuaki, OHDACHI Satoshi, SAKAKIBARA Satoru, TODO Yasushi, KAMADA Yutaka, RAJU Daniel, XU Min | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Fusion Research and International Collaboration in the Asian Region | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 3502046 ~ 3502046 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3502046 | 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 A. Sasaki, R.M. More, K. Fujii, D. Kato, I. Murakami | 4. 巻 印刷中 |
| 2. 論文標題 Atomic kinetics calculations of complex highly-charged ions in plasmas in non-local thermodynamic equilibrium by using a Monte- Carlo approach | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 High Energy Density Physics | 6. 最初と最後の頁 印刷中 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 N. Nishida, Y. Hori, A. Yamauchi, M. Sakurai, H.A. Sakaue, and D. Kato | 4. 巻 印刷中 |
| 2. 論文標題 Characteristics of HCl _s Produced at Kobe EBIS under Modulated Operation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry | 6. 最初と最後の頁 印刷中 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 - |

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, N. Tamura, H. Funaba, S. Morita |
| 2. 発表標題 Assessment of W density in LHD core plasmas using visible forbidden lines of highly charged W ions |
| 3. 学会等名 28th Fusion Energy Conference (FEC2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 梅崎智暉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, 川手朋子, 村上泉 |
| 2. 発表標題 タングステン多価イオンの近紫外域禁制遷移の同定 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 梅崎智暉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, 川手朋子, 村上泉, 大石鉄太郎, 後藤基志, 川本靖子 |
| 2. 発表標題 小型電子ビームイオントラップを用いたタングステン多価イオンの近紫外域禁制遷移の同定 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 梅崎智暉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, 川手朋子, 村上泉 |
| 2. 発表標題 タングステン多価イオンの近紫外域禁制遷移の同定 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第25回支部大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 梅崎智暉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行, 川手朋子, 村上 泉 |
| 2. 発表標題 核融合プラズマ診断への応用に向けたタングステン多価イオンの近紫外域禁制遷移の同定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, N. Nakamura |
| 2. 発表標題 Compact Electron Beam Ion Trap for Spectroscopy of Multiply Charged Ions |
| 3. 学会等名 30th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG 2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木康, 物部将士, 中村信行, 坂上裕之, 村上泉, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 強制非平衡イオン分光による重元素多価イオンの電子衝突断面積測定を試み |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木康, 物部将士, 中村信行, 坂上裕之, 村上泉, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 強制非平衡イオン発光計測による多価イオンの電子衝突電離断面積の実験的評価 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐々木康, 物部将士, 中村信行, 神原永昌, 坂上裕之, 村上泉, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 強制非平衡イオン発光計測による多価イオンの電子衝突電離断面積の実験的評価 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第24回九州・沖縄・山口支部大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 恵良彰太, 梅崎智暉, 坂上裕之, 村上泉, 中村信行, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 核融合プラズマ研究への利用に向けたタングステン多価イオンの紫外可視磁気双極子線の同定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 恵良彰太, 坂上裕之, 村上泉, 中村信行, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 小型電子ビームイオントラップを用いたタングステン多価イオンの禁制線の同定 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第 23 回 支部大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 恵良彰太, 坂上裕之, 村上泉, 中村信行, 加藤太治 |
| 2. 発表標題 小型電子ビームイオントラップを用いたタングステン多価イオンからの紫外 - 可視域発光線の同定 |
| 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 D. Kato |
| 2. 発表標題 Visible M1 Line Emission of Highly Charged Tungsten Ions in LHD Core Plasmas |
| 3. 学会等名 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 S. Era, H.A. Sakaue, I. Murakami, N. Nakamura, D. Kato |
| 2. 発表標題 New identification of UV-visible emission lines from highly charged tungsten ions in CoBIT |
| 3. 学会等名 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Kato |
| 2. 発表標題 Tungsten measurements at LHD using visible M1 lines |
| 3. 学会等名 2019 Post-CUP Workshop & JSPS-CAS Bilateral Joint Research Projects Workshop (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Kato |
| 2. 発表標題 Modeling for emission line spectra of tungsten highly charged ions and its applications to tungsten measurements for fusion plasmas |
| 3. 学会等名 13th International Symposium on Electron Beam Ion Source and Traps (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Monobe, H.A. Sakaue, D. Kato, I. Murakami, H. Hara, T. Watanabe, N. Nakamura |
| 2. 発表標題 Resonant electron impact excitation of highly charged Fe ions studied with a compact electron beam ion trap |
| 3. 学会等名 19th international Conference on Physics of Highly Charge Ions (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤太治, 恵良彰太, 坂上裕之, 村上泉, 大石鉄太郎, 後藤基志, 森田繁 |
| 2. 発表標題 LHDコアプラズマでのタングステン多価イオン密度のポロイダル分布 |
| 3. 学会等名 第35回プラズマ核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤太治, 坂上裕之, 村上泉, 大橋隼人, 中村信行 |
| 2. 発表標題 銀様多価イオンの電気八重極遷移発光線強度の原子番号依存性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第74回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Daiji Kato |
| 2. 発表標題 Visible M1 line emission from tungsten highly charged ions in LHD core plasmas |
| 3. 学会等名 TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Daiji Kato |
| 2. 発表標題 EUV spectra of highly charged ions with meta-stable 4f-shell hole states |
| 3. 学会等名 International Workshop on Atomic and Molecular Collisions (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 大橋隼人, 中村信行 |
| 2. 発表標題 4f-5s 電気八重極遷移(E3)の観測とその強いZ 依存性 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会 |
| 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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 坂上 裕之 (Sakaue Hiroyuki) (40250112) | 核融合科学研究所・研究部・助教 (63902) | |
| 研究分担者 | 中村 信行 (Nakamura Nobuyuki) (50361837) | 電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授 (12612) | |

| | 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 |
|-------|---------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 大橋 隼人 (Ohashi Hayato) | | |
| 研究協力者 | 恵良 彰太 (Era Shoa) | | |
| 研究協力者 | 佐々木 康 (Sasaki Yasushi) | | |
| 研究協力者 | 梅崎 智暉 (Uezaki Toshiki) | | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|---------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 宋 定宝 (Song Dhingbao) | | |
| 研究協力者 | 岩切 宏友 (Iwakiri Hirotomo) | | |

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 |
|---------|---------|
| | |