

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04623

研究課題名(和文) プラズマ中のタングステン発光構造への二電子性再結合過程の寄与の解明

研究課題名(英文) Study on contribution of dielectronic recombination process to emission structure of tungsten ions in a plasma

研究代表者

村上 泉 (Murakami, Izumi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：30290919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：タングステン不純物の核融合プラズマ中の挙動や、放射パワーの影響を評価するために、分光計測で得られる極端紫外スペクトルを再現する衝突輻射モデルの構築が不可欠である。これまで考慮されていなかった再結合過程を取り込んだ衝突輻射モデルを構築し、スペクトルの再現を試みた。4-7nm波長域に見られるUTA準連続的発光構造は、再結合過程の寄与だけでは十分には再現できず、何らかの原子過程の効果を更に考慮する必要がある。一方、2-4nm発光ピーク群は、再結合過程では構造は変化せず、プラズマ中の価数分布を同定するのに有用で、LHDプラズマ実験でのスペクトルからタングステニオンの挙動を調べることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、プラズマ中のタングステニオンからの発光スペクトルに対するモデルを向上させ、計測されるスペクトルの再現に向けて前進することができた。タングステンは、約1千万度のプラズマ中では、27価前後のイオンに電離しているが、原子番号が74であるため、電子数が多く複雑な原子構造をし、発光構造も複雑になっている。本研究により、その複雑な発光構造に対する理解が進み、核融合プラズマ中での挙動研究も前進した。将来の代替エネルギーを作り出す核融合を成功させるために必要なタングステン不純物の制御につながっていくと考えられる。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to construct a collisional-radiative model for tungsten ions in order to examine behavior of tungsten impurities in fusion plasmas and the radiation power. We have constructed a collisional-radiative model with including recombination processes, which were not considered before for tungsten ions, and tried to reconstruct the extreme ultraviolet spectra of tungsten ions with the model calculations. The unresolved transition array, quasi-continuum spectral feature seen at 4-7nm was not well reproduced by including the recombination processes to the model. Some other atomic processes should be examined further. The spectral peaks seen at 2-4nm are not changed with their profiles by recombination processes and are useful to identify charge states in plasmas. We used these peaks to examine the behavior of tungsten ions in LHD plasmas.

研究分野：プラズマ原子分子過程

キーワード：プラズマ・核融合 プラズマ計測 プラズマ原子分子過程 多価イオン 分光モデル 再結合過程 タングステン 分光計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

将来の代替エネルギー源としての核融合炉の実現に向け、プラズマ対向材料であるタングステンのプラズマ中での挙動制御が一つの課題である。プラズマに混入したタングステンは高い放射パワーでプラズマの温度を下げ核融合反応の低下を招くため、中心への蓄積を避けなければならない。挙動を調べるためにはタングステンからの発光強度の定量解析が不可欠であるが、解析に用いる分光モデルはまだ確立しているとはいえない。1keV 程度のプラズマにおいて、タングステンは極端紫外 (EUV) の 4.5-7nm 領域に、ブロードな2つのピークを示す特徴的な連続発光構造 Unresolved Transition Array (UTA)を見せるが、既存の分光モデルでは再現できていない(Putterich et al. 2013 [1], Murakami et al. 2015 [2])。電子配置間混合による過度な 5nm ピークへの集中に加え、6nm 付近のピークが全く再現できていなかった。Putterich らは再結合過程の寄与を指摘したが、タングステンのどのモデルにおいても再結合過程は考慮されていなかった。UTA は放射パワーへの寄与が大きく、この再現はタングステンによる放射損失の影響を評価するうえでも重要である。

2. 研究の目的

プラズマ中のタングステンイオンの挙動研究を行うため、周辺からコアプラズマへの輸送を考えるうえで重要となる 20-35 価タングステンイオンに対して、分光スペクトルを計算するための衝突輻射モデルに再結合過程を取り込み、EUV 領域の発光構造における二電子性再結合過程の寄与を調べ、UTA 構造の再現と、プラズマ実験による検証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

研究目的の達成のため、以下の4つの方法により研究に取り組んだ。(1) タングステン原子構造を精査してこれまでの衝突輻射モデルの原子データの再構築、(2) 二電子性再結合断面積の理論計算及び、小型電子ビームイオントラップ装置 (CoBIT) を用いた実験研究、(3) 電子配位レベルと微細構造レベルのマッチングアルゴリズムの開発と、それを用いた二電子性再結合速度計算の導出、それを取り込んだ衝突輻射モデルの開発、(4) 大型ヘリカル装置 (LHD) にタングステンペレットを入射してタングステンスペクトルを取得し、これとの比較によるモデルの検証と、UTA 発光構造における二電子性再結合過程の寄与の定量的評価を行う。

4. 研究成果

(1) 原子構造の精査

Hullac 原子コードを用いて原子構造など、衝突輻射モデルに必要な原子データを計算で導出している。原子構造の検証のため、CoBIT 装置を用いた分光計測によるタングステンスペクトルとの比較等を実施した。CoBIT 装置では、入射電子ビームエネルギーが電離閾値を超えない価数のイオンが生成され、電子ビームエネルギーを変えることにより、各価数の発光線スペクトルを得ることが可能である。

電気通信大学の CoBIT 装置を用いて、可視域および EUV 域におけるタングステン多価イオンの分光測定を行った。特に周辺プラズマにおいて重要となりながら多数の 4f 電子に起因する複雑な準位構造を持つ 6+ から 13+ イオンに注目した。得られたスペクトルを衝突輻射モデルによる計算と比較し、過去に観測例の無い発光線の同定に成功した。図 1 はその一例で 8+、9+ イオンのスペクトルについて実験 (a) とモデル (b, c) を比較したものである [3]。

一方、核融合研の CoBIT 装置を使った EUV 分光計測では、電子イオンエネルギー 870eV のスペクトルにおいて 9nm 付近に 2 本の輝線が観測され、これらが W^{27+} ($Z=74$) における 5s-4f 電気八重極子 ($E3$) 遷移であることが、衝突輻射モデル計算との比較によって確認された。これは非常に強い禁制遷移で、その放射確率は 125Å 付近に観測されている許容遷移 ($E1$ 遷移) のその 10 億分の 1 程度である。にもかかわらず、ほぼ同程度の強度で観測されている。この $E3$ 遷移は、自然放出では他に観測例がない世界初演のデータである。我々の考察の結果、観測される理由が、その禁制遷移の励起準位に留まっている電子の存在比率がその許容遷移の 10 億倍にもなっている

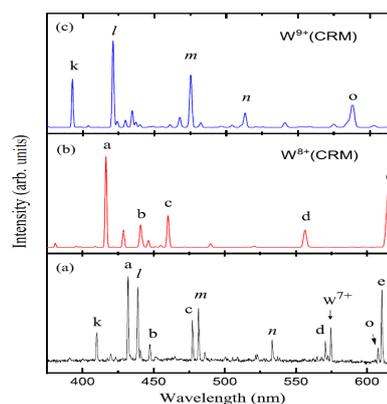


図 1 CoBIT 装置で計測した可視域タングステンスペクトル(a)と衝突輻射モデルで計算した 8 価、9 価タングステンイオンスペクトル(b, c) [3]。

る事に起因することがわかってきた(図2)[4]。また最近の実験により同じ電子配列を持った異なるイオンの Re^{+28} ($Z=75$)、 Os^{+29} ($Z=76$) においても第2、第3の観測例となる同一の E3 遷移過程の観測にも成功した。これらの研究成果は内外で高い評価を得ている。

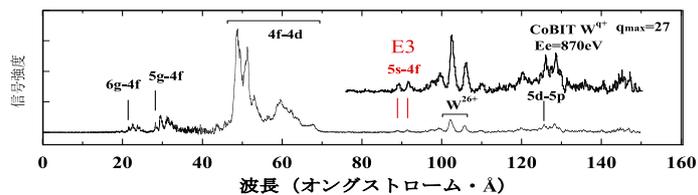


図2 CoBIT 装置において電子ビームエネルギー870eV で計測した EUV スペクトル。9nm 付近に E3 遷移を同定[4]。

(2) 二電子性再結合過程

(2-1) 理論研究

二電子性再結合過程では、タングステンイオンが自由電子を捕獲し、その後、1. 光放射脱励起(光を放出し再結合を完了して低い価数のタングステンイオンとなる)と2. 自動電離(電子を放出し電子捕獲前のタングステンイオンに戻る)が競合する。そのため、それら1. と2. の遷移の確率の比(分岐比)を精度良く計算することが本質的である。多くのエネルギー準位を考慮し多くの遷移を考慮するほど分岐比の計算精度は向上するが、一方で計算時間が莫大となる。本研究では以下の通り分岐比への影響を検討し、計算効率を向上させた:

- A. 遷移確率の大きく分岐比への影響が大きい遷移は以下の通りである: 1. 光放射脱励起過程では、例えば、 $W^{44+}: 3d^9 4s 4l n' l' \Rightarrow W^{44+}: 3d^{10} 4s n' l'$ のように 4l 電子が内殻の 3d 軌道を埋める遷移が支配的であった。また、途中で二重励起準位を経由する場合は、例えば、 $W^{44+}: 3d^9 4s 4l n' l' \Rightarrow W^{44+}: 3d^9 4s 4l n' l''$ と最外殻電子の l' のみが増える遷移が支配的であった。2. 自動電離過程では、 $W^{44+}: 3d^9 4s 4l n' l' \Rightarrow W^{45+}: 3d^9 4s 4l'$ の遷移確率が、特に n' が大きい場合に支配的であることが判明した。
- B. 高次の電気双極子遷移および磁気双極子遷移を計算に含めても分岐比への影響は無視できるほど小さいことが判明した。
- C. 光放射脱励起後の準位が別の二重励起準位である場合、再び1と2の過程が競合し、分岐比に影響を与える。このように競合が複数回生じる場合には、最初に自由電子が捕獲された準位のエネルギーが高いほど再電離される確率が高い、すなわち再結合断面積が小さくなることが判明した。そのため複数回の競合過程を計算することによって、特に電子エネルギーが高い領域で再結合断面積の計算精度が向上する。

これらの知見に基づき、効率的に二電子性再結合断面積の計算を完了させた。併せて、放射再結合、直接電離、および励起・自動電離断面積を計算した。これらを用いて、電離平衡モデルにより W^{62+} に対する W^{63+} の密度比、および W^{44+} に対する W^{45+} の密度比を計算し、これを実験測定値と比較した。その結果、概して定量的に良い一致が見られたが、特定の電子エネルギーにおいて二電子性再結合の共鳴過程に由来するピークで計算値と実験測定値の間に大きな差が見られた。さらに考慮する準位を増やすなどさらなる計算の改善が必要である。

(2-2) 実験研究

先行研究では L 殻イオンの二電子性再結合断面積やサテライト線の計測に成功したことに倣い、CoBIT 装置を用いて、N 殻タングステンイオンでの同様の測定を検討したが、電離させるビームエネルギーとサテライト線のエネルギー領域が一致しないこと、衝突輻射モデルで予想したサテライト線の強度が E1 遷移に比べ非常に弱いこと (W^{27+} イオン) [5] (図3) から、実験での導出が困難であることがわかった。

一方、二電子性再結合の寄与を含んだ衝突輻射モデルを検証するため、高エネルギー電子ビームイオントラップ (Tokyo-EBIT) を用いて 44+/45+, 62+/63+ などの発光線強度比の電子エネルギー依存性を測定した。発光線強度比の理論計算との比較から、二電子性再結合断面積の計算の確認を行った。

(3) マッチングアルゴリズムと二電子性再結合過程を取り込んだ衝突輻射モデルの構築

二電子性再結合過程の計算には、多数の二重励起状態を介したプロセスを取り扱い、(2-1) で示したような計算により断面積及び速度係数を導出してから、衝突輻射モデルに取り込むのが従来の方法である。計画当初、Sasaki & Murakami (2013) [6] モデルを用いて二電子性再結合速度係数を導出し、マッピングアルゴリズムにより衝突輻射モデルに取り込むという従来と同じ方法で組み立てる

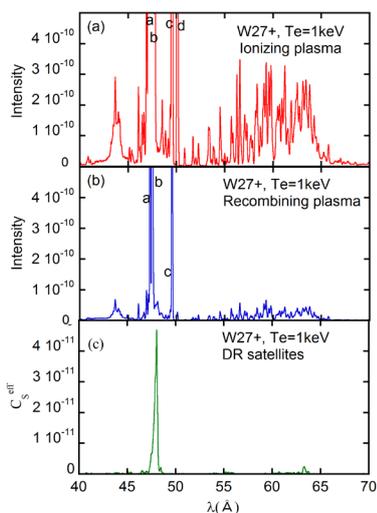


図3 すべての微細構造レベルとした衝突輻射モデルで計算した W^{27+} イオンの (a) 電離進行プラズマ成分、(b) 再結合プラズマ成分、(c) サテライト線の EUV スペクトル[5]。

ことを想定していた。モデル構築の検討段階で、Sasaki & Murakami モデルと同様に、電子配位レベルを高励起状態、二重励起状態としてモデルに組み込み、二電子性再結合過程は、二電子性捕獲、自動電離、放射遷移過程に要素分解してモデルに取り入れることに方向を転換することにした。従って、一つの衝突輻射モデルの中で、スペクトル構造に寄与するレベルは、微細構造レベルで、高励起状態、二重励起状態は、電子配位平均レベルとして扱うハイブリッドモデルとして構築を進めた。ハイブリッドモデルとの比較対象として、 W^{27+} イオンに対しては、すべてを微細構造レベルとして二電子性再結合過程、放射性再結合過程、三体再結合過程を取り入れた衝突輻射モデルを構築して EUV スペクトルを計算した。このモデルでは、EUV スペクトルの再結合プラズマ成分は、電離進行プラズマ成分より弱く、サテライト線はさらに弱いことが分かった(図3)[5]。

25~39 価のタングステンイオンのハイブリッドモデルを構築して、EUV スペクトルの計算を行った。高励起状態・二重励起状態を多数考慮した相対論的電子配置平均 (CA) レベルに対する原子データのフルセットと、スペクトル構造に直接影響すると考えられる励起状態を中心とした微細構造 (FS) レベルに対する原子データを、それぞれ Hullac 原子コードで計算し、CA レベルから FS レベルへのマッピングは統計重率を仮定することで行い、モデル計算が行えるようにした。このハイブリッドモデルを用いて計算した EUV スペクトルに対し、いくつかの電子温度に対して、ADAS データベースにある電離レート、再結合レートを用いて電離平衡を仮定して計算した価数分布を用いて、スペクトル合成を行った(図4)。その結果、Murakami et al. (2015)[2]のモデルよりは、プラズマで計測されているような UTA 構造に近いスペクトルを得ることができた[7]。6nm 付近の発光構造は、再結合過程や高励起状態からのカスケードなどの寄与により増加したが、依然として弱く、25 価以下のモデル構築が必要なことが改めて確認された。再結合過程以外の原子過程が寄与する可能性も今後検討する必要がある。

このハイブリッドモデルを用い、各価数における電離進行プラズマ成分と再結合プラズマ成分の放射パワーの比などを調べた(図5)。トータルパワー、4.5-7nm UTA 領域での放射パワー、5.5-7nm UTA 領域での放射パワーの比などを求めると、28, 29 価を除き、再結合プラズマ成分は、電離進行プラズマ成分の 0.1-0.4 程度であることが分かった。また、トータルに対する 4.5-7nm UTA 領域のパワーは、6~8割と大きな割合を示すことも確かめられた。

一方、Sasaki & Murakami モデルを進展させ、異なるアプローチにより、二電子性再結合過程の効果を十分に取り入れた大規模なモデルの構築も行った。特に、モデルの正確性と完結性 (accuracy & completeness) を保ちながら、性能(計算の効率、速度)を高める研究を行った。原子状態を非相対論的電子配置 (nl) で表し、エネルギー準位、輻射遷移確率等を HULLAC コードで求め、最大 10^4 個の原子状態を含むモデルを作成した。プラズマ中のイオンの状態の変化を追跡するマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いることで、発光構造に大きな影響を与える重要な原子状態のポピュレーション

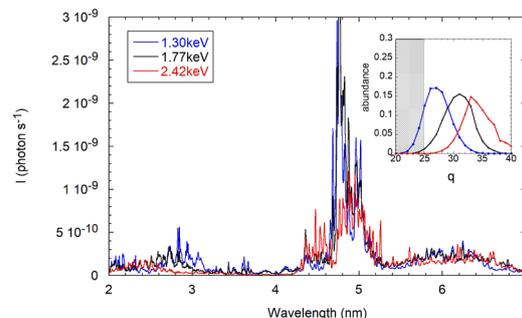


図4 ハイブリッドモデルで計算した各イオンの EUV スペクトルを電離平衡での価数分布によって合成したスペクトル[7]。

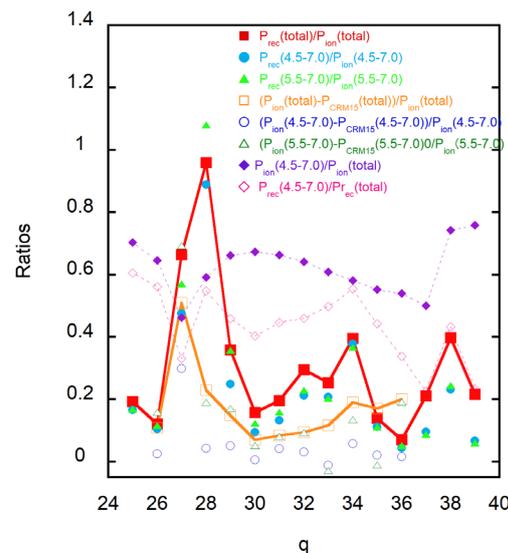


図5 ハイブリッドモデルで計算した各価数における放射パワーについて、電離進行プラズマ成分に対する再結合プラズマ成分の比。トータルパワー (■)、4.5-7nm UTA (●)、5.5-7nm 領域 (▲) など。詳細は[7]。

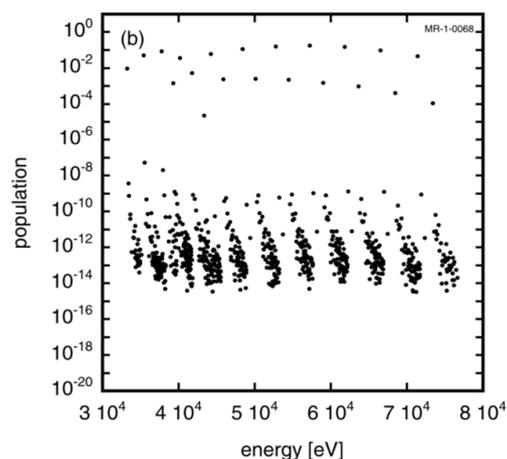


図6 MCMC 法で計算したタングステンプラズマ ($T_e = 2$ keV, $n_e = 10^{14} \text{cm}^{-3}$)。 10^{-15}cm^{-3} 以上のポピュレーションを持つ原子状態について、従来手法の結果と一致する結果が得られた[8]。

を含むモデルを作成した。プラズマ中のイオンの状態の変化を追跡するマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いることで、発光構造に大きな影響を与える重要な原子状態のポピュレーション

ーションを、これまでのレート方程式を直接解く方法に比べて 1/100 の時間で計算できることを示した (図 6) [8]。これはあり得る原子状態の数に対して、重要な原子状態の割合がごく僅かなことによる。本研究では、この方法をプラズマの時間発展の計算に応用する研究も行った。

(4) LHD 実験によるタングステンスペクトル計測とそれによるモデルの検証

中性ビーム入射 (NBI) で加熱された LHD プラズマにタングステンペレットを入射し、様々なプラズマ条件におけるタングステンの EUV スペクトルを計測している。上述したように 4-7nm の UTA 発光構造は、まだ計測されている構造は再現できていない。一方、2-4nm 領域に見られる 4f-5g 遷移のような $n=4-5$ 遷移によるピーク群は、中心波長が価数とともに短波長側にシフトしていることが衝突輻射モデルの結果と CoBIT 装置等による計測によりわかっている [5]。今回、ハイブリッド衝突輻射モデルの計算から、再結合過程による新たなピークは見られず、電離進行プラズマ成分によるピークの強度を増加する効果のみが見られた (図 7) [7]。これらのピークを使い、LHD プラズマ中のタングステニオンの挙動を調べた。

解析に用いた実験では、タングステンペレット入射後に電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) をプラズマ中心に重畳することにより、タングステニオンによる放射損失に伴う電子温度の低下を阻害し、46 価までの高価数のタングステニオンを中心部に生成することに成功した。図 8 で示すように、ECH 終了後は、タングステンの放射パワーにより中心の電子温度は急激に減少し、中心ではほぼゼロで、周辺で 200eV 程度となる温度ホール構造が作られた。継続した NBI 加熱により電子温度は回復した。電子温度の変化に伴い、EUV スペクトルも変化し、 $n=4-5$ 遷移ピークの同定により、価数分布の変化を評価することができた (図 9)。温度の減少で急激に価数分布は低い価数へ移る様子が観測された。温度ホールからの回復期は 24 価を中心とする分布にとどまり、電子温度が 1keV にも満たない結果と一致した。また、ポロメーターアレイによる視線ごとの放射パワーの計測の振る舞いは、タングステニオンの挙動と一致することもわかった。本研究により、LHD など核融合プラズマにおけるタングステン挙動研究の新たな手法を提供する準備ができてきたのは大きな成果である。

引用文献

- [1] T. Putterich et al., AIP Conf. 1545, 132 (2013)
- [2] I. Murakami et al., Nucl. Fusion 55, 093016 (2015)
- [3] Priti et al., Phys. Rev. A 102, 042818 (2020)
- [4] H. A. Sakaue et al., Phys. Rev. A 100, 052515 (2019)
- [5] I. Murakami et al., Eur. Phys. J. D 71, 246 (2017)
- [6] A. Sasaki and I. Murakami, J. Phys. B 46, 175701 (2013)
- [7] I. Murakami et al., Nucl. Mat. Energy 26, 100923 (2021)
- [8] A. Sasaki et al., High Energy Density Phys. 32, 1 (2019)

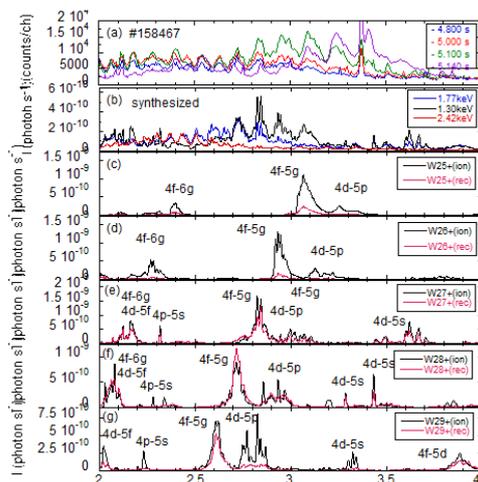


図 7 2-4nm のタングステンスペクトル。(a)LHD で計測したのスペクトル、(b)図 4 と同じ方法での合成スペクトル、(c)-(g) ハイブリッドモデルで計算した 25~29 価イオンのスペクトル。黒は電離進行プラズマ成分、赤は再結合プラズマ成分 [7]。

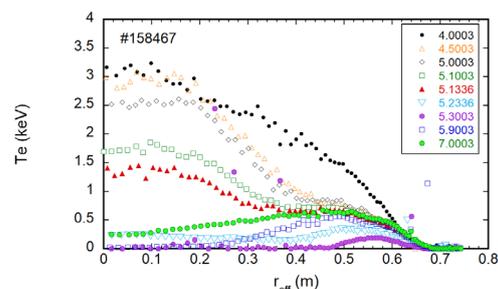


図 8 電子温度分布の時間変化。4.1 秒にタングステンペレット入射、4.2 - 5.0 秒に ECH 重畳、5.3 秒で中心温度 0 の温度ホール構造が形成。

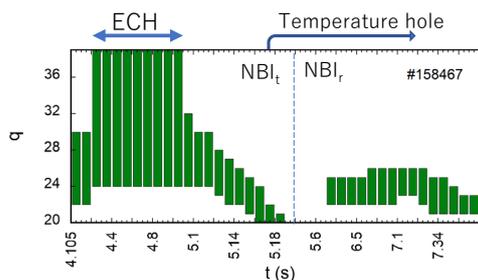


図 9 2-4nm ピークから評価したタングステニオンの価数分布の時間変化。横軸の時刻は線形ではないことに注意。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sakaue Hiroyuki A., Kato Daiji, Murakami Izumi, Ohashi Hayato, Nakamura Nobuyuki	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 Morita S., Dong C.F., Kato D., Liu Y., Zhang L., Cui Z.Y., Goto M., Kawamoto Y., Murakami I., Oishi T.	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 ~ 012005
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 Liu Yang, Morita Shigeru, Murakami Izumi, Oishi Tetsutarou, Goto Motoshi, Huang Xianli	4. 巻 57
2. 論文標題 Density evaluation of tungsten W24+, W25+, and W26+ ions using unresolved transition array at 27-34 in Large Helical Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106101 ~ 106101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.106101	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 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 Dong C.F., Morita S., Cui Z.Y., Sun P., Zhang K., Murakami I., Zhang B.Y., Yang Z.C., Zheng D.L., Feng L., Li Y., Fu B.Z., Lu P., Shi Z.B., Yang Q.W., Xu M., Duan X.R.	4. 巻 59
2. 論文標題 Evaluation of tungsten influx rate and study of edge tungsten behavior based on the observation of EUV line emissions from W6+ ions in HL-2A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016020 ~ 016020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aaf084	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 Sasaki Akira, More Richard M., Fujii Keisuke, Kato Daiji, Murakami Izumi	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 Izumi Murakami, Akira Sasaki, Daiji Kato, and Fumihiko Koike	4. 巻 71
2. 論文標題 Collisional-radiative model including recombination processes for W27+ ion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 246:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/e2017-80099-4	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 X. Ding, J. Yang, F. Koike, I. Murakami, D. Kato, H. A. Sakaue, N. Nakamura, C. Dong	4. 巻 204
2. 論文標題 Theoretical investigation on the soft X-ray spectrum of the highly-charged W54+ ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2017.08.020	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 Momoe Mita, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, Izumi Murakami, and Nobuyuki Nakamura	4. 巻 5
2. 論文標題 Direct Observation of the M1 Transition between the Ground Term Fine Structure Levels of W VIII	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 13-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms5010013	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 I. Murakami and A. Sasaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Effective Recombination Rates for Tungsten Ions Derived with a Collisional-Radiative Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Research Report NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 7-11
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 無
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 C. Suzuki, I. Murakami, F. Koike, N. Tamura, H. A. Sakaue, S. Morita, M. Goto, D. Kato, H. Ohashi, T. Higashiguchi, S. Sudo and G. O'Sullivan	4. 巻 59
2. 論文標題 Extreme ultraviolet spectroscopy and atomic models of highly charged heavy ions in the Large Helical Device	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 014009-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0741-3335/59/1/014009	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. Mita and N. Nakamura	4. 巻 103
2. 論文標題 Direc observation of the M1 transition between the ground state frin structure splitting of W VII	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Research Report NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 46-49
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 無
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 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 778 ? 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 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 042818-042818
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 -

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 ² 5s spectrum of W ^{xiv} ions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 042509-042509
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 佐々木明	4. 巻 96
2. 論文標題 次世代半導体リソグラフィの実用化に至るEUV光源のプラズマ研究開発のあゆみ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 283-289
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 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52件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 31件)

1. 発表者名 A. Sasaki, R. More, K. Fujii, D. Kato and I. Murakami
2. 発表標題 A Markov-Chain Monte-Carlo (MCMC) approach for collisional radiative model of complex multiple-charged ions
3. 学会等名 2nd International Conference on Data-Driven Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Murakami, A. Sasaki, D. Kato
2. 発表標題 Extreme Ultraviolet Spectral Model for Highly Charged Tungsten in Magnetically Confined Plasma
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gasses and 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nakamura
2. 発表標題 Tungsten spectra observed with an electron beam ion trap
3. 学会等名 International Workshop on Atomic and Molecular Data for Plasma Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Sasaki
2. 発表標題 Data driven approaches to the atomic kinetics in plasmas for efficient calculation of complex problems and their applications
3. 学会等名 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Priti, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Modeling of spectra from multiply charged tungsten ions observed with CoBIT
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上泉、佐々木明、加藤太治
2. 発表標題 再結合過程を含んだタングステンイオンの衝突輻射モデルの開発II
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Priti, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Observation and Identification of Visible Transitions in Tungsten Ions
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 I. Murakami, D. Kato, M. Kato, H. A. Sakaue, M. Emoto
2. 発表標題 Atomic and Molecular Data Activities at NIFS in 2017-2019
3. 学会等名 IAEA Technical Meeting of the International Atomic and Molecular Data Centre Network (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Murakami, D. Kato
2. 発表標題 Atomic data evaluation with statistical methods for plasma spectroscopic diagnostics
3. 学会等名 1st International Conference on Data-Driven Plasma Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Murakami, A. Sasaki, D. Kato
2. 発表標題 Spectroscopic modeling for EUV spectra of highly charged tungsten ions including recombination processes
3. 学会等名 11th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Murakami, A. Sasaki, D. Kato
2. 発表標題 Spectroscopic modeling for EUV spectra of highly charged tungsten ions including recombination processes
3. 学会等名 TMU Symposium on Physics of Highly Charge Ions 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上泉、加藤太治
2. 発表標題 原子分子データベースとデータ評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上泉、佐々木明、加藤太治
2. 発表標題 再結合過程を含んだタングステンイオンの衝突輻射モデルの開発
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 仲野友英、大橋隼人、中村信行
2. 発表標題 62価および63価タングステンイオンの電離・再結合断面積の計算
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 Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Visible spectra of multiply charged heavy ions obtained with a compact electron beam ion trap
3. 学会等名 The 7th China- Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (AMPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Recent results on tungsten spectra obtained with a compact electron beam ion trap
3. 学会等名 1st Meeting of the Global Network for Atomic and Molecular Physics of Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木明、村上泉
2. 発表標題 モンテカルロ法を用いた衝突輻射モデルの計算手法
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 H. A. Sakaue
2. 発表標題 Observation of electric octupole (E3) transitions in the EUV spectra of tungsten ions
3. 学会等名 The 19th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. A. Sakaue
2. 発表標題 Observation of 4f-5s Electric Octupole (E3) Transitions in the EUV spectra of Ag-like Tungsten
3. 学会等名 International Symposium on Electron Beam Ion Source and Traps (EBIST2018) (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電気八重極子遷移(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

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 EBITを用いた銀様多価イオンからの電気八重極子遷移の観測
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 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子遷移発光線の原子番号依存性
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 C. Suzuki, I. Murakami, F. Koike, T. Higashiguchi, H. A. Sakaue, N. Tamura, S. Sudo, G. O' Sullivan
2. 発表標題 Systematic study on soft X-ray spectra from heavy ions in optically thin and thick plasmas
3. 学会等名 44th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Izumi Murakami
2. 発表標題 Atomic and Molecular Data Activities at NIFS in 2015-201
3. 学会等名 IAEA Technical Meeting of the International Atomic and Molecular Data Centre Network (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上泉、佐々木明、加藤太治
2. 発表標題 再結合プラズマのためのタングステンイオン衝突輻射モデルの拡張について
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上泉、佐々木明、加藤太治
2. 発表標題 再結合プラズマのためのタングステンイオン衝突輻射モデルの拡張 II
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 I. Murakami, A. Sasaki, D. Kato, F. Koike
2. 発表標題 Collisional-Radiative Model of Tungsten Ions for EUV Spectroscopy
3. 学会等名 10th Int. Conf. on Atomic and Molecular Data and Their Applications (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 D. Kato, K. Fujii, M. Goto, I. Murakami, N. Nakamura, T. Oishi, H. A. Sakaue, N. Tamura, S. Morita
2. 発表標題 ATOMIC DATA RESEARCH FOR VISIBLE M1 LINE EMISSION OF GROUND-STATE HIGHLY CHARGED TUNGSTEN IONS IN PLASMA
3. 学会等名 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 村上泉、佐々木明、加藤太治、小池文博
2. 発表標題 タングステンイオンの極端紫外スペクトルにおける二電子性再結合過程の寄与について
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木千尋、村上泉、小池文博、東口武史、坂上裕之、田村直樹、須藤滋、Gerry O'Sullivan
2. 発表標題 プラズマ中の重元素多価イオンからの極端紫外スペクトルに関する系統的研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 I. Murakami and A. Sasaki
2 . 発表標題 Effective Recombination Rates for Tungsten Ions Derived with a Collisional-Radiative Model
3 . 学会等名 Japan-China-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 MITA Momoe, and NAKAMURA Nobuyuki
2 . 発表標題 Observation of visible and EUV emission spectra of tungsten ions
3 . 学会等名 Japan-China-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 T. Nakano, H. Ohashi, and N. Nakamura
2 . 発表標題 Experimental Evaluation of W44+ Ionization and W45+ Recombination Cross-Section
3 . 学会等名 10th Int. Conf. on Atomic and Molecular Data and Their Applications (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 C. Suzuki, I. Murakami, F. Koike, N. Tamura, H. A. Sakaue, S. Morita, M. Goto, D. Kato, H. Ohashi, T. Higashiguchi, S. Sudo and G. O'Sullivan
2 . 発表標題 EUV spectroscopy and atomic models of highly charged heavy ions in the Large Helical Device
3 . 学会等名 The 43rd European Physical Society Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 表一輝, 村上泉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行
2. 発表標題 タングステン多価イオン発光線の観測
3. 学会等名 原子衝突学会第41回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Nobuyuki Nakamura, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato and Izumi Murakami
2. 発表標題 Observation and Identification of Tungsten Spectra Observed with an
3. 学会等名 IAEA Technical Meeting on Uncertainty Assessment and Benchmark (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 三田百恵, 村上泉, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行
2. 発表標題 タングステンイオンW VII-XIVの可視・EUV領域発光スペクトルの観測
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上裕之, 中村信行, 加藤太治, 村上泉
2. 発表標題 EBITを用いた多価イオン発光スペクトルの可視、VUV及びEUV分光測定
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉井駿宏、寺島若葉、坂上裕之、柳長門、中村信行
2. 発表標題 無冷媒高温超伝導コイルを用いた電子ビームイオントラップの開発
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, S. Morita, K. Fujii, N. Nakamura, X.-B. Ding, C.-Z. Dong
2. 発表標題 Tungsten ion distribution analysis based on visible M1 lines of highly charged tungsten ions in LHD
3. 学会等名 9th A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High- Performance Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 D. Kato, H.A. Sakaue, I. Murakami
2. 発表標題 Spectroscopic studies on tungsten highly charged ions in the LHD
3. 学会等名 6th The Physics at Electron Beam Ion Traps and Advanced Research Light Sources (PEARL2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 D. Kato and N. Nakamura
2. 発表標題 Population trapping: the mechanism for the lost resonance lines in Pm-like ions
3. 学会等名 18th International Conference on Physics of Highly Charged Ions (HCI2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 D. Kato and N. Nakamura
2 . 発表標題 Population trapping: lost resonance lines in Pm-like Ions
3 . 学会等名 20th ADAS Workshop (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 D. Kato, K. Fujii, M. Goto, I. Murakami, N. Nakamura, T. Oishi, H. A. Sakaue, N. Tamura, S. Morita
2 . 発表標題 Observation of optical M1 lines of highly ionized Wq+ ions in the ground states and its application to W density analysis at LHD
3 . 学会等名 China-Japan Collaboration Workshop on Stability and Transport of Edge Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Kato, H.A Sakau, I. Murakami, M. Goto, T. Oishi, K. Fujii, N. Nakamura, S. Morita
2 . 発表標題 Observation of visible forbidden lines of tungsten highly charged ions in LHD core plasmas and its application to ion distribution analysis
3 . 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 T. Oishi, S. Morita, X. L. Huang, H. M. Zhang, Y. Liu, M. Goto and the LHD Experiment group
2 . 発表標題 A Study of W I-WVII Line Emissions from Low-Ionized Tungsten Ions in Large Helical Device
3 . 学会等名 The 10th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 I.Murakami, D.Kato, T.Oishi, M.Goto, Y.Kawamoto, C.Suzuki, H.A.Sakaue, S.Morita
2. 発表標題 Progress of tungsten spectral modeling for ITER edge plasma diagnostics based on tungsten spectroscopy in LHD
3. 学会等名 The 24th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Device (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Sasaki
2. 発表標題 JATOM code for calculation of atomic processes in Sn plasmas
3. 学会等名 2020 EUVL source workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Sasaki
2. 発表標題 Modeling of emission spectrum of plasma EUV (13.5 nm) and shorter wavelength (<7 nm) sources
3. 学会等名 SPIE Advance Lithography 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上泉、加藤太治、大石鉄太郎、後藤基志、川本靖子、鈴木千尋、坂上裕之、森田繁
2. 発表標題 再結合過程を含んだタングステン多価イオンの衝突輻射モデルの構築とプラズマ分光診断への応用
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 佐々木明
2. 発表標題 半導体リソグラフィ用EUV光源に用いるスズなどの重元素の多価イオンのスペクトルの起源
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Priti, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 EUV Transitions in Highly Charged W6+ -W13+ Ions Observed with an Electron Beam Ion Trap
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会
4. 発表年 2020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	佐々木 明 (Sasaki Akira) (10215709)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光子科学研究部・上席研究員(定常) (82502)	
研究分担者	坂上 裕之 (Sakaue A. Hiroyuki) (40250112)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	仲野 友英 (Nakano Tomohide) (50354593)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員(定常) (82502)	

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
連携研究者	加藤 太治 (Kato Daiji) (60370136)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
連携研究者	大石 鉄太郎 (Oishi Tetsutaro) (80442523)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
連携研究者	鈴木 千尋 (Suzuki Chihiro) (30321615)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
連携研究者	後藤 基志 (Goto Motoshi) (00290916)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
連携研究者	森田 繁 (Morita Shigeru) (80174423)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・名誉教授 (63902)	

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

米国	RMMorePhysics			
中国	Southwestern Institute of Physics	Inst. of Plasma Phys. Chinese Ac. Sci.	Northwest Normal University	他機関