

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760707

研究課題名(和文)高電離タングステンイオンの電離・再結合断面積の高精度計算と実験による精度評価

研究課題名(英文) Experimental evaluation of theoretically calculated ionization and recombination cross-sections of highly charged tungsten ions

研究代表者

仲野 友英 (Nakano, Tomohide)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：50354593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：タングステンイオンの再結合および電離断面積を理論計算し、その精度を実験測定によって確かめることが目的である。理論計算に直接的に対応する実験測定を行うのは困難であるが、ここではスペクトル線強度が本来持つ電子衝突エネルギーへの依存性を打ち消す方法を考案し、これによってW44+とW45+のスペクトル線強度比(実験測定)とW45+とW44+の再結合・電離断面積比(理論計算)を直接的に比較する。比較の結果、理論計算値は実験の測定誤差と同程度で実験測定値を再現した。この結果は、精度評価済みの断面積が生産されたことを意味し、これはプラズマ中のタングステンイオン密度測定に切望されていたデータである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to calculate recombination and ionization cross-sections of W ions and to evaluate uncertainties of the cross-sections by means of experimental measurement. Although direct comparison of theoretical calculations to experimental measurements is difficult, we have developed a method which cancels out electron energy dependence of emission intensity and enables direct comparison of the experimentally measured intensity ratio of W44+ to W45+ emissions to the theoretically calculated ratio of W45+ recombination to W44+ ionization cross-section. The comparison shows that the calculation is in agreement with the measurement with a similar level of scatters to the experimental uncertainties. This indicates that the cross-sections with uncertainties, requested for tungsten density measurement in fusion plasmas for long, have been produced.

研究分野：プラズマ分光学

キーワード：核融合 プラズマ 原子物理 原子データ 分光 トカマク 不純物

1. 研究開始当初の背景

タングステンは、内部へ水素を吸蔵しにくい、損耗しにくい、および融点が高いなどの特性を持ち、プラズマ対向材として優れた材料である。ITER ではダイバータ領域のプラズマ対向材として使用される予定である。一方でタングステンは、核融合炉の高温プラズマ中であっても完全電離には至らず、スペクトル線の強い放射によりプラズマのエネルギーを散逸させプラズマ温度を低下させてしまう。したがって、プラズマ中のタングステニオン密度を最小限に抑制することは重要な研究対象である。そのためにはタングステニオン密度の精度の高い測定が要求される。

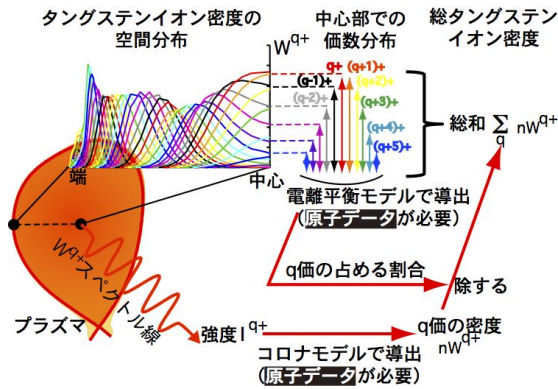


図 1. タングステニオン密度測定と原子データの関係。

タングステニオン密度を発光スペクトル線の強度から決定するには、解析過程で電離および再結合断面積など多くの原子データが必要であるため、原子データの精度はタングステニオン密度の決定精度を大きく左右する。高電離タングステニオンの原子データに対するニーズは核融合研究以外ではほとんどなかったため、必要な原子データの整備は遅れていた。近年では ITER でタングステンを使用することが決定されて以来、特にこれが牽引役となってデータの整備が急速に進められてきた。しかしながら、多くの電離および再結合断面積は理論計算によるものであり、それらが実験などによる精度の評価を経ないまま実験データの解析に利用されているのが現状である。したがって、使用する原子データセットにより同一のスペクトル線強度の実験測定値からであっても導出されるタングステニオン密度が異なるなどの問題が生じる。一例として、使用する原子データのセットの違いに起因して、タングステニオン密度が 2 倍以上異なるケースが報告された。このように、大きな誤差の原因となることから、精度が評価された原子データ (評価済み原子データ) の整備が待たれていた。

評価済みデータの整備が遅れている理由の一つは、理論計算に対応する実験の実施が困難なことにある。すなわち、高温の核融合

プラズマ中に存在する高価数のタングステニオン (30 ~ 74 価) を生成可能な実験装置は例外を除くと電子ビーム・イオントラップ装置のみである。しかし、この装置ではスペクトル線強度の測定は容易であるが、電離断面積などの原子データを絶対値で直接的に測定するのは困難である。このような状況を鑑みて、研究代表者は、スペクトル線強度の比の実験測定値から電離・再結合断面積の比を決定し、これを理論計算値と比較するという着想を得た。これに基づき、理論計算値の実験測定による精度評価を行うことを本研究の主題とした。

2. 研究の目的

理論計算によって、45 価のタングステニオン ( $W^{45+}$ ) の再結合断面積と 44 価のタングステニオン ( $W^{44+}$ ) の電離断面積を計算する。これらの比を実験測定の結果と比較することによって、理論計算による断面積の精度を評価する。これによって、誤差付きの電離・再結合断面積データを生産する。

3. 研究の方法

(着想) 電子ビーム・イオントラップ装置ではコロナ平衡モデルが成り立つ。この場合、 $W^{44+}$  および  $W^{45+}$  の 4s-4p スペクトル線の強度比 ( $I^{44+} / I^{45+}$ ) と電離および再結合断面積の比 ( $S^{44+} / \alpha^{45+}$ ) はそれぞれ、密度比 ( $n^{44+} / n^{45+}$ ) と以下の関係が成り立つ。

- A. スペクトル線の強度比はタングステニオン密度比に比例する：  
 $I^{45+} / I^{44+} = 0.43 n^{45+} / n^{44+}$
- B. 電離・再結合断面積比はタングステニオン密度の逆比に等しい：  
 $S^{44+} / \alpha^{45+} = n^{45+} / n^{44+}$
- C. A. および B. から次式が成り立つ：  
 $n^{45+} / n^{44+} = (I^{45+} / I^{44+}) / 0.43 = S^{44+} / \alpha^{45+}$

これにより、密度比 ( $n^{45+} / n^{44+}$ ) を通して、実験測定で得られるスペクトル線強度比

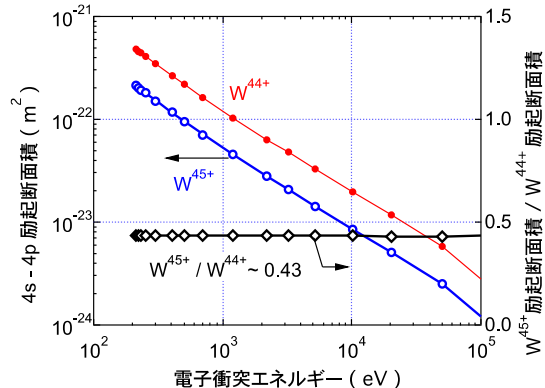


図 2. 電子衝突エネルギーに対する (左軸)  $W^{44+}$  および  $W^{45+}$  の 4s-4p 励起断面積, および (右軸) それらの比。

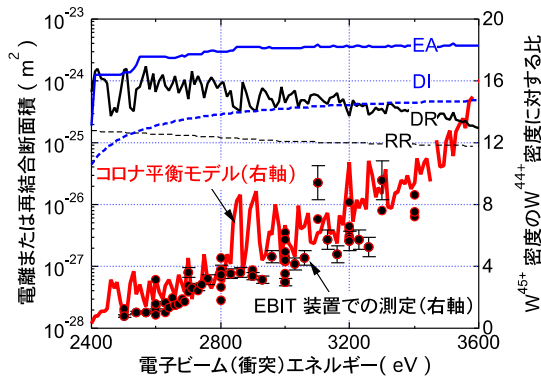


図 3. 電子ビーム (衝突) エネルギーに対する (左軸) 計算した励起・自動電離断面積 (EA), 直接電離断面積 (DI), 二電子性再結合断面積 (DR), および放射再結合断面積 (RR) と (右軸) それらを用いて計算した  $W^{45+}$  の  $W^{44+}$  に対する密度比, および 電子ビーム・イオントラップ装置 (EBIT 装置) で測定された  $W^{45+}$  の  $W^{44+}$  に対する密度比.

( $I^{45+} / I^{44+}$ ) と理論計算で得られる断面積比 ( $S^{44+} / \alpha^{45+}$ ) の直接的な比較が可能である. ここで, 本研究の本質は, A. でスペクトル線の組合せを適切に選択することによって, スペクトル線強度が本来持っている電子衝突エネルギーへの依存性をキャンセルアウトさせることにある. 図 2. の左軸に示すように,  $W^{44+}$  4s-4p 励起断面積は  $W^{45+}$  4s-4p 励起断面積と電子衝突エネルギーに対して類似した依存性を持つ. この性質から, 図 2. の右軸に示すように, 計算した範囲 (200 eV から 100000 eV) にわたって励起断面積の比は ~ 0.43 とほぼ定数になる. これに加えて,  $W^{44+}$  および  $W^{45+}$  の 4s-4p スペクトル線の波長はそれぞれ 6.1 nm および 6.2 nm と非常に近く分光計測器の感度はほぼ同一と見なされる. そのため, 分光計測器の感度の波長への依存性を考慮せずとも高い精度でスペクトル線の強度比が測定できるという計測上のメリットもある. したがって, この手法では, スペクトル線強度比の測定誤差と同程度という高い精度で電離・再結合断面積の比を評価することが可能である.

(実験測定) 電気通信大学の電子ビーム・イオントラップ装置で実験測定を行った. この装置では電子ビームのエネルギーを調節することによって, 目的の個数のタンゲステニオンを生成することができる. 具体的には,  $W^{44+}$  の電離エネルギーは 2350 eV であるため, 電子ビームエネルギーがこの電離エネルギーを越えると  $W^{44+}$  から  $W^{45+}$  が生成され始め,  $W^{44+}$  と  $W^{45+}$  がともに存在する状態が得られる. 本研究では, 電子ビームエネルギーを 2500 eV から 3300 eV まで 30 - 100 eV の間隔で上昇させて, 44 価および

45 価の 4s-4p スペクトル線の強度比を測定した. 測定した強度比を「3. 研究の方法」の A. に従って  $W^{45+}$  密度の  $W^{44+}$  密度に対する比を導出した. 結果を図 3. の右軸に示す. (理論計算) 原子構造計算プログラム FAC により以下の素過程の断面積の理論計算を行った: 電離過程として, 電子衝突による励起・自動電離過程 (以下, EA と呼ぶ. 励起の後に自動電離により電子がはぎ取られる過程) と直接電離過程 (同 DI. 直接に電子がはぎ取られる過程), および再結合過程として, 二電子性再結合過程 (同 DR. 自由電子が自動電離準位に捕獲された後に光を放って再結合を完了する過程) と放射再結合過程 (同 RR. 自由電子が光を放って再結合する過程). これらは, 電子ビーム・イオントラップ装置で主要な素過程であるとともに, 核融合炉心プラズマでも同様に主要な素過程である. 計算結果を図 3. の左軸に示す. 主要な電離過程は励起・自動電離過程 (EA) であり, 主要な再結合過程は二電子性再結合 (DR) である. 二電子性再結合過程は特定の電子衝突エネルギーに対してピーク構造を持ち, 多数のピーク構造の重ね合わせとして断面積が計算されている. そのため, 特定の電子エネルギーで断面積が増減する. これらの断面積から, 「3. 研究の方法」の B. に従って  $W^{45+}$  密度の  $W^{44+}$  密度に対する比 (=  $(EA+DI)/(DR+RR)$ ) を計算した. 結果を図 3. の右軸に示す. 計算された密度比は電子衝突エネルギーに対して緩やかに増加するとともに, 二電子性再結合のピーク構造に由来して, ピーク構造を持つ.

(結果) 図 2. の右軸に「3. 研究の方法」の C. に従って  $W^{45+}$  密度の  $W^{44+}$  密度に対する比の実験測定値と理論計算値の比較を示す. 理論計算値は実験測定値と定量的に一致し, とともに電子ビーム (衝突) エネルギーの増加に従って緩やかに増加する. これは, 理論計算による断面積の比  $(EA+DI)/(DR+RR)$  が実験測定の誤差と同程度で正しいことを意味する. ただし, 二電子性再結合過程 (DR) に由来するピーク構造が理論計算では見られたのに対し, 実験では観測されない場合があった. この不一致は実験測定時の電子ビームエネルギーの分解能に起因する可能性があり, 原因を調査中である.

#### 4. 研究成果

図 3. に示すように, 一部のピーク構造を除いて, 実験で測定した  $W^{45+}$  の  $W^{44+}$  に対する密度比を理論計算によって測定誤差と同程度で再現できた. この成果は EA, DI, DR および RR の個々の断面積の理論計算の精度を評価するものではないが, それらの比, 特にそれらの内の主要な過程 (EA および DR) の比の理論計算値の精度が実験的に確かめられたことを意味する. 理論計算の確かさを実験測定によって確かめる研究成果は, 「1. 研究開始当初の背景」で述べたように重要性

が認識されているものの、国内を含めて世界的にも、研究代表者の調査の範囲では報告されていない。本研究では、この状況に対し、「2. 研究の目的」(着想)に述べた方法により新しい展開を与えた。本成果は世界的にも高く評価され、国際原子力機関 (IAEA) の原子分子データユニット主催の会合で招待講演として成果を発表するように要請を受けた(「5. 主な発表論文等」[学会発表])。また、研究代表者らはこの方法を発展させ、欧州のトカマク装置 JET のプラズマ中の  $W^{45+}$  と  $W^{46+}$  の密度測定に応用し(「5. 主な発表論文等」[雑誌論文 など])、欧州の研究者らからも評価された。国内では、すでに他の研究グループがこの方法により理論計算データの評価を行うなど、国内の研究活動にも影響を与えた。

今後は、さらに高温の ITER の炉心プラズマ中 (電子温度 $\sim 10000$  eV) でのタングステンイオン密度測定を想定し、より高価数のタングステンイオンの電離・再結合断面積の実験測定による精度評価を進めてゆく。具体的には、 $W^{63+}$  密度の  $W^{62+}$  密度に対する比の実験測定値と理論計算値の比較を進めてゆく計画である。これらの評価には本研究で測定した  $W^{44+}$  および  $W^{45+}$  の 4s-4p スペクトル線の代わりに、 $W^{62+}$  および  $W^{63+}$  の 3s-3p スペクトル線を利用する。これによって、「3. 研究の方法」A. で述べたように、スペクトル線強度の電子温度依存性がキャンセルアウトされ、スペクトル線の強度比とタングステンイオンの密度比の間に比例関係が成り立つ ( $I^{63+}/I^{62+} = 0.8 n^{63+}/n^{62+}$ )。この成果により、世界に先駆けて、ITER の炉心プラズマ中のタングステンイオン密度測定に必要となる電離・再結合断面積を誤差付きで整備することが可能になる。

#### 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 2 件)

T. Nakano, A. E. Shumack, C. Maggi, et al., 'Determination of tungsten and molybdenum concentrations from an X-ray range spectrum in JET with the ITER-like configuration', J. Phys. B. 48 (2015) 144023. Refereed.

doi:10.1088/0953-4075/48/14/144023

T. Nakano, A. E. Shumack, C. Maggi, et al., 'Determination of tungsten and molybdenum concentrations from an X-ray range spectrum in JET with the ITER-like configuration', Proc. 41st European Physics Society Conference on plasma Physics, (Berline 2014) 38F (2014) P1.019. Non-refereed.

<http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P1.019.pdf>

[学会発表](計 4 件)

T. Nakano, 'Experimental evaluation of W recombination and ionization rates/cross-sections', Decennial IAEA Technical Meeting on Atomic, Molecular and Plasma- Material Interaction Data for Fusion Science and Technology, 16/12/2014, Dejeon (Korea).

T. Nakano, A. E. Shumack, C. Maggi, et al., 'Determination of tungsten and molybdenum concentrations from an X-ray range spectrum in JET with the ITER-like configuration', Plasma2014, 21/11/2014, Toki Messe (Niigata).

T. Nakano, A. E. Shumack, C. Maggi, et al., 'Determination of tungsten and molybdenum concentrations from an X-ray range spectrum in JET with the ITER-like configuration', 41<sup>st</sup> European Physics Society conference on plasma physics, 17/6/2014, Berlin (Germany).

仲野友英, 村上泉, および 鈴木千尋, '原子構造計算プログラム FAC による多価タングステンイオンのスペクトル解析', プラズマ核融合第 29 回年会, 2012 年 11 月 30 日, クローバープラザ日(春日市)。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

仲野 友英 (NAKANO, Tomohide)

日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 那珂核融合研究所・研究副主幹  
研究者番号: 50354593