

令和元年6月21日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06658

研究課題名(和文)次世代核融合超高温プラズマにおける高電離タングステニオンの高精度診断方法の確立

研究課題名(英文) Establishment of high accuracy diagnostic method of highly ionised tungsten ion in high temperature plasmas in next generation fusion devices

研究代表者

仲野 友英 (Nakano, Tomohide)

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)

研究者番号：50354593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：タングステニオンの電離・再結合断面積を理論的に計算し、その精度を実験的に確かめることが目的である。電離・再結合断面積の実験による測定は困難であるため、実験・理論の直接の比較による精度評価の例はほとんど存在しない。本研究では、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W62+とW63+のスペクトル線強度比と理論的に計算したW63+再結合・W62+電離断面積比との直接的な比較を可能にした。比較の結果、理論計算による電離・再結合断面積の精度は、低い電子衝突エネルギーでは高いが、高い電子衝突エネルギーでは低いことが示された。理論計算の改善が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算したW62+電離・W63+再結合断面積は改善すべき部分はあるものの、本研究により初めて精度が評価された断面積を整備した。将来の核融合炉プラズマ中のタングステニオン密度の導出に本データを用いることによって、その測定値に対する精度(真のタングステニオン密度が存在する範囲)を評価することが可能である。これは測定を質的に向上させることから、以前より切望されていたデータである。さらなる理論計算の改善により、高電子衝突エネルギーでの精度の向上を目指す。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to evaluate uncertainties of the calculated W62+ ionization and W63+ recombination cross-sections. Because of difficulties in direct measurement of the cross-sections, evaluation of the uncertainties by direct comparison between calculated and measured cross-sections are not available.

We have developed a method, by which dependence of emission intensities on electron impact energy is cancelled out. The method enables direct comparison of the ratio of W62+ to W63+ emission intensity with the ratio of W63+ recombination to W62+ ionization cross-section. The comparison indicates that uncertainty of the calculated cross-sections is small in a low electron impact energy range but large in a high electron impact energy range. This suggests that further improvement of the calculation is required.

研究分野：プラズマ分光学

キーワード：原子分子データ 原子過程 二電子性再結合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代の核融合実験炉である国際熱核融合実験炉 ITER では、ダイバータと呼ばれるプラズマの熱負荷が集中する場所の材料としてタングステンをを用いることが決定された。タングステンの融点が高いため、プラズマの熱によっても溶けにくいなど、タングステンはプラズマを取り囲む機器の材料として優れた特性を持つためである。他方で、タングステンはプラズマに混入すると、非常に高温の核融合プラズマ中でも完全電離しない。そのため、タングステイオンから放たれる光(スペクトル線)を通じてプラズマからエネルギーが逃げ、プラズマの温度は低下してしまう。よって、プラズマ中のタングステイオン密度を最小限に抑制することは核融合プラズマにとって重要である。

プラズマ中のタングステイオン密度をタングステイオンのスペクトル線強度の測定値から導出するには、電離・再結合反応率(断面積あるいはレート)が必要である。これらは理論的に計算され広く用いられているが、理論計算では誤差が付されないため、これらを用いて導出したタングステイオン密度の実験測定値に対する誤差は不明である。したがって、特にタングステン材ダイバータを持つ ITER におけるプラズマ中のタングステイオン密度の実験測定に向けて、誤差付きの電離・再結合断面積の整備が切望されている。

誤差付きの電離・再結合断面積を整備するには、理論計算によって得られた電離・再結合断面積を実験によって検証することが必要である。しかしながら、非常に高温の ITER のプラズマ中で生成される、例えば全 74 個の電子のうち 63 個の電子が剥ぎ取られた W^{63+} のような高電離タングステイオンを生成することのできる装置は、ITER 以外には非常に限られている。さらに、断面積の直接測定には様々な実験・測定上の制限があるため、タングステンの電離・再結合断面積を絶対値で直接測定するのは非常に困難である。そのため、誤差付きの電離・再結合断面積はほとんど存在しない。

本研究では、数少ない高電離タングステイオンを生成できる装置での測定結果に対して、簡便かつ精度よく断面積を評価する手法を適用し、理論的に計算する W^{62+} の電離及び W^{63+} の再結合断面積の誤差を付する、すなわち精度を評価する。

2. 研究の目的

W^{62+} 電離及び W^{63+} 再結合断面積の理論計算を行うとともに、実験によってそれらの誤差を見積もる。これによって誤差付きの電離・再結合断面積を整備する。

3. 研究の方法

本研究では、スペクトル線の強度比を実験的に測定し、また断面積比を理論的に計算し、以下に述べる A、B、及び C の手法によって、これらと比較する。この比較によって得られる差が断面積比の理論計算の不確かさと解釈できるため、この方法によって断面積の誤差、あるいは精度を見積もることができる。

(手法) 密度が低いプラズマでは、コロナ平衡モデルが成立する(本研究で対象とするプラズマでも成立する)。すなわち、 W^{62+} 及び W^{63+} の 3s-3p スペクトル線の強度比 ($\beta^{62+} / \beta^{63+}$) と電離及び再結合断面積の比 (S^{62+} / α^{63+}) はそれぞれ、 W^{62+} 及び W^{63+} の密度比 (n^{62+} / n^{63+}) 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イオン密度比に比例する：

$$\beta^{63+} / \beta^{62+} = 0.8 n^{63+} / n^{62+}$$

B. 電離・再結合断面積比はタングステイオン密度の逆比に等しい：

$$S^{62+} / \alpha^{63+} = n^{63+} / n^{62+}$$

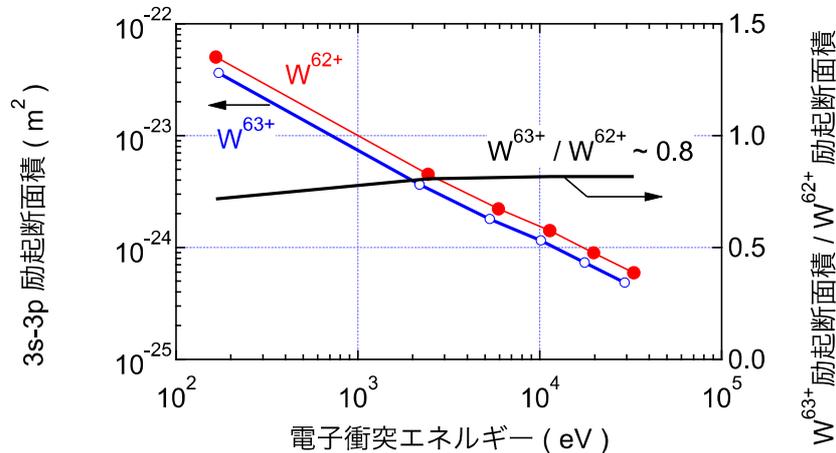


図 1. 電子衝突エネルギーに対する (左軸) W^{63+} 及び W^{62+} の 3s-3p 励起の断面積、及び (右軸) W^{62+} 3s-3p 励起断面積に対する W^{63+} 3s-3p 励起断面積の比。

C. A. および B. から次式が成り立つ：

$$r^{63+} / r^{62+} = (\beta^{63+} / \beta^{62+}) / 0.8 = S^{62+} / \alpha^{63+}$$

C により，スペクトル線の強度比 ($\beta^{63+} / \beta^{62+}$) と断面積比 (S^{62+} / α^{63+}) の比較が可能である．スペクトル線の強度比 ($\beta^{63+} / \beta^{62+}$) を実験的に測定することは可能であるため，理論的に計算した断面積比 (S^{62+} / α^{63+}) との比較が可能である．この比較によって得られる差が断面積比の理論計算の不確かさと解釈されるため，断面積の誤差，あるいは精度を見積もることができる．

(A の詳細) A は一般には成り立たない．本来，スペクトル線の強度は電子衝突エネルギーに対してそれぞれ異なる依存性を持ち，したがってスペクトル線の強度比も電子衝突エネルギーに依存するからである．このような一般的なスペクトル線強度の性質に対して，本研究では，スペクトル線強度比が電子衝突エネルギーに依存しないスペクトル線のペアを見だし，解析に用いた．このスペクトル線ペアでは A による簡便な解析が可能であり，C による比較精度の向上に寄与する．

具体的に本研究では， W^{63+} (3s-3p: 7.77 nm) と W^{62+} (3s²-3s3p: 7.99 nm) スペクトル線を選択した．図 1 に示すように，これらのスペクトル線の強度 (図では励起断面積) は電子衝突エネルギーに対して非常に類似した依存性を持つため，同図右軸に示すように，それらの強度比 (図では励起断面積比) は一定 (~0.8) となる．物理的には，両者とも 3s-3p 遷移であり，かつ基底準位である 3s 準位から 3p 準位への励起エネルギーが近い (~160 eV) ことに由来する．

4. 研究成果

(1) A. により実験的にタングステニオンの密度比を導出するために， W^{63+} 及び W^{62+} のスペクトル線強度比 ($\beta^{63+} / \beta^{62+}$) の測定を電気通信大学の電子ビーム・イオントラップ装置 (EBIT 装置) で行った．電子衝突エネルギーは 12 keV であり， W^{63+} 及び W^{62+} を生成するのに十分なエネルギーである (それぞれ，7.1 keV 及び 7.0 keV で生成される)．この測定により，スペクトル線の強度比 $\beta^{63+} / \beta^{62+} = 0.6$ が得られた．また，米国の電子ビーム・イオントラップ装置で電子衝突エネルギー 8.8, 9.0, 9.3, 及び 12 keV で測定されたスペクトル線の強度比 $\beta^{63+} / \beta^{62+}$ を文献 [Yu. Ralchenko et al., J. Phys. B. 41 (2008) 021003] より抽出した．これらの強度比から，A. によりタングステニオンの密度比を導出した．導出されたタングステニオンの密度比を図 2 の右軸に示す．

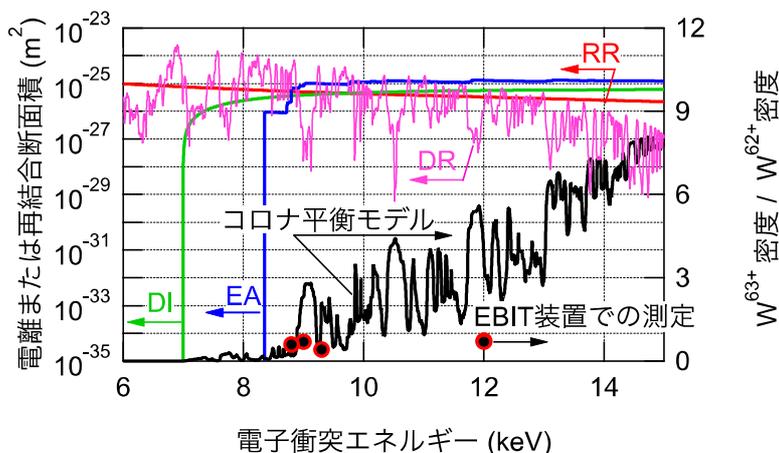


図 2. 電子衝突エネルギーに対する (左軸) 理論計算による断面積，及び (右軸) W^{62+} に対する W^{63+} の密度比のモデル計算値，及び実験測定値．DI は直接電離，EA は自動電離準位を経由する電離，RR は放射再結合，及び DR は二電子性再結合の各過程を指す．

(2) B. により理論計算的にタングステニオンの密度比を導出するため， W^{62+} の電離，及び W^{63+} の再結合断面積を計算した．計算には原子構造計算プログラム FAC (Flexible Atomic Code) [Gu. M. F 2008 Can. J. Phys. 86 675] を用いた．計算結果を図 2 の左軸に示す．電離断面積 S^{62+} は，直接電離 (DI) と自動電離準位への励起を経由する電離 (EA) の各過程の断面積の和である．また，再結合断面積 α^{63+} は，放射再結合 (RR) と二電子性再結合 (DR) の各過程の断面積の和である．したがって，B. によりコロナ平衡モデルによってタングステニオンの密度比を導出するには DI, EA, RR 及び DR を計算する必要がある．

DI は，例えば，



のように電子衝突により電子が剥ぎ取られ， W^{62+} から W^{63+} への電離が生じる過程である．

EA は，例えば，



$$W^{63+}(2p^6 3s) + 2e^-$$

(n は主量子数, l は角運動量量子数) のように, 一旦, 自動電離準位へ励起され, その後の自動電離によって, W^{62+} から W^{63+} への電離が生じる過程である. この過程では, 自動励起準位に励起された後, 自動電離するか, 光放射によって元に戻るか (例えば, $W^{62+}(2p^5 3s^2 nl) \Rightarrow W^{62+}(2p^6 3s^2) + h\nu$ (光)) の二つの経路が競合するため, その競合の割合 (分岐比) を計算する必要がある. 計算精度の向上のためには, 可能な限り大きな n と l まで計算する必要がある. 煩雑な計算であることに加えて, 計算時間を要するため, ここでは $n \leq 15$, 及び $l \leq 12$ の範囲で計算を行った.

RR は, 例えば,

$$W^{63+}(2p^6 3s) + e^- \quad W^{62+}(2p^6 3s^2) + h\nu \text{ (光)}$$

のように, W^{63+} と電子が結びつき, 余剰のエネルギーを光として放射することによって, W^{63+} から W^{62+} への再結合が生じる過程である.

DR は, 例えば,

$$W^{63+}(2p^6 3s) + e^- \quad W^{62+}(2p^5 3s nl n'l') \Rightarrow W^{62+}(2p^6 3s^2) + h\nu \text{ (光)}$$

のように, W^{63+} と電子が結びつき自動電離準位が形成された後, 光放射によって W^{62+} への再結合が完了する過程である. 自動電離準位が形成された後, 光放射によって再結合を完了するか, 自動電離によって元に戻るかの二つの経路が競合するため, EA と同様に分岐比を計算する必要がある. ただし, EA とは異なり, nl と $n'l'$ の組み合わせが更に多数となるために, 更に計算が煩雑であり, 計算には莫大な計算時間を要する. そこで, 莫大な数の分岐比の計算時間を短縮するため, 主要な自動電離及び光放射遷移を調べた: 自動電離では例えば $W^{62+}(2p^5 3s 3l n' l') \Rightarrow W^{63+}(2p^5 3s 3l n') + e^-$ の遷移が, 特に n' が大きい場合に支配的であった. 光放射遷移では $W^{62+}(2p^5 3s 3l n' l') \Rightarrow W^{62+}(2p^6 3s n' l')$ のように $3l$ 電子が内殻の $2p$ 軌道を埋める遷移が支配的であった. この例のように支配的な遷移を重点的に計算に含めることによって, 計算精度を確保しつつ, 可能な限りの大きな n, l, n' 及び l' まで (ここでは $n \leq 6, l \leq 12, n' \leq 15$, 及び $l' \leq 12$) 計算した.

(3) C.により, 実験で測定したタングステニオンの密度比 ($n^{63+} / n^{62+} = [I^{63+} / I^{62+}] / 0.8$) と理論的に計算したタングステニオンの密度比 ($n^{63+} / n^{62+} = S^{62+} / \alpha^{63+}$) の比較を図 2 の右軸に示す. ただし, $S^{62+} = DI + EA$ であり, $\alpha^{63+} = RR + DR$ である. ここでの計算値は, 電子衝突エネルギー 9 keV 付近では実験値とよく一致したが, 12 keV では実験値よりも大きかった. 不一致の原因として, コロナ平衡モデルによる計算では考慮しなかった電荷移行再結合の効果が実験では顕著であった可能性がある. また, 二電子性再結合断面積 (DR) の計算ではさらに考慮する準位を増やすことを検討している.

本研究で計算された電離・再結合断面積は, 高い電子衝突エネルギー (12 keV) では実験との不一致が見られるものの, 実験によって精度が確かめられた断面積データであり, これまでにほとんど例がないデータである. この成果は, DI, EA, RR, 及び DR の個々の断面積の理論計算の誤差を評価するものではないが, 実際のプラズマ中のタングステニオン密度の解析などでは, 断面積そのものではなく断面積比が必要な場合が多く, 解析の実用に供することが可能である.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

[学会発表] (計 3 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 仲野 友英

ローマ字氏名: NAKANO, Tomohide

所属研究機関名: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

部局名: 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

職名: 上席研究員

研究者番号 (8 桁): 50354593

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, 研究者個人に帰属されます.