

タングステン多価イオンの真空紫外領域での発光線の探索

中村信行研究室 池田大和

2023年 3月7日

1 序論

1.1 多価イオン

一般に多価イオンとは、2価以上の正または負のイオンのことを指すが、本論文では前者に限定する。原子 A から q 個の電子が電離したイオンを A^{q+} と表記する。また、中性原子を I と考え、ローマ数字で表記する方法もある。例えば鉄の2価の多価イオンは Fe III と表記される。

1.2 国際熱核融合実験炉 (ITER)[1]

核融合の科学的・技術的に重要な課題を解決するために国際熱核融合実験炉 (ITER) というプロジェクトが進行している。ITER にはプラズマの受け皿となるダイバータと呼ばれる部分がある。ダイバータは熱負荷が非常に高いため融点が最も高い金属であるタングステンが表面に用いられる。欠点として、タングステン原子がプラズマ中に混入し、多価イオンとなり X 線放射することで、プラズマ温度が下がり、核融合の効率が減少してしまう。これを防ぐため、タングステン原子の混入量などを正確に把握する必要がある。混入量などを直接測定するのは難しいため、プラズマからの発光を調べるプラズマ分光診断という手法は大変有用である。

1.3 先行研究

我々の研究室では、ITER の分光診断に資する分光データ取得を目的としてタングステン多価イオンの分光測定を行っている。特に、6~28 価のタングステン多価イオンについて 4~27 nm の極端紫外 (EUV) 領域と 308~710 nm の可視光領域を、加えて 6~13 価のタングステン多価イオンについて 80

~125 nm の真空紫外 (VUV) 領域の発光線の観測を行ってきた [2][3][4][5]。

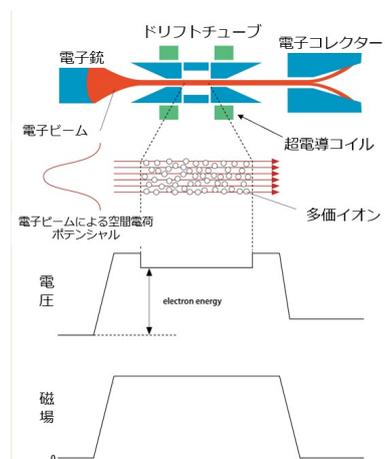
1.4 研究目的

ITER におけるタングステン多価イオンのプラズマ分光診断を行うためには、タングステン多価イオンのスペクトルのデータが必要である。しかし、例えば NIST[6] に登録されているタングステン多価イオンの発光線の本数は、比較的低价数の領域 (10~30 価) で特に少ない。そのため本研究の目的は、14~18 価のタングステン多価イオンの VUV 領域での発光線を観測・同定し、その波長を決定することである。

2 実験装置

2.1 小型電子ビームイオントラップ (CoBIT)

小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) は多価イオンの研究のために開発された、多価イオン生成装置である。CoBIT の原理図を図 1 に示す。



ドリフトチューブ (DT) の中央は電位が低くなっており、そこにイオンがトラップされる。トラップされたイオンが電子ビームによって逐次電離が進み多価イオンが生成される [7]。逐次電離とは、電子衝突によって電子が一個ずつ電離していくことである。タングステンは融点が高いため、減圧下で昇華するタングステンヘキサカルボニル $W(CO)_6$ を用いて CoBIT 内部にガス導入した。多価イオンからの発光は CoBIT に接続されている可視分光器と VUV 分光器の二台を用いて測定した。

2.2 分光器

本研究では可視領域を測定するため、HORIBA 製の iHR550 可視分光器を使用した。これは Czerny-Turner 型であり、高い集光効率を持つ [8]。検出器は ANDOR 社の iDus416Serles である CCD カメラを用いた。

加えて、VUV 領域を測定するため、11~124 nm を計測できる新たな分光計を CoBIT に取り付け、測定を行った。この分光計は収差補正された凹面回折格子を備えたかすみ入射平面結像型である [9]。CoBIT 中の多価イオンは、強い磁場によって 400 μm 程に圧縮された細い電子ビームによって励起されるため、発光源はスリットと見なすことができる。そのため、この分光器はスリットレス構成で設計されており、効率的に分光が出来る。検出器は、Quantar Technology 社製の 2 次元位置検出器 (PSD) を使用した。

2.3 波長較正

PSD や CCD カメラで得られたデータは横軸がピクセル数として得られるため、波長に変換する必要がある。そのため既知である発光線の波長を基に変換を行う。例えば、VUV 領域では、タングステン試料の導入前に 200 eV の電子ビームで装置内の (わずかに存在する) 炭素や酸素などの多価イオンを測定する。図 2 に PSD 位置-10 mm で実際に得られた装置内の発光スペクトルを示す。

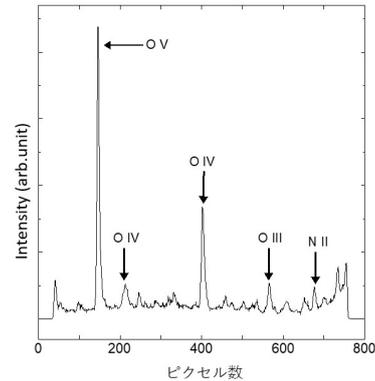


図 2 PSD 位置-10 mm での装置内の発光スペクトル

図 2 の矢印で示された部分の多価イオンの発光線の波長は既知である。矢印部分のピクセル数とそれに対応する波長を表 1 に、またこれを基に決定した波長とピクセル数の関係を図 3 に示す。

表 1 PSD 位置-10 mm で矢印部分のピクセル数と波長

多価イオン	ピクセル数	波長 [nm]
O V	146.443	62.973
O IV	213.535	60.839
O IV	403.162	55.407
O III	565.991	50.739
N II	676.839	47.565

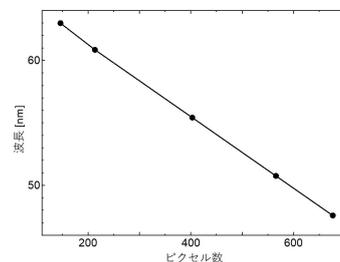


図 3 PSD 位置-10 mm でのピクセル数と波長の関係

このようにして、波長とピクセル数の対応関係を求めピクセル数を波長に変換する。

3 結果と考察

3.1 可視領域での先行研究との比較

本研究では 14~18 価のタングステン多価イオンの発光を観測するため、280 eV~450 eV の電子ビームエネルギーで、測定時間は 30 分、溝本数 150 本で測定した。可視領域に関しては先行研究 [2] があるため、それと比較することで実際に 14~18 価のタングステンが得られているのかを確認した。まず 545~600 nm 付近の領域で先行研究と比較した。先行研究を図 4 に、本研究で得られた発光スペクトルを図 5 に示す。波長較正は Hg と He を用いた。

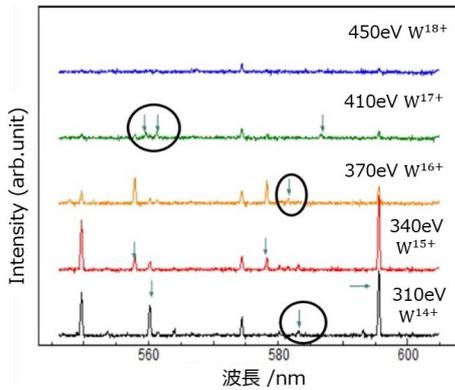


図 4 先行研究によって得られた 545~600 nm 付近の発光スペクトル [2]

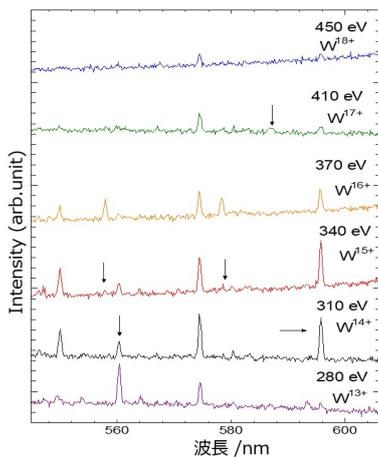


図 5 本研究で観測された 545~600 nm 付近の発光スペクトル

本研究で得られたスペクトルに先行研究でも観測

された発光線を矢印で示している。右肩に示しているのは測定時の電子ビームエネルギーとその際に生成される最大の価数である。先行研究での黒丸で囲まれた発光線は本研究では見られなかった。理由として、強度が非常に弱い発光線であることからバックグラウンドに紛れてしまったと考えられる。

次に 598~655 nm 付近の領域で先行研究と比較した。先行研究を図 6 に、本研究で得られた発光スペクトルを図 7 に示す。

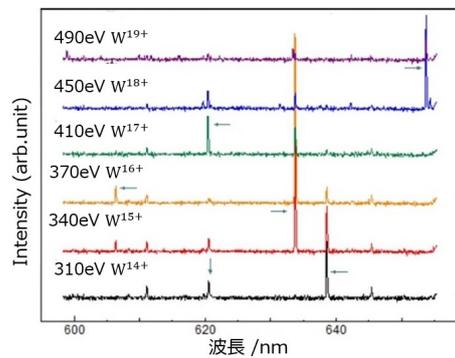


図 6 先行研究によって得られた 598~655 nm 付近の発光スペクトル [2]

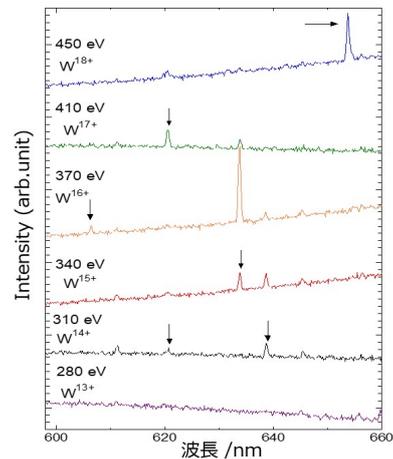


図 7 本研究で観測された 598~655 nm 付近の発光スペクトル

この領域では、先行研究と発光スペクトルが一致した。つまり、可視領域では先行研究の再現は取れたので、実際に 14~18 価のタングステン多価イオンを生成できた。

3.2 本研究で新たに得られた発光スペクトル

未だ観測されていない VUV 領域である、45~65 nm と 100~125 nm で 14~18 個のタングステン多価イオンの発光線を探索した。その結果をそれぞれ図 8(a) および (b) に示す。45~65 nm は PSD 位置-10mm、100~125 nm は PSD 位置 45 mm で測定時間は 30 分、溝本数 600 本で測定した。

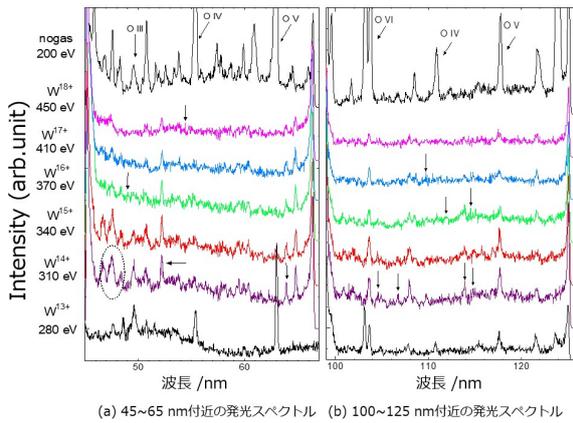


図 8 本研究で観測された VUV 領域での発光スペクトル

左端に示しているのは測定時の電子ビームエネルギーとその際に生成される最大の価数である。一番上の nogas 200 eV と示したスペクトルは、タングステン試料の導入前に電子ビーム 200 eV で測定した際の発光スペクトルである。発光線のエネルギー依存性からその価数由来であると考えられる発光線を矢印で示した。例えば、図 8(b) の 310 eV で得られたスペクトル中の 113 nm 付近にある矢印の発光線は 280 eV には存在せず、340 eV 以降では徐々に強度が弱くなっていることから、 W^{14+} 由来であると考えられる。また、(a) に点線で囲んだ部分は、エネルギー依存性は見られるが、ガス導入前の 200 eV のスペクトルで同じ位置に発光線があることから不純物（酸素や炭素など）由来である可能性があるため、他の発光線と区別した。

45~65 nm と 100~125 nm で新たに観測された 11 本のタングステン多価イオンと思われる発光線の波長を表 2 にまとめた。

表 2 新たに観測されたタングステン多価イオンの発光線

価数	波長 [nm]
14	52.19, 63.90, 104.57, 106.72, 113.92, 114.91
16	48.99, 11.84, 114.54
17	109.7361
18	54.41

4 結論

ITER のプラズマ診断に必要とされているタングステン多価イオンのスペクトル観測を行い、過去に報告例のない発光線を観測した。可視領域と VUV 領域で 13~18 個のタングステン多価イオンを観測し、可視領域では先行研究の再現が出来ており、VUV 領域では 11 本の新たな発光線を観測し、同定することができた。今後は今回測定していない 65~100 nm の領域や 19 個以上のタングステン多価イオンの観測を行い、分光データの更なる蓄積を行う。

参考文献

- [1] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門
- [2] 表 一輝 修士論文 (2016) 電気通信大学
- [3] 三田 百恵 修士論文 (2017) 電気通信大学
- [4] 箕島 真希 修士論文 (2012) 電気通信大学
- [5] 船橋 茉由子 卒業論文 (2021) 電気通信大学
- [6] NIST Atomic Spectra Database Lines Form
- [7] R.E. Marrs, M.A. Levine, D.A. Knapp and J.R. Henderson, Phys. Rev. Lett. 60. 1715(1988)
- [8] HORIBA Scientific iHR シリーズ
- [9] Nobuyuki Nakamura et.all Journal of the Physical Society of Japan 90, 114301 (2021)