

Sn 様及び In 様のタングステン多価イオンにおける発光線の波長決定

中村信行研究室 PIPATPAKORN PATIVATE

・背景と目的

近年、国際共同研究により熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER)の建設が進められている。ITER 容器の下にダイバータという部分があり、プラズマからの高い熱流や粒子の流れを受け止める役割を果たす。その部分には熱負荷に非常に強いタングステンが材料として使用される。タングステンはスパッタリングにより炉内に混入し、高温によって電離することで、多価イオンとなる。タングステン多価イオンは核融合炉内で完全に電離しないため、X線を放出しプラズマの温度を低下させる。この現象によって核融合の効率を低下させることが問題となる。そのため、炉内のプラズマ診断が重要であり、タングステン多価イオンの分光データが必要となる。ITER のプラズマ温度は炉内の中心から端まで幅広く分布しているため、様々な価数でタングステンの発光線を観測しなければならない。しかし、図 1 が表したように、アメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology : NIST)のデータベースによれば観測されたタングステン発光線の数が不足している[1]。特に、原子構造が良く分かっていない $4f$ 開設のタングステン 13 価から 27 価の発光線が非常に複雑で、未同定の発光線も多い。

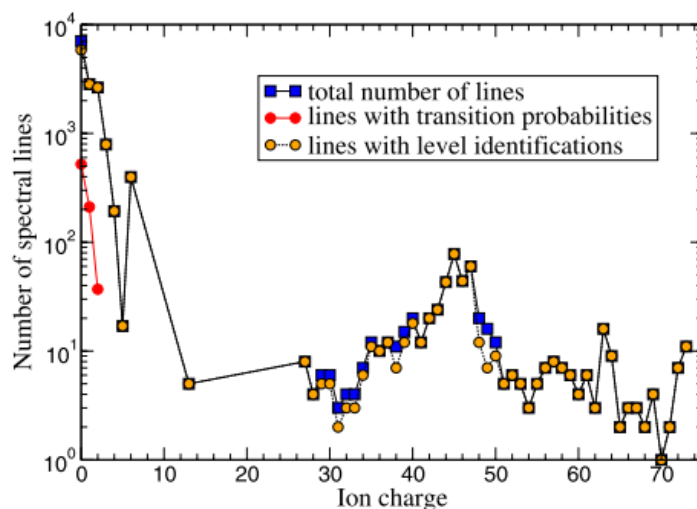


図 1 NIST によるタングステンスpekトルの数 [1]

先行研究[2]では、 $4f$ 開設重元素イオンの微細構造準位を調べるため、In 様($4f^3$)及び Sn 様($4f^4$)電子配置におけるタングステン多価イオンの発光線が観測されたが、低分散の分光測定のみであった。そのため、本研究の目的は小型電子ビームイオントラップ(Compact EBIT : CoBIT)を用いてより高分散の測定を行うことで、タングステン 24 価(Sn 様)及び 25 価(In 様)発光線の波長を決定し理論計算[3]と比較することで、遷移同定を行うことである。

・原理

多価イオンは図2が示したように、電子ビームイオントラップ(EBIT)を用いて生成する。EBITは主に電子銃、3つの円筒電極からなるドリフトチューブ、超伝導コイル、そして電子コレクターから構成されている。イオンはドリフトチューブにより生成された軸方向の井戸型ポテンシャルと、電子ビームによる動径方向の空間電荷ポテンシャルによって3次元的にトラップされている。トラップされたイオンに電子ビームを照射して、電子の衝突エネルギーでイオンの持つ電子を1つずつ剥ぎ取る逐次電離を利用して高価数のイオンを生成する。電子ビームエネルギーは電子銃内のカソードとドリフトチューブ2(図中DT2)の電位差で決定する。

・実験装置と実験方法

タングステンヘキサカルボニルをガス導入することにより、中央部分でタングステン多価イオンが生成されて発光する。Czerny-Turner型分光器で分光され、CCDカメラによって記録される。回折格子は2つの種類を使用し、回折格子300本/mmを用いて低分散の観測を行った後、正確な波長決定の際に1200本/mmを用いて高分散測定を行った。測定時間は30分である。波長較正は標準ランプの発光線により行った。

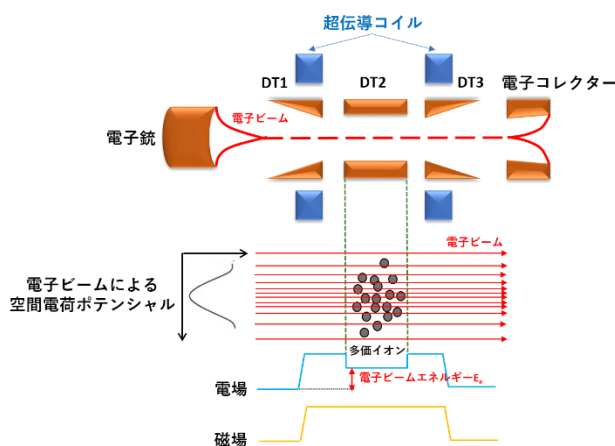


図2 EBITの概略図

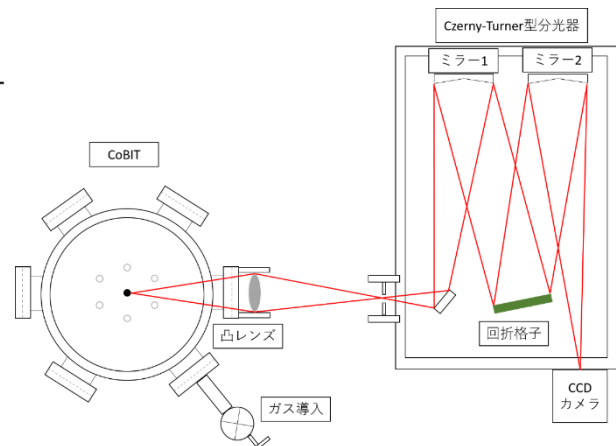


図3 実験装置(CoBIT)

・結果

W^{24+} および W^{25+} を生成するためにそれぞれ電子ビームエネルギーを720 eV、770 eVに設定し、300本/mmの低分散回折格子を用いて広範囲測定を行った結果を図4と図5に示す。図4と図5より、本研究が先行研究の再現することを確認できた。また、回折格子1200本/mmを使用した高分解能測定の結果を図6に示す。図6より、発光線の波長を決定した。

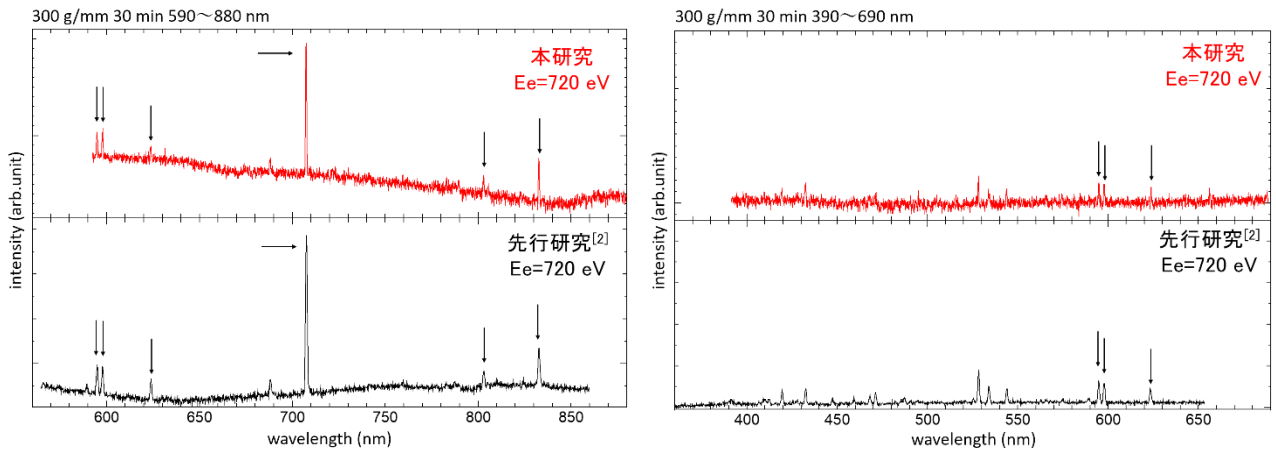


図 4 390~690 nm と 590~880 nm における W^{24+} の発光線 (低分散測定)

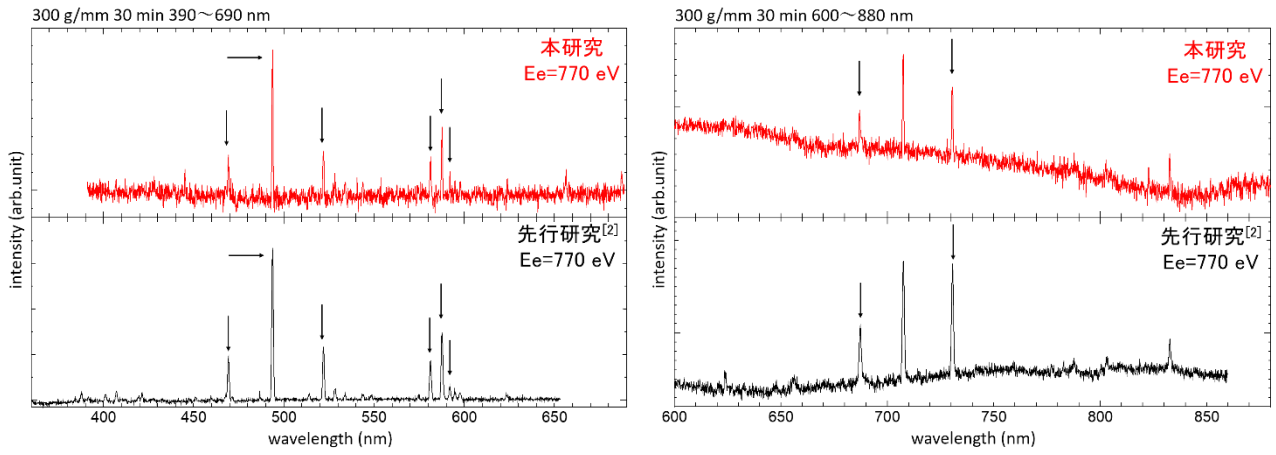


図 5 390~690 nm と 600~880 nm における W^{25+} の発光線 (低分散測定)

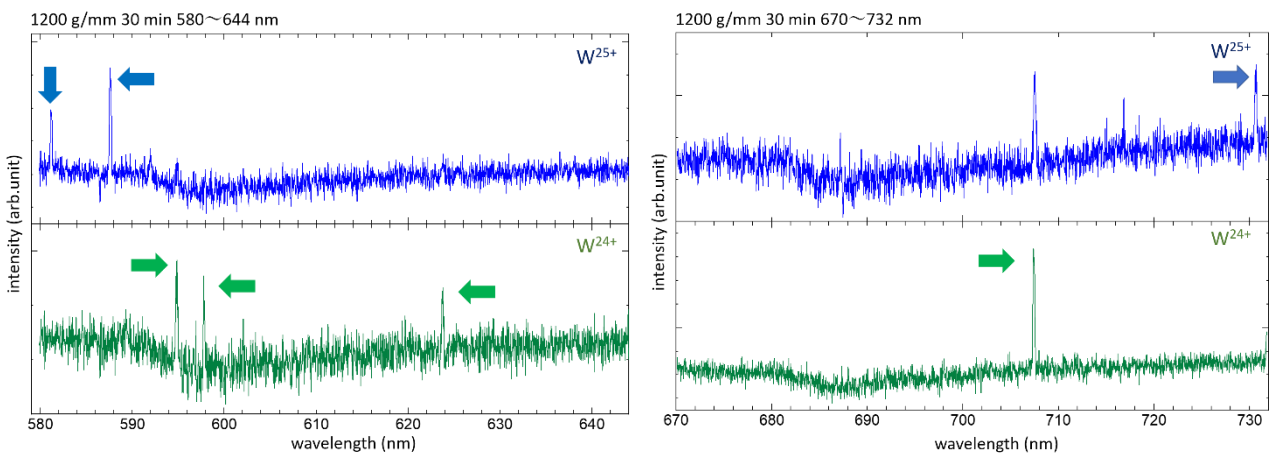


図 6 580~642 nm と 670~730 nm における W イオンの発光線 (高分散測定)

本研究で決定できた W^{24+} および W^{25+} の発光線の波長 $\lambda_{\text{observed}}$ と Safronova らが計算した CI + all-order による波長 λ_{CI} [3]の比較を表 1 に示す。

表 1 本研究が決定したWイオン発光線の波長

価数	$\lambda_{\text{observed}}$ (nm)	λ_{CI} (nm) [3]	遷移 [3]
W^{24+}	594.88		
	597.82		
	623.79		
	707.45	721.8	$^5I_5 \rightarrow ^5I_4$
W^{25+}	581.19	585.1	$^4G_{7/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$
	587.59	588.4	$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$
	591.95	591.3	$^4G_{7/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$
	730.71	731.1	$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$

・まとめと今後の展望

本研究では小型電子ビームイオントラップ (CoBIT) を用いてタングステン多価イオンの発光線を観測した。注目した価数は原子構造が良くわかっていない $4f^n$ 電子配置における W^{24+} (Sn 様) および W^{25+} (In 様) である。初めに、回折格子 300 本/mm を用いて広範囲測定を行って先行研究の結果と比較し、再現することを確認した。そして、回折格子 1200 本/mm を用いて高分解能測定を行って計算値や過去の結果によって発光線の波長を決定した。本研究では 8 本の発光線を波長決定でき、その中の 5 本は遷移を同定することができた。

今後の展望は本研究の問題点に基づいて、CoBIT の効率を改善し、高分解能測定を行いたいと思っている。また、標準ランプの較正線が参考にできなかった領域では波長をよく知られている不活性ガスの多価イオンを生成し、その発光線を較正線としてタングステン多価イオンの発光線を波長決定したいと思っている。

参考文献

- [1] Yuri Ralchenko、Plasma and Fusion Res. 8、2503024 (2013)
- [2] 村田隼一 修士論文 (2017) 電気通信大学
- [3] U. I. Safronova、et. al.、Phys. Rev. A. 95、 042510 (2017)