

タングステン多価イオン発光線の観測と同定

中村信行研究室

表 一輝

1 背景と目的

核融合の科学的、技術的な可能性を検証するために、国際熱核融合実験炉(ITER)が現在建設中である。ITER の装置の一つであるダイバータの材料に、熱耐性や摩耗に強いことからタングステンを用いることが検討されている。しかし、ダイバータ表面のタングステンがプラズマ中に混入すると多価イオン化し放射冷却を引き起こす原因となる。効率的な核融合プラズマの制御のためには、プラズマ中のタングステン多価イオンの挙動を調べるのが重要になっており、タングステン多価イオンからの発光を見る分光診断が有用と考えられている。ところが、分光診断を行うためのタングステン多価イオンの分光データが十分に足りていないことが現状である。

本研究の目的は、過去に報告例のないタングステン多価イオン発光線を観測し、将来の ITER の分光診断に役立てることを目的とした。

2 実験装置

本研究では、電子ビームイオントラップ(EBIT[1])を用いてタングステン多価イオンを生成した。図 1 に EBIT の原理図を表しており、電子銃、ドリフトチューブ(DT)、超伝導コイル、電子コレクタで構成されている。超伝導コイルは、電子ビーム径を圧縮する役割を持つ。圧縮された電子ビームが DT に入射すると、図 1 に示すような電子ビームによる空間電荷ポテンシャルによって多価イオンは径方向に閉じ込められる。また、図 1 に示されているように DT1 と DT2 および DT3 の電位差で生じる井戸型ポテンシャルにより、軸方向にも閉じ込められるため、多価イオンは DT 内部で 3 次的に閉じ込められる。閉じ込められたイオンは電子ビームによる逐次電離を受けて多価イオンになる。イオン化に寄与せず DT を通過した電子ビームは、電子コレクタで回収される。生成されるイオンの価数は、電子ビームのエネルギーに大きく依存し、電子ビームエネルギーが大きいほど高価数の多価イオンが生成される。

図 2 に実験装置の全体図を示す。今回使用した小型 EBIT(CoBIT[2])には EUV 分光器と可視分光器が取り付けられており、CoBIT 内で生成された多価イオンからの発光は、EUV 分光器では不等間隔凹面回折格子、可視分光器では平面結像型回折格子で回折された後、CCD カメラで検出される。EUV 分光器は、光学系が全て真空容器内に収められており、真空度は 10^{-6} Pa のオーダーに保たれている。試料となるタングstenは、有機化合物であるタングstenヘキサカルボニル $W(CO)_6$ を減圧下で昇華させ、ガス導入管を用いて CoBIT 内部に導入した。

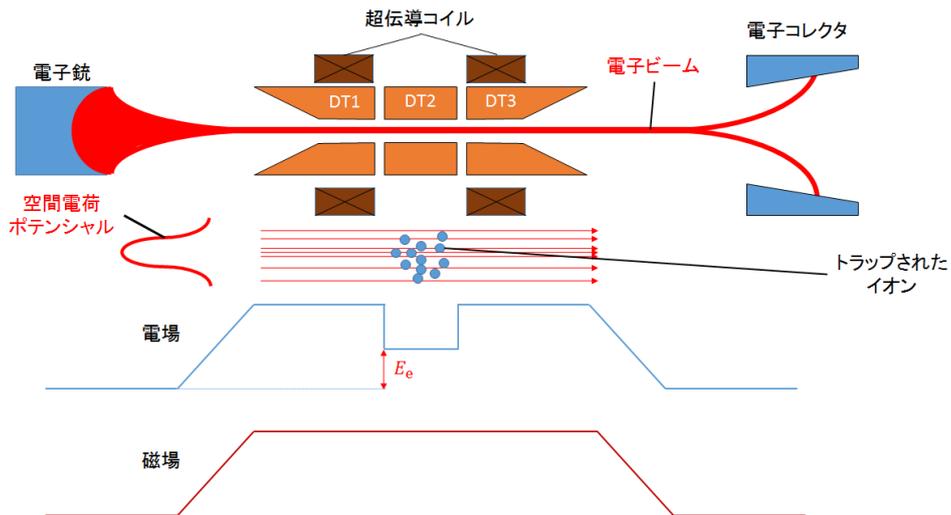


図 1 電子ビームイオントラップ(EBIT)

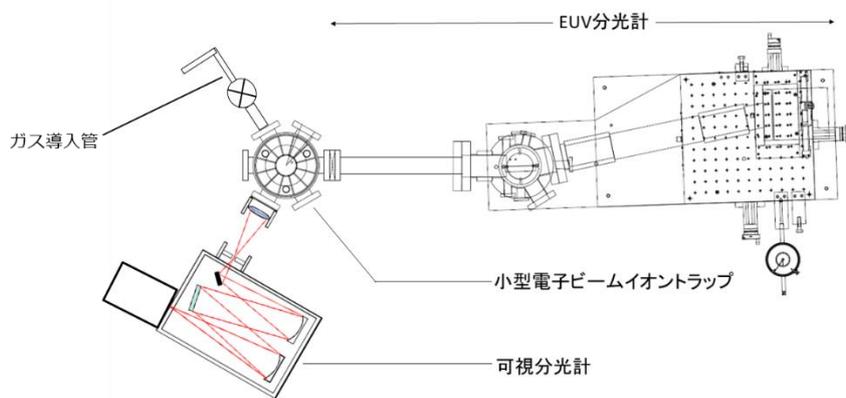


図 2 装置全体図

3 実験結果

3.1 $W^{25+} - W^{28+}$ に関する測定

核融合科学研究所の坂上氏によって 4-16nm におけるタングステン多価イオン発光線の観測が先行研究として行われている。今回、4-6nm に現れているタングステン多価イオンの構造を高分解能で観測することを目的とし、同じ価数を生成することができる電子ビームエネルギーでスペクトルの観測を行った。その結果を図 3 に表す。右肩に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タングステン多価イオンの価数を表している。電子ビームエネルギーが 870eV の時の 8.9nm および 9.1nm 付近で現れている発光線は 27 価の E3 遷移を示している。先行研究と本研究のスペクトルを比較すると、27 価と 28 価を生成できる電子ビームエネルギーにおいて先行研究と似た構造を 5nm 前後と 9nm 付近で観測することができた。しかし、先行研究で見られた 6-7nm における構造を観測することは今回できなかった。

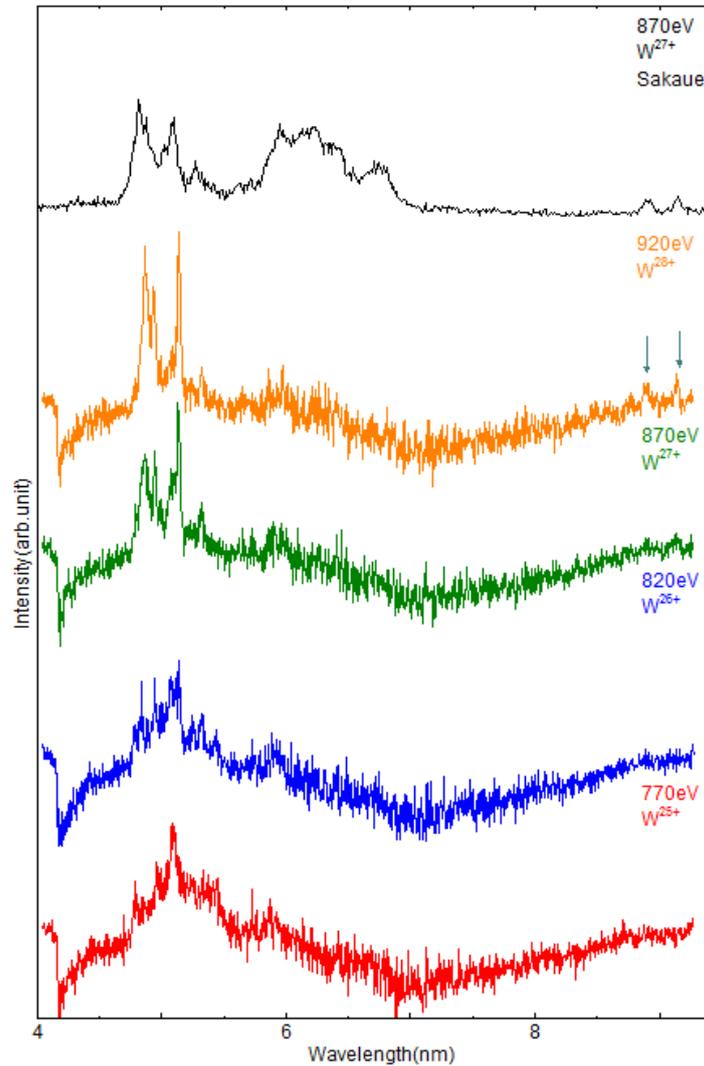


図 3 4-9nm 付近で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル(W²⁵⁺ – W²⁸⁺)

3.2 未同定発光線の観測

我々の研究室では、過去に 8-28 価のタングステン多価イオンに関して、360-560nm の領域で観測を行っている。今回、過去に観測例のないタングステン多価イオン発光線を観測するために、電子ビームエネルギーを 310-870eV の範囲で変化させて実験を行った。可視領域での測定結果を図 4, 5, 6 に示す。それぞれの図において、スペクトルの電子ビームエネルギー依存性とイオン化エネルギーの観点から、深緑色の矢印をつけた発光線は左肩に書かれた価数に帰属するタングステン多価イオンからの発光であると同定した。異なる 3 つの領域での観測の結果、新たに 48 本のタングステン多価イオンに帰属する発光線を観測することができた。

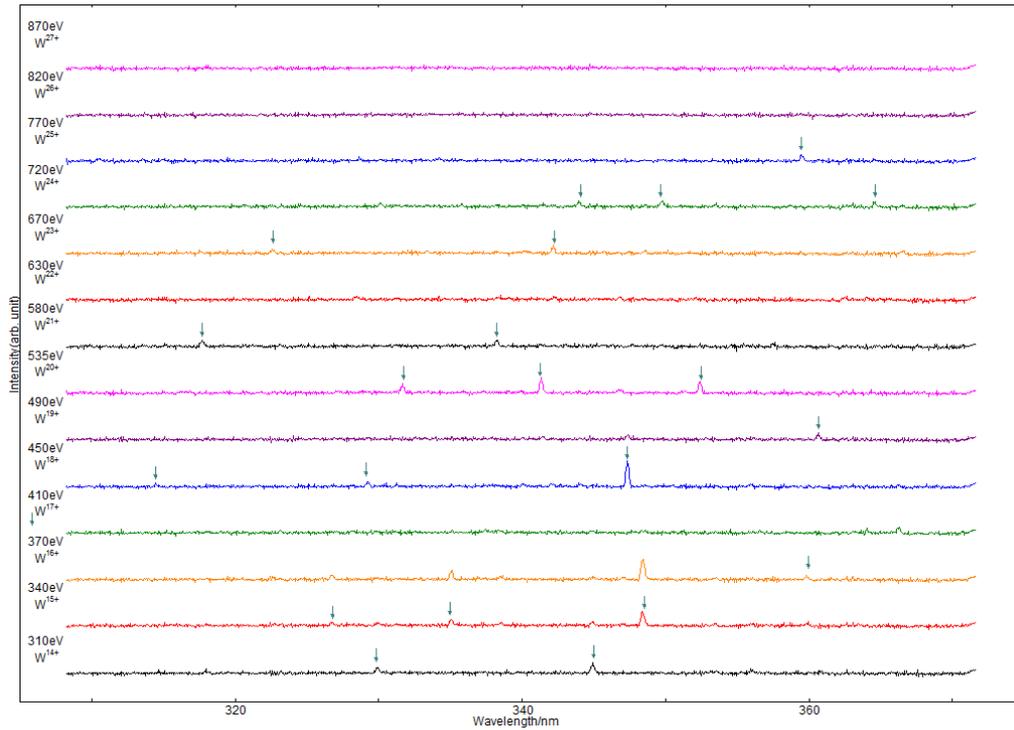


図 4 308-372nm で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル($W^{14+} - W^{27+}$)

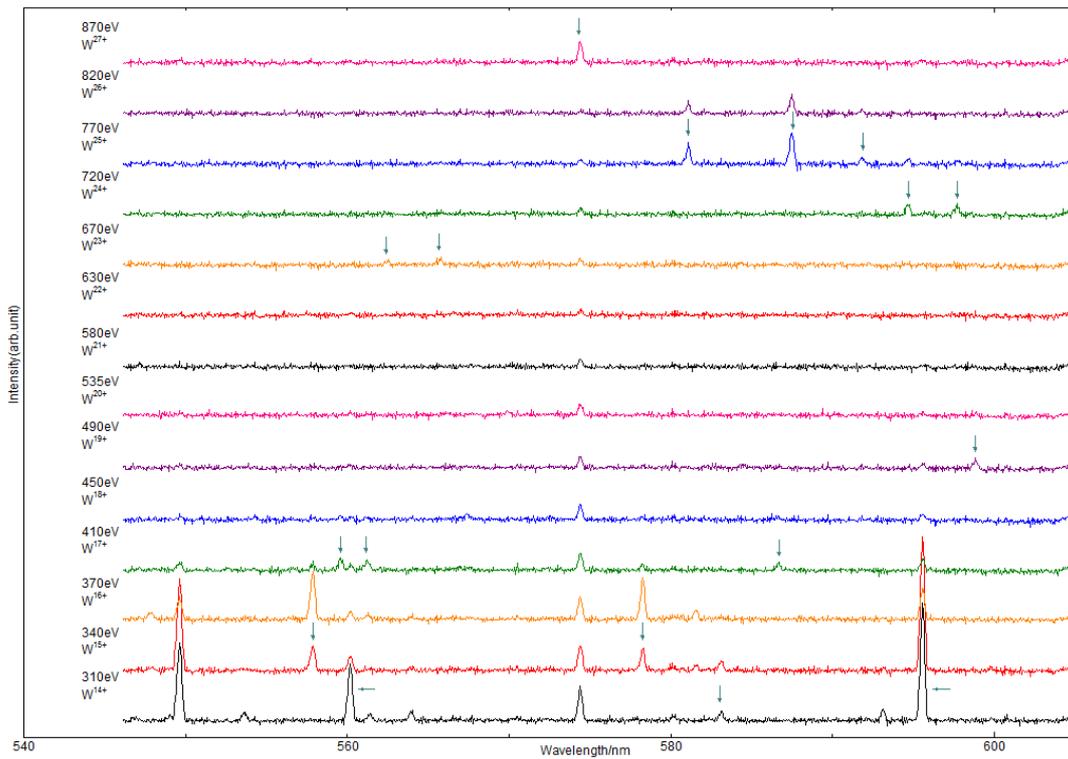


図 5 545-605nm で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル($W^{14+} - W^{27+}$)

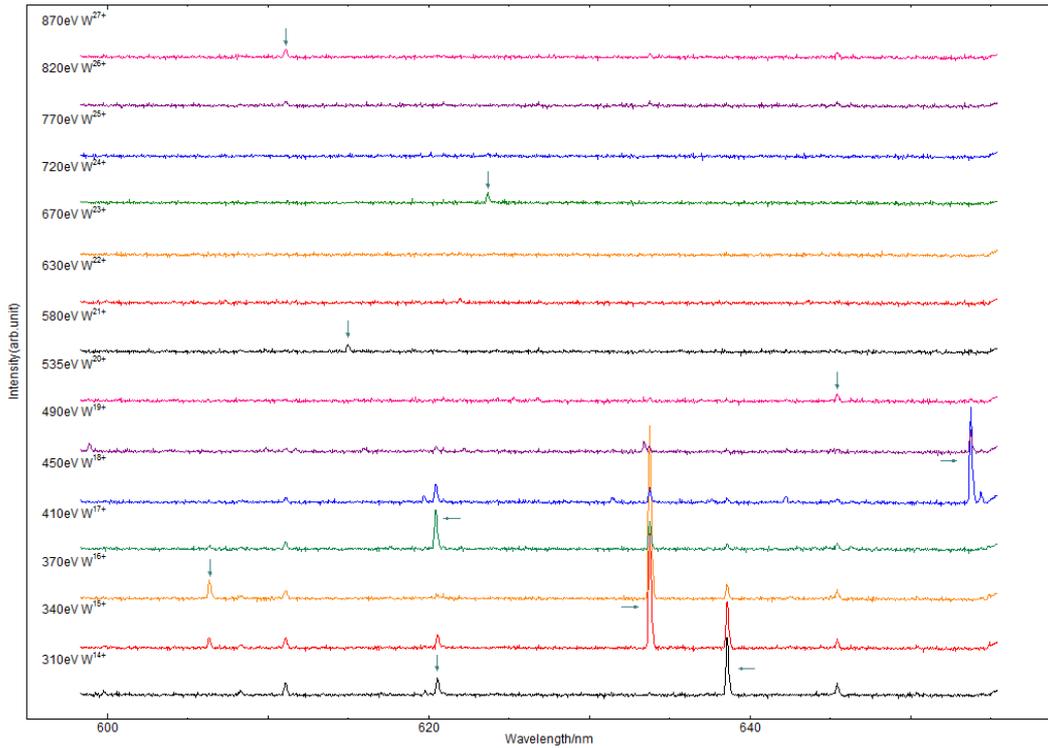


図 6 598-655nm で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル(W¹⁴⁺ – W²⁷⁺)

また、EUV 領域においても同様の観測を行った。8-14nm における観測結果を図 7 に示す。こちらでも電子ビームエネルギー依存性とイオン化エネルギーから矢印をつけた発光線をタングステン多価イオン発光線と同定した。この領域では新たに 16 本の発光線を観測できた。

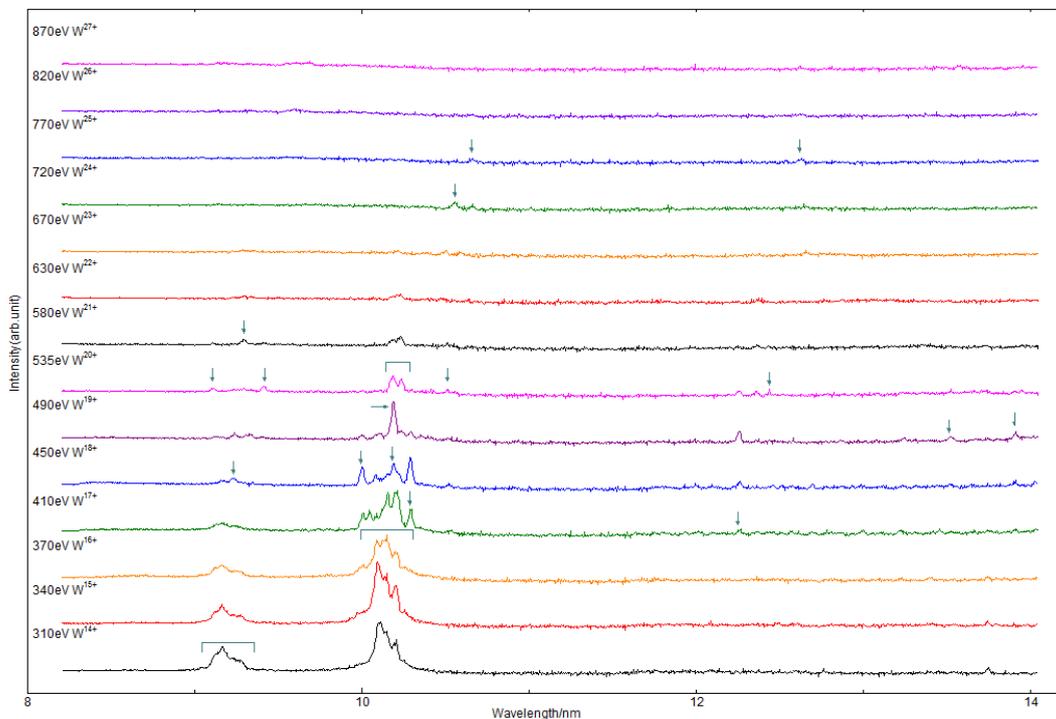


図 7 8-14nm 付近で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル(W¹⁴⁺ – W²⁷⁺)

可視および EUV 領域で、新たに観測されたタングステン多価イオンに関して波長を決定し表 1 にまとめる。

表 1 今回の測定で新たに観測されたタングステン多価イオン発光線

価数	波長[nm]
14	329.89, 344.94, 560.19, 583.16
15	326.73, 335.11, 348.43, 557.86, 578.24, 595.57
16	359.84, 547.86, 581.54, 606.34, 633.74
17	10.2893, 12.2578, 366.27, 559.60, 561.23, 586.69, 595.59, 620.44
18	9.2133, 9.9423, 10.1845, 314.46, 329.27, 347.34, 653.72
19	13.5176, 13.9113, 360.64, 598.86
20	9.1082, 9.4102, 331.67, 341.35, 352.43, 645.45
21	9.2856, 317.70, 338.24, 614.99
23	322.60, 342.20, 562.51, 565.78
24	10.5502, 349.79, 364.57, 594.74, 597.68, 623.71
25	10.662, 12.6262, 581.09, 587.47, 591.82
27	574.40, 611.11

4 結論

将来の ITER のプラズマ診断に役立てるために、過去に観測したことのないタングステン多価イオン発光線を探索し、分光データの蓄積を試みた。その結果、可視領域で新たに 48 本の発光線を見つけ、EUV 領域では 16 本の発光線を観測した。しかし、先行研究との不一致やずれも確認されており、特に EUV 領域のスペクトルに関しては先行研究で発見されていた発光線や構造が見られなかった部分が多々あった。

参考文献

- [1] F.J.Currell et al., J.Phys.Soc.Jpn.,6510 (1996)
- [2] Nakamura et al., Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 063104