

# 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

現在建設中の国際熱核融合炉 ITER[1]では、プラズマ中の粒子流を制御するダイバータの材料にタングステンを用いることが有力視されている。その理由として、高い融点をもちプラズマの熱に耐えられること、プラズマ中の粒子によるスパッタリングが起きにくいこと、核融合の燃料となるトリチウムを吸蔵しにくいといった利点があるからである。しかし、プラズマ中にタングステン粒子が混入すると、タングステン多価イオンとなって X 線を放出し、プラズマの温度を下げ核融合の効率を下げってしまうという問題点もある。効率的に核融合を起こし続けるためには、タングステンのプラズマへの流入量と流入経路を調べ、プラズマを制御する必要がある。プラズマ中のタングステン多価イオンの挙動を調べる手法として、タングステン多価イオンの発光を観測する分光診断が非常に有用であると考えられているが、分光診断に用いるタングステン多価イオンの原子データが極めて不足しているのが現状である。

本研究では、過去に観測されたことの無いタングステン多価イオン発光線を観測し、波長の決定と価数の同定を行い、データの蓄積を行うことを目的とした。

## 2. 実験装置

本研究では、小型電子ビームイオントラップ(CoBIT[2])を用いてタングステン多価イオンを生成した。図 1 に CoBIT の原理図を示す。CoBIT は主には電子銃、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 次元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。CoBIT 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 分光器については、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 台に保たれている。タングステン多価イオンのスペクトルを測定する際には、有機化合物であるタングステンヘキサカルボニル $W(CO)_6$ 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、タングステン多価イオンを生成した。

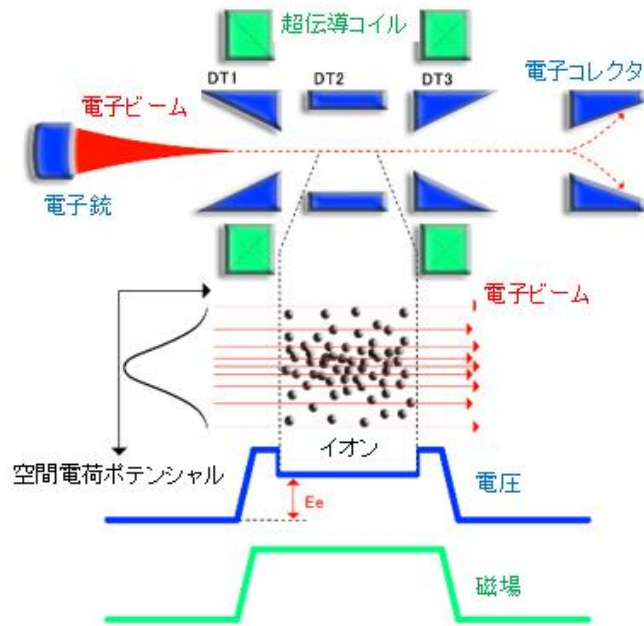


図1 電子ビームイオントラップの動作原理図

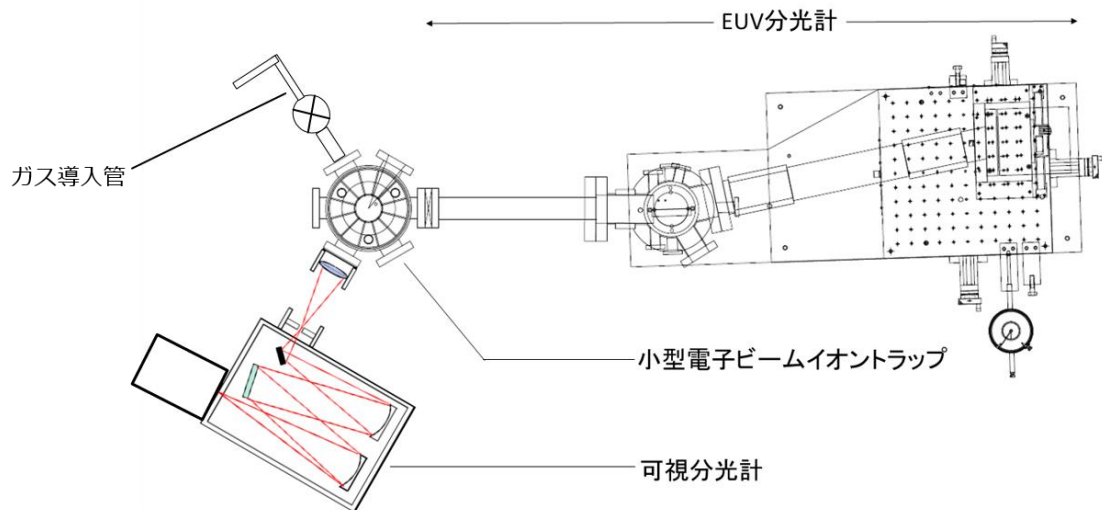


図2 装置全体図

### 3. 実験結果

本研究では、310-870eV の範囲で電子ビームエネルギーを変化させ、20-30 分間露光し、EUV 領域と可視領域でスペクトルの同時測定を行った。図3に EUV 領域で観測されたタングステン多価イオンのスペクトルを示す。右肩の数値は測定時の電子ビームエネルギーと、生成されるタングステン多価イオンの最大の価数を示している。Cobit の電子ビームエネルギーは単色性が強く、ビームエネルギーの変化でスペクトルの挙動が大きく変化する。このことから、観測された 11 本の発光線のうち、赤色でラベル付けた 9 本の発光線は右肩に示した価数からの発光であると考えた。一方で、(j)と(k)の発光線は右肩に示した価数に帰属せず、これらはより低価数のタングステン多価イオンからの発光もしくは不純物の発

光線であると考えた。また、(i)の発光線は複雑な構造を持っていたため、波長の決定はできなかった。

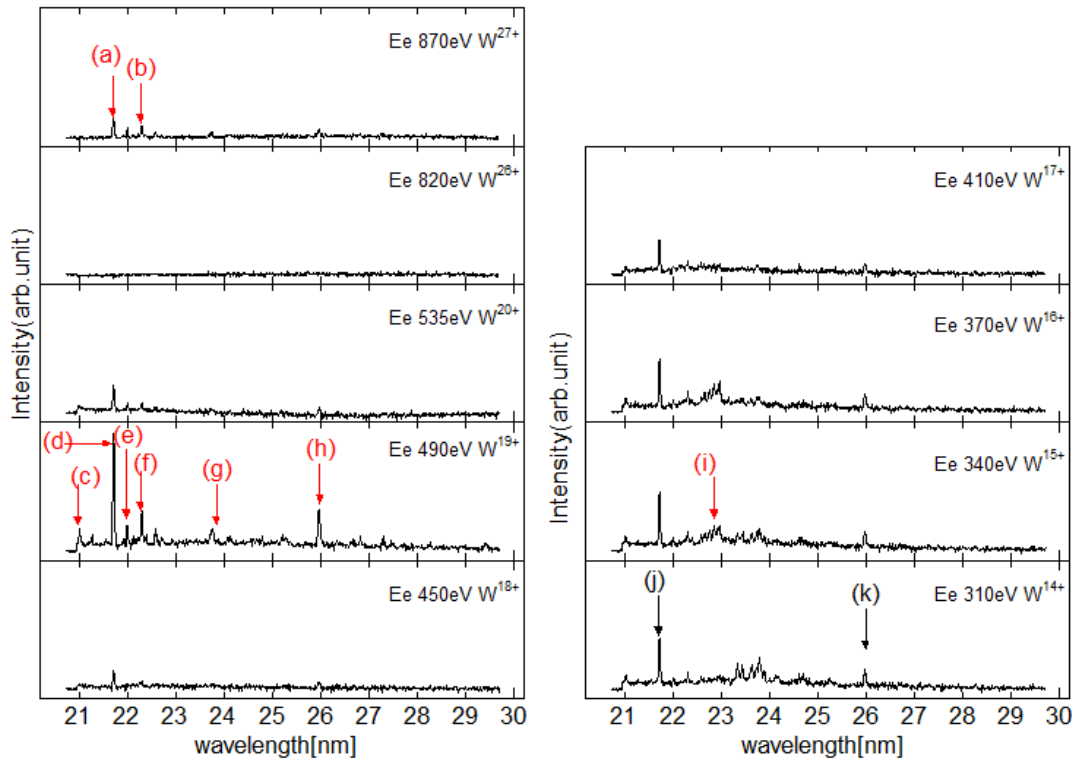


図 3 21-30nm 付近で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル

図 4 に可視領域で観測されたタングステン多価イオンのスペクトルを示す。440-510nm の範囲では青色でラベル付けした 10 本の発光線を観測することができ、全ての発光線が右肩に示したタングステン多価イオンからの発光であると考えた。そのうち、(s), (t), (u)の発光線については、本研究では初めて観測されたタングステン多価イオンからの発光線であった。本研究で観測された発光線について、帰属イオンの価数と波長を表 1 にまとめる。なお、表中の誤差は各発光線を正規分布関数にフィッティングした際の誤差を表している。波長更正の不確かさなどは別途評価する必要がある

表 1 観測されたタングステン多価イオンの発光線

ラベル	価数	波長[nm]	ラベル	価数	波長[nm]
(a)	W <sup>27+</sup>	21.7202 ± 0.0006	(m)	W <sup>26+</sup>	501.96 ± 0.01
(b)	W <sup>27+</sup>	22.3140 ± 0.0007	(n)	W <sup>25+</sup>	469.23 ± 0.02
(c)	W <sup>19+</sup>	21.00 ± 0.01	(o)	W <sup>25+</sup>	493.61 ± 0.01
(d)	W <sup>19+</sup>	21.720 ± 0.006	(p)	W <sup>23+</sup>	459.22 ± 0.01
(e)	W <sup>19+</sup>	22.0073 ± 0.002	(q)	W <sup>21+</sup>	459.95 ± 0.02
(f)	W <sup>19+</sup>	22.313 ± 0.001	(r)	W <sup>19+</sup>	456.38 ± 0.03
(g)	W <sup>19+</sup>	23.755 ± 0.003	(s)	W <sup>19+</sup>	474.43 ± 0.01
(h)	W <sup>19+</sup>	25.963 ± 0.003	(t)	W <sup>17+</sup>	482.960 ± 0.001
(l)	W <sup>26+</sup>	464.622 ± 0.001	(u)	W <sup>15+</sup>	502.5 ± 0.1

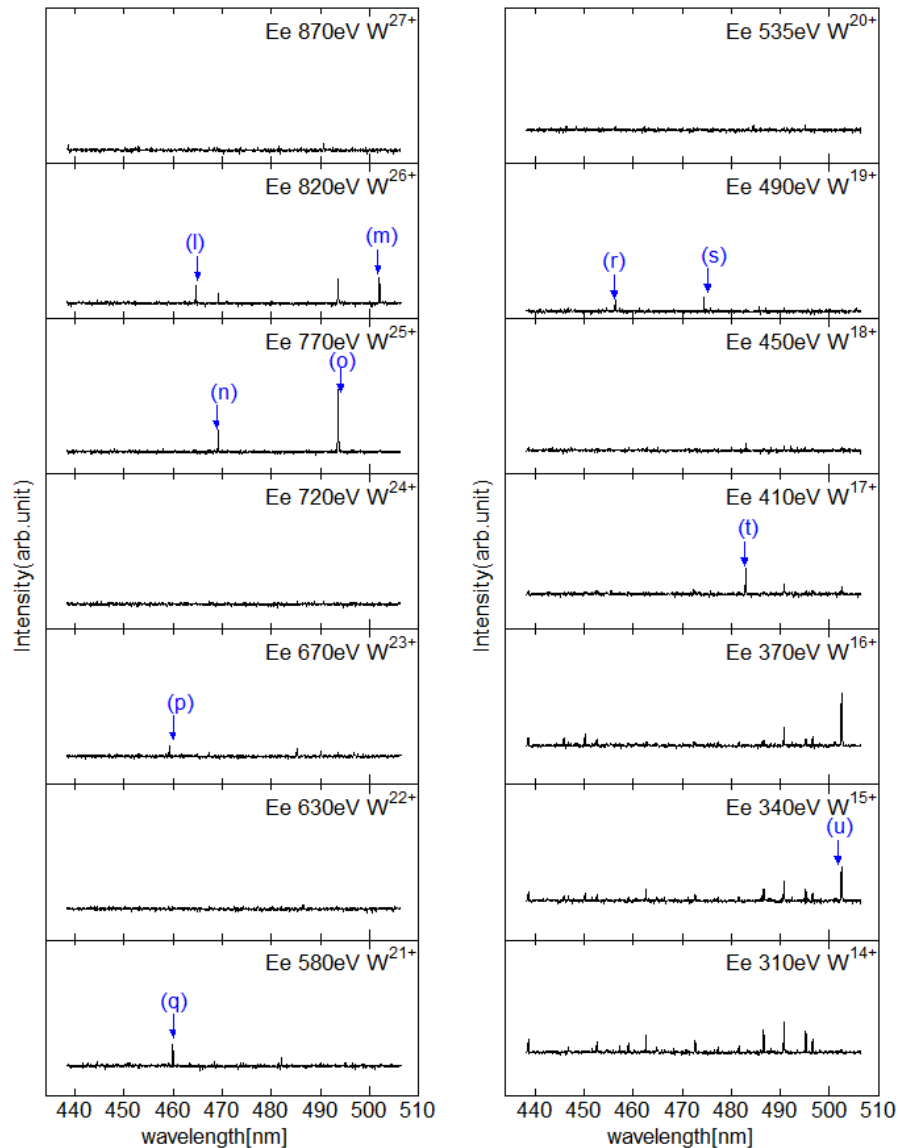


図 4 440-510nm 付近で観測されたタングステン多価イオンのスペクトル

#### 4. まとめと今後の展望

今回、CoBIT を用いてタングステン多価イオンを生成し、EUV 領域と可視領域で同時分光測定を行った。EUV 領域では 11 本の発光線を観測し、そのうち 9 本がタングステン多価イオンに帰属するものであると考えた。可視領域では 10 本の発光線を観測でき、その全てがタングステン多価イオンに帰属するものと考えた。今後の展望として、本研究で初めて観測されたスペクトルがあったので追試を行う予定である。また、今回測定できなかった波長範囲において、タングステン多価イオンの分光測定を試みる予定である。

#### 参考文献

- [1] <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER>
- [2] Nakamura et al., Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 063104