

# 真空紫外域におけるタングステン多価イオンの分光測定

中村信行研究室 稲留康太

## 1 背景

国際熱核融合実験炉 (ITER[1]、ラテン語で道を意味する "iter" に由来) は核融合の実用化を目指して現在フランスに建設中のトマカク型の熱核融合実験炉であり、トロイダルコイルとポロイダルコイルによる磁場によって超高温プラズマをドーナツ状に閉じ込める仕組みである。

プラズマを取り囲んでいるブランケットと呼ばれる対向壁の下に、プラズマからの高い熱流や粒子を受け止め、核融合反応によって生じるヘリウムをプラズマから排出する役割を持つダイバータと呼ばれる部分がある。ダイバータには非常に高い熱負荷がかかるため、タングステンが材料として使用される。それは、タングステンは融点が非常に高く、耐摩耗性があり、核融合の材料となるトリチウムの吸蔵度が低い等の特徴を持つからである。しかし、そのような特徴を持つタングステンでも、プラズマ中の不純物イオンの衝突によりスパッタリングを起こす。そして、スパッタを起こしたタングステンがプラズマに混入し不純物となることが考えられる。

不純物であるタングステンがプラズマ中に混入した場合、装置によって閉じ込め可能なイオンや電子の数は決まっているため、核融合に必要な水素同位体のプラズマを不純物の数だけ追い出してしまう。さらに、不純物とプラズマ内の粒子が衝突した際に起こる熱伝導によって熱損失を起こす上に、プラズマの高温によって電離した不純物多価イオンがプラズマの熱を電磁波放射で放出 (放射冷却) してプラズマの温度を下げてしまい、核融合の効率を下げる事が予想される。したがって、これを防ぐためにタングステンの流入経路や流入量を正確に把握し、プラズマ中にタングステンが混入しないように制御することが重要である。

タングステンイオンによる放射損失を抑えるためには、分光診断によってタングステンの流入経路や価数

分布を理解することが重要とされている。プラズマ内のタングステンイオンの価数分布はエッジ付近における中性から、コア付近におけるネオン様程度までに広がると考えられており、分光診断には広範囲の価数の分光データが必要である。図1と図2にアメリカ国立標準技術研究所 NIST のデータベース [2] に登録されているタングステン多価イオン発光線数を示す。

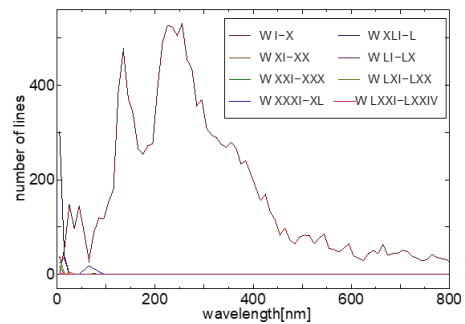


図 1: NIST データベース [2] に登録されているタングステン多価イオンの発光線数。

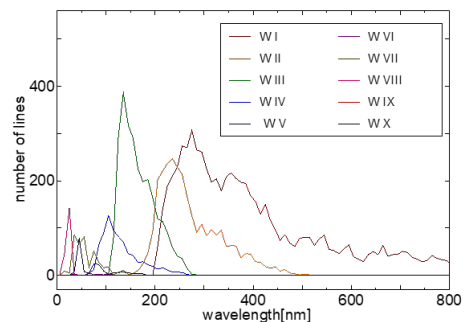


図 2: NIST データベース [2] に登録されている W I から W X までの発光線数。

横軸は波長、縦軸は発光線の数を示しており、10nm 毎の発光線の総数をプロットしている。図1のように分光診断に必要な分光データは現在不足しており、特に図2をみると、W I~W IV のデータ数は多いが W VIII 以上の価数の発光線は、40nm 以上の波長範囲でほとん

ど観測されていないことが分かる。したがって、そのデータの不足を補うためにタングステン多価イオンの発光線を観測、同定することが求められている。

よって、本研究の目的は、ITER のプラズマ診断に有用であるタングステン多価イオンの発光線を観測し、価数の同定や波長決定をすることである。そのために、特にデータ数が不足している 6 価から 13 価の真空紫外領域 (約 30~124nm) での発光線の観測を行った。

## 2 実験

本研究では、小型電子ビームイオントラップ (Compact EBIT : CoBIT) を用いて多価イオンを生成し、発光線を観測した。電子ビームイオントラップ (Electron-beam Ion Trap : EBIT) は多価イオンの研究のために開発された、電子銃とドリフトチューブ (Drift Tube : DT)、超伝導コイル、電子コレクターから構成される多価イオン生成装置であり [3]、CoBIT は EBIT 装置の一つである。

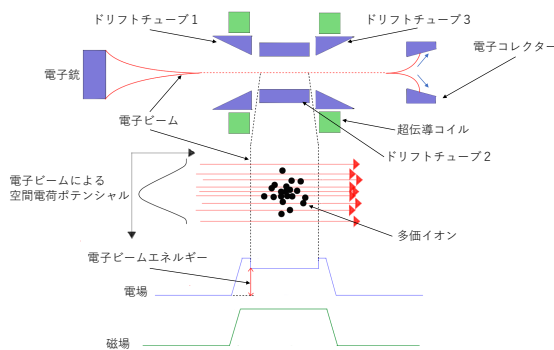


図 3: 電子ビームイオントラップの概略図。

図 3 に EBIT の概略図を示す。電子銃から生成された熱電子を DT 電極との電位差によって加速させ、気体として導入された試料原子と衝突させることで多価イオンを生成することが出来る (逐次電離)。電子銃から生成された電子ビームは、超伝導コイルによる軸方向の強磁場によって動径方向に圧縮され、DT 内部を通過した後に電子コレクターによって回収される。DT は 3 つの電極にわかれており、それぞれに任意の電圧を印可することが出来る。中央の電極の印可電圧を他の 2

つよりも低くすることで、軸方向の井戸型ポテンシャルを形成することが出来る。高真空中に保たれた EBIT 内に導入された中性の試料は、電子ビームにより電離しイオンになると、DT への印可電圧による井戸型ポテンシャルによって電子ビームの軸方向にトラップされる。また、DT 内部を通過する電子ビームの空間電荷ポテンシャルにより径方向にもトラップされ、三次元的にトラップされる。トラップされたイオンに電子ビームが衝突し続けることで、逐次電離を起こし多価イオンを生成する。また、逐次電離ではある一定のエネルギーを持つ電子を衝突させ続けることで目的の価数まで束縛電子を電離させることが出来る。

実験装置及び観測系の概略図を図 4 に示す。観測した波長域は可視領域と真空紫外領域であり、可視領域では 1 台の分光器を用いて発光線を観測し、真空紫外領域では 2 台の分光器を用いて発光線を観測した。本研究の可視領域発光線の分光には HORIBA 製の iHR550 分光器 [4] を使用した。また、回折格子は溝本数 150 本/mm の反射型回折格子を使用し、発光線の検出には CCD (Charge Coupled Device) カメラ (ANDOR iDus416Series) を用いた。iDus416Series は電子冷却型であり、 $-70^{\circ}\text{C}$  に検出面を冷却して使用した。

真空紫外領域では測定出来る波長領域が異なる 2 台の分光器を使用した。2 台の分光器はともに同様の光学配置の分光器である。真空紫外領域における発光線は大気中で吸収されてしまうため、分光器本体は CoBIT 本体と直接接続されており、真空度は  $\sim 10^{-6}\text{Pa}$  を維持した。また、光源は幅が数百  $\mu\text{m}$  と非常に小さく、線光源と見なすことが出来るため、スリットを用いることなく分光を行った。真空紫外領域の光は鏡面反射率が低いため、真空紫外領域分光器 A[5]、B[6] にはそれぞれ日立ハイテック社製の平面結像型不当間隔凹面回折格子 001-0659、001-0639 を用いた。凹面回折格子は集光と分散を同時に行うことができ、発光線の入射角を大きくすることで起こる全反射を利用することで入射光の反射効率を向上させている。

また、検出器に使用している CCD カメラ、位置検出素子 (Position Sensitive Detector : PSD) の受光面が平面であることから特定の波長範囲で平面結像となる、刻線が不当間隔である回折格子を採用した。真空紫外領域

分光器 A の受光器となる CCD カメラには Peinceton Instruments 社製の背面照射型 CCD カメラ (PIXIS-OX:400B) を使用し、CCD カメラ使用時は  $-70^{\circ}\text{C}$  まで電子冷却した。真空紫外領域分光器 B の受光器である PSD には Quantar Technology 社製の 2 次元 PSD (Model 3391) [7] を使用した。そして、本研究ではタングステン化合物であるタングステンヘキサカルボニルとして CoBIT 内に導入した。タングステンヘキサカルボニルは室温で十分な蒸気圧を持っているため、ガス導入管と CoBIT 本体を接続することで導入した。

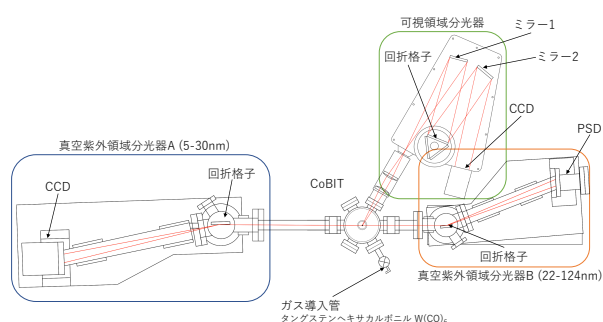


図 4: CoBIT と測定系。

### 3 結果と考察

#### 3.1 エネルギー依存性

CoBIT の電子ビームエネルギーが変動すれば、支配的に生成される多価イオンの価数も電子ビームエネルギーに依存して変化する。したがって、既知のタングステン多価イオン発光線と同様の電子ビームエネルギー依存性を示している発光線を探すことで、新たなタングステン多価イオン発光線の発見と価数の同定を行うことが出来る。

そこで、本研究の先行研究 [9] で観測された可視領域と真空紫外領域 (波長  $18\sim 27\text{nm}$ ) のタングステン多価イオン発光線を観測し、電子ビームエネルギー依存性を確認した。また、可視領域と波長  $27\text{nm}$  以下の真空紫外領域では 30 分間測定しており、長波長側の真空紫外領域では 1 つの波長領域を 15 分間測定した後分光器を移動し、もう一つの波長領域でまた 15 分間の測

定を行った。そして、CoBIT の電子ビームエネルギーは表 1 のタングステンのイオン化エネルギーの値を参考に設定した。

表 1: タングステンのイオン化エネルギー [8]。

W イオンの価数	イオン化エネルギー (eV)
$\text{W}^{5+} \rightarrow \text{W}^{6+}$	64.77
$\text{W}^{6+} \rightarrow \text{W}^{7+}$	122.0
$\text{W}^{7+} \rightarrow \text{W}^{8+}$	141.2
$\text{W}^{8+} \rightarrow \text{W}^{9+}$	160.2
$\text{W}^{9+} \rightarrow \text{W}^{10+}$	179.0
$\text{W}^{10+} \rightarrow \text{W}^{11+}$	208.9
$\text{W}^{11+} \rightarrow \text{W}^{12+}$	231.6
$\text{W}^{12+} \rightarrow \text{W}^{13+}$	258.3
$\text{W}^{13+} \rightarrow \text{W}^{14+}$	290.7

図 5 は本研究で得られた真空紫外領域 (波長  $28\sim 124\text{nm}$ ) でのタングステン多価イオン発光線である。図中の発光線の右肩には電子ビームエネルギーと支配的に生成される価数が表されており、図中の矢印で示された発光線が、支配的に生成されている価数のイオンに由来する発光線である。図 5 と同様の波長範囲での共同研究者 Priti 氏による衝突輻射モデル計算を図 6 に示す。

これらの図を見比べると、実験では  $50\sim 70\text{nm}$  の波長範囲で  $\text{W}^{6+}\sim\text{W}^{8+}$  に帰属する発光線が確認できるが、計算ではその範囲で発光線は確認できない。そこで  $\text{W}^{8+}$  に注目し、図 7 に  $\text{W}^{8+}$  の観測を目的として電子ビームエネルギー  $130\text{eV}$  で同時に測定された  $24\sim 27\text{nm}$  と  $48\sim 54\text{nm}$  の発光線を示す。

図 7 の  $25\sim 26\text{nm}$  あたりの印の付いた発光線の 2 次光が  $50\sim 53\text{nm}$  あたりの発光線として観測されたと思われる。発光線が 2 次光として現れる場合、その発光線の波長の 2 倍の波長となって現れる。しかし、図 7 の発光線の波長の 2 倍よりも少し波長の長い 2 次光が観測された。これは真空紫外領域分光器 A で観測されたスペクトルは発光線による波長校正ではなく、計算による簡易的な波長校正を行ったことによる  $25\sim 26\text{nm}$  あたりの発光線の波長のずれが原因であると考えられる。続いて図 8 に  $28\sim 31\text{nm}$  と  $56\sim 62\text{nm}$  の波長範囲

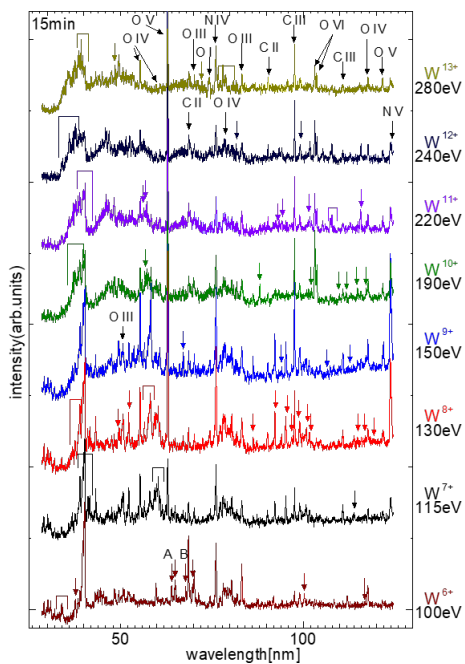


図 5: 真空紫外領域 (波長 28~124nm)。

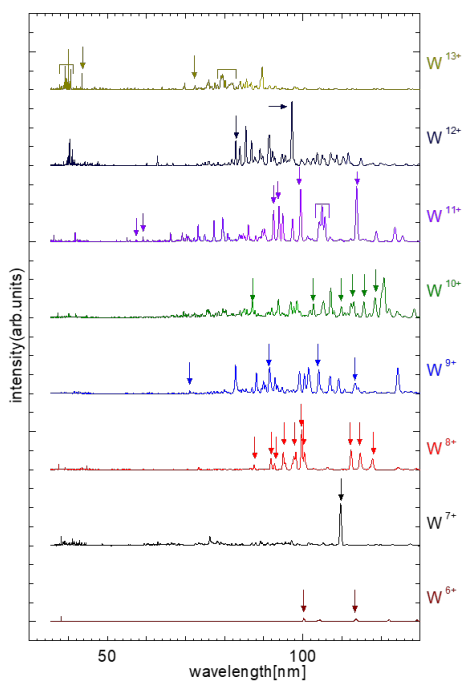


図 6: 真空紫外領域の衝突輻射モデル計算。

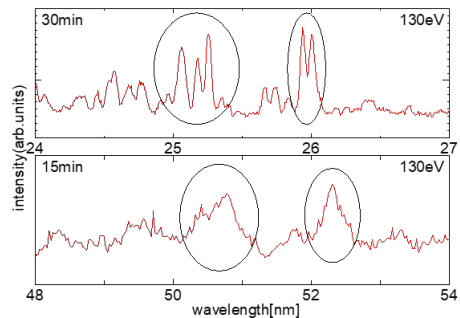


図 7: 24~27nm の発光線の 2 次光。

で観測された発光線を示す。

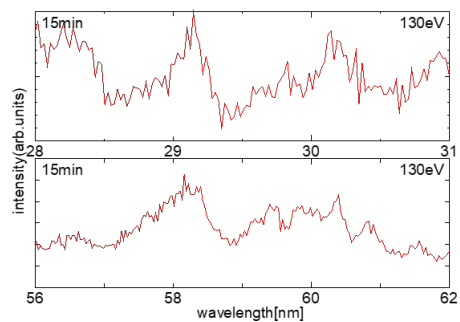


図 8: 28~31nm の発光線の 2 次光。

図 8 の 2 つの波長範囲はそれぞれ別日に観測されたが、発光線の形が似ており、波長も一致していることから 28.5~30.5nm で観測された発光線が 2 次光として 57~61nm の波長範囲で観測されたと考えられる。また、同様にして図 9 に同時に 18~22nm と 36~44nm の波長範囲で観測された発光線を示す。

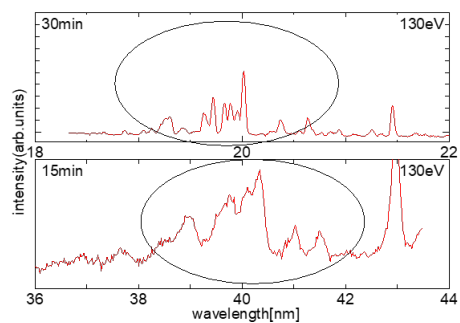


図 9: 18~22nm の発光線の 2 次光。

図9は図7と同様に18~22nmの波長範囲の発光線を真空紫外領域分光器Aを用いて観測したため、簡易的な波長校正を行っており、波長のずれが少し生じているが、発光線の形状が似ており、19~21nmあたりの印の付いた発光線の2次光が38~42nmあたりの発光線として観測されたと思われる。また、この波長領域ではW<sup>8+</sup>のみならず、W<sup>7+</sup>~W<sup>12+</sup>の発光線も同様に2次光として観測されていると考えられる。さらに、64~70nmのW<sup>6+</sup>の発光線については、図5中の印をつけた発光線A、Bが大石氏らの研究[10]で観測されたW<sup>5+</sup>の発光線と類似していることから、低価数の多価イオンに帰属する発光線が観測されたものではないかと考える。

また、本研究で確認出来た発光線は計算によるものに比べると少なくなっている。これは酸素や炭素等の不純物多価イオンの発光線が強く、タングステンに帰属する発光線がそれらによって隠されてしまったことが原因であると考えられる。

### 3.2 長時間測定 (波長 94~118nm)

タングステン多価イオン発光線の波長を同定するために、これまでの実験で比較的多くの発光線を観測することが出来た波長94~118nmで30分間の測定を行った。また、波長校正の精度を向上させるために二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を実験後に導入し、炭素と酸素の発光線を校正線として用いた。真空紫外領域(波長94~118nm)の測定結果を図10に示す。

続いて、図10で本研究で初めて観測されたタングステン多価イオン発光線の波長を表2に示す。また、波長不確かさはすべての発光線で0.11nmとなった。波長の不確かさ $\Delta\lambda$ は、観測された発光線の統計不確かさによって生じるフィッティング時の不確かさ $\Delta\lambda_{\text{statistic}}$ 、測定データのch数を変換した際の文献値と測定値に生じる不確かさ $\Delta\lambda_{\text{fitting}}$ 、分光器の不安定さによって生じる不確かさ $\Delta\lambda_{\text{position}}$ から

$$\Delta\lambda = \sqrt{(\Delta\lambda_{\text{statistic}})^2 + (\Delta\lambda_{\text{fitting}})^2 + (\Delta\lambda_{\text{position}})^2}$$

によって求めた。

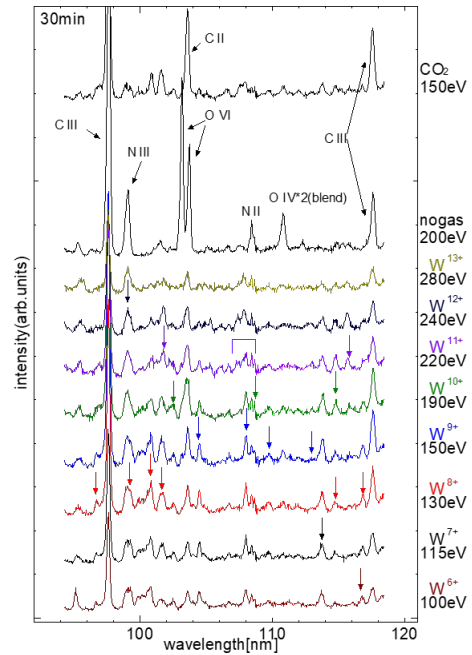


図10: 真空紫外領域(波長94~118nm)。

表2: 本研究で初めて観測されたタングステン多価イオンの発光線の波長。

価数	波長 (nm)	不確かさ $\Delta\lambda$ (nm)		
W <sup>6+</sup>	116.77	0.11		
	W <sup>7+</sup>	189.72	0.11	
		W <sup>8+</sup>	96.76	0.11
			99.26	0.11
			100.81	0.11
			100.84	0.11
114.76			0.11	
116.85	0.11			
W <sup>9+</sup>	104.51	0.11		
	108.01	0.11		
	109.74	0.11		
	113.00	0.11		
W <sup>10+</sup>	102.50	0.11		
	108.65	0.11		
	114.81	0.11		
W <sup>11+</sup>	101.76	0.11		
	107.42	0.11		
	107.87	0.11		
	115.67	0.11		
W <sup>12+</sup>	99.11	0.11		

## 4 結論

本研究では、小型電子ビームイオントラップを用いて ITER のプラズマ診断に有用である真空紫外領域 (波長 28~124nm) での  $W^{6+}$ ~ $W^{13+}$  の発光線を観測し、価数の同定を行った。さらに、波長 94~118nm での  $W^{6+}$ ~ $W^{12+}$  の発光線の波長を同定することが出来た。一方で、観測できた発光線は衝突輻射モデル計算に比べると少なく、観測出来ない発光線がまだ残っていることも考えられる。

今後の展望として、真空紫外領域でのさらに高価数のタングステン多価イオンの観測や、タングステンを直接 CoBIT に導入することで不純物イオンを少なくした測定、高分解能回折格子を用いた精度の高い観測等が挙げられる。

酸素や炭素等の不純物のすくないタングステンの導入方法については、新たな導入方法として CoBIT に e-flux とよばれる試料金属に電子を衝突させることで試料金属を蒸発させることのできる装置が取り付けられており、この装置を用いることで化合物であるタングステンヘキサカルボニルを用いることなく、タングステンを単体として CoBIT に導入することが出来る。この導入方法を用いることで、不純物多価イオンによる発光線の少ない測定を行うことができ、本研究で観測することの出来なかったタングステン多価イオン発光線が観測できると考えられる。

## 参考文献

- [1] ITER ホームページ  
<http://www.iter.org/>
- [2] NIST Database  
[https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
- [3] 大谷俊介, 「科学技術振興機構国際共同研究事業 追跡評価用資料 (追跡調査報告書) 多価冷イオンプロジェクト (1997 ~ 2001)」
- [4] HORIBA IHR シリーズ ウェブサイト  
<https://www.horiba.com/jp/scientific/products-jp/detectors/details/ihr320-imaging-spectrometer-198/>
- [5] H. Ohashi, H. A. Sakaue, and N. Nakamura, Phys. Scr. 2013 [T156],014013 (2013).
- [6] Nobuyuki Nakamura, Naoki Numadate, and Hiroyuki A. Sakaue, J. Phys. Soc. Jpn 90, 114301 (2021)
- [7] QUANTAR TECHNOLOGY 3300 SERIES OPEN-FACE MCP/RAE SENSORS INSTALLATION AND MAINTENANCE MANUAL
- [8] NIST Database  
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/ionEnergy.html>
- [9] 三田百恵氏 修士論文 (2017) 電気通信大学
- [10] Tetsutarou Oishi, Shigeru Morita, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hiroyuki A. Sakaue, Yasuko Kawamoto, Tomoko Kawate and Motoshi Goto, Atoms 2021, 9, 69 (2021)