# タングステン多価イオン発光線の観測

中村信行研究室 氏名: 簑島 真希

平成25年3月8日

#### 1. 背景と目的

2020年の運転開始を目指して建設が進 められている国際熱核融合実験炉 ITER で は、プラズマ対向壁やダイバータの材料で あるタングステンのプラズマへの流入量や 流入経路を分光診断により正確に把握し、 制御することが重要である。しかしながら、 分光診断に必要なタングステン多価イオン の分光データは極めて不足している状態に ある。本研究では、対象とするタングステ ン多価イオンの価数に応じて、Tokyo-EBIT [1]および CoBIT[2]と呼ばれる 2 台の電子 ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) を用いて、可視領域における タングステン多価イオンの分光データを広 範な価数にわたって蓄積し、ITER におけ る将来のプラズマ診断に貢献することを目 的としている。

## 2. タングステン多価イオンの可視ス ペクトル測定

【実験装置】

可視スペクトル測定をするための実験装 置の配置図を図1に示す。

試料には、減圧化で容易に昇華するタン グステンヘキサカルボニルW(CO)6を用い た。W(CO)6は可変リーク弁を用いて CoBIT へ導入し、電子ビームの衝突により W(CO)6分子から解離したタングステンは、 逐次電離により多価イオンとなって発光す る。観測ポートの窓を通過した光は両凸レ ンズにより、分光器のスリットに集光され る。分光器は反射型平面回折格子を用いて おり、その配置として Czerny-Turner マウ ントを採用している。



図1 可視分光測定の配置図

【スペクトルのエネルギー依存】

本研究では、過去に報告例のない未同定 発光線を対象としてスペクトル測定を行い、 電子ビームエネルギーに対する依存性を調 べることで、その発光線のイオンの価数を 同定した。例として、過去に CoBIT を用い て得られたスペクトルを図 2 に示す[3]。図 中、左側に記したのはスペクトルを得た際 の電子ビームエネルギーと、そのエネルギ ーで生成されるタングステン多価イオンの 最高価数である。また、W<sup>12+</sup>と W<sup>13+</sup>を生成 するために必要なイオン化エネルギーを共 に示す。 例えば、この例で示されているように、 電子ビームエネルギーを220eVから250eV に上げると、497[nm]付近に新たに発光線 が現れる。このとき、W<sup>11+</sup>のイオン化エネ ルギーが231.6eVであることを考慮すると、 この発光線はW<sup>12+</sup>のものと同定すること ができる。同様に、電子ビームエネルギー を250eVから280eVに上げた際に現れた 495[nm]付近の発光線はW<sup>13+</sup>のものと同定 できる。このような同定法の有効性につい ては、過去の実験[4]により確かめられてい る。



図2 過去に CoBIT で得られたスペクトル

【W<sup>26+</sup>とW<sup>27+</sup>の測定】

電子ビームエネルギーを 770,880,1050, 1100,1200eV に変化させ、W<sup>27+</sup>の <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→ <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>遷移および、W<sup>26+</sup>の <sup>3</sup>H<sub>5</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>遷移を 観測した実験結果が上海 EBIT グループの Z.Fei らにより 2012 年に報告された[5]。

上記で記したように、W<sup>25+</sup>のイオン化エ ネルギーが 784.4eV、W<sup>26+</sup>のイオン化エネ ルギーが 833.4eV であることを考慮すると、 W<sup>26+</sup>と W<sup>27+</sup>の発光線はそれぞれ電子ビー ムエネルギーが 784.4eV、833.4eV を超え たところで現れるはずである。しかし、 Z.Fei らの報告によると、W<sup>27+</sup>の発光線に ついては電子ビームエネルギーが 1050eV のとき初めて現れており、電子ビームエネ ルギーが880eVのときには観測できていな い。そのため、本研究ではこの矛盾を確か めるために、電子ビームエネルギーを 780eV-1100eVまでより細かく変化させ、 追試実験を行った。その結果を図3に示す。



図3 W<sup>26+</sup>とW<sup>27+</sup>の発光線観測を目的とし た電子ビームエネルギー依存スペクトル

図中の赤色の矢印は W<sup>26+</sup>、青色の矢印は W<sup>27+</sup>の発光線をそれぞれ示している。矢印 で示した発光線について波長を求めた結果 および、過去に報告されている実験値と理 論値を表1にまとめた。

表1 W<sup>26+</sup>と W<sup>27+</sup>の発光線の波長

	W <sup>26+</sup> [nm]	W <sup>27+</sup> [nm]
Present	389.64	337.83
Previous	$389.41 \pm 0.06$	$337.743 \pm 0.026$
	[6]	[5]
Theory	388.434 [7]	338.180 [5]

W<sup>26+</sup>では 830eV、W<sup>27+</sup>では 880eV とい ずれも、イオン化エネルギーを超えた電子 ビームエネルギーのところで、それぞれの 発光線が現れており、Z.Fei らの同定が正し いことが確認できた。このとき、波長の値 に差が大きいのは、今回の測定における波 長決定が外挿となっており、誤差が大きい ためと思われる。

【未同定発光線の波長決定】

本研究では、500nm-560nm の波長領域 について W<sup>14+</sup>-W<sup>27+</sup>を対象に、未同定発光 線の波長決定を目的としたスペクトル測定 を行った。測定したスペクトル結果を図 4,5 に示す。



図4 W<sup>14+</sup>-W<sup>21+</sup>のスペクトル測定結果



図5 W<sup>21+</sup>-W<sup>27+</sup>のスペクトル測定結果

測定した波長領域(500-560[nm])にお いて、14本の未同定発光線を観測すること ができた。そのうち、緑色の矢印で示した 7本の発光線について波長決定を行い、そ の結果を表2にまとめた。

表2 観測されたタングステン多価イオンの可視領域遷移波長

価数	波長[nm]
$W^{15+}$	539.60
$W^{19+}$	542.81
$W^{21+}$	534.24
$W^{23+}$	534.01
$W^{24+}$	528.14
$W^{25+}$	521.73
$W^{26+}$	501.96

#### 3. 遷移寿命測定

EBITでは、強磁場で圧縮した電子ビー ムの空間電荷によりイオンをトラップする が、電子ビームを遮断した後も、軸方向の 強磁場によりイオンをある程度の時間トラ ップし続けることが可能である。電子ビー ムを遮断し磁場のみによるトラップになる と、電子衝撃による電離や励起も起こらな くなるため、その後の発光強度の減衰を観 測することで遷移寿命を測定することが可 能である。CoBITでは、磁場のみでのトラ ップを行うのに十分な磁場強度がないため、 より高い磁場を発生することのできる Tokyo-EBITを用いて、遷移寿命の測定を 行った。遷移寿命測定の配置図を図6に示 す。



図6 遷移寿命測定の配置図

干渉フィルターを用いることで、電子ビ ームで生成されたイオンからの発光のうち、 測定対象の波長帯のみを通すようにした。 干渉フィルターを通った光は、光電子増倍 管(Photomultiplier Tubes: PMT)に入射 させ、PMT からの電気信号はプリアンプと アンプによって増幅させる。増幅された信 号をシングルチャンネルアナライザ

(Single Channel Analyzer : SCA) を用い てノイズ信号と分離し、マルチチャンネル アナライザ (Multi Channel Analyzer : MCA) にてそれらを積算する。

また、分光器によるスペクトル測定を同 時に行うことで、フィルターの透過波長域 内に他の遷移による発光が含まれていない ことを確認しながら測定を行った。

【実験装置と評価の方法】

今回立ち上げた測定装置と測定方法を評価するために、過去に報告例のある Ar<sup>13+</sup>

(<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>-<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>)における発光線の遷移寿命測 定を行った。図7に測定結果を示す。



図7 Ar<sup>13+(2</sup>P<sub>3/2</sub>-2P<sub>1/2</sub>)の遷移寿命測定結果

今回の測定値と過去に報告されている測 定値の比較を図8で示した。赤色で示した データは今回の測定値であり、黒色で示し たデータは過去に報告されている測定値で ある。Heidelberg[8], LLNL[9], NIST[10] はいずれも EBIT を用いて測定されたもの であるが、一番右のデータは Kingdon Trap[11]を用いて測定されたものである。

この結果から、過去の測定値を再現して いることが確認できた。





【時間分解能測定】

EBIT による測定では、電子ビームを遮 断する時定数などにより ns のような短寿 命遷移の測定は困難であるが、数 10μs から ms 程度の寿命を持つ遷移には有用である とされている。

この装置の遷移寿命測定における時間分 解能を評価するために、酸素を EBIT 内に 導入し、遷移寿命の短い E1 遷移の寿命測 定を行った。通常、DT1 と DT3 を DT2 よ りも高い電圧をかけることにより多価イオ ンをトラップするが、今回は DT1 と DT3 を DT2 よりも低い電圧にすることで多価 イオンをトラップできないようにした。そ の結果を図 9 に示す。



図 9 時間分解能測定結果

図7にあるように、アルゴンの測定では 減衰曲線を描いていたが、今回のように遷 移寿命が短い酸素の発光では、電子ビーム を遮断した瞬間に脱励起していることがわ かる。この測定は、1ch あたり 25[µs]で行 っており、装置の時間分解能は測定対象で ある ms 程度より十分小さいことが確認で きた。 【W52+の遷移寿命測定】

次世代のトカマク型核融合プラズマでは、 高電子密度で高電子温度  $T_e \ge 10 \text{keV}$  で作動 すると予想されている。そのため、Feldman [12]らは電子温度が 10 keV 程度の高温プラ ズマにおいてプラズマ診断に使うことがで きる可視領域の発光線を理論的に探索した。 彼らは、イオン化エネルギーが 5-10 keV程度の多価イオンの基底状態微細構造間遷 移の発光線の中から、250 nm 以上の波長領 域に現れ、崩壊分岐比が大きく十分な発光 強度を得られる発光線を探した。そのよう な条件を満たす遷移として彼らはチタン様 多価イオンの( $3d_4$ ) $^5D_2 - ^5D_3$ 遷移を見出し た。本研究では、この遷移を対象に寿命測 定を行った。その結果を図 10 に示す。



電子ビーム遮断後の減衰曲線から遷移寿 命を求めた結果、0.71±0.04[ms]となった。

この遷移寿命に対する理論値を表3に示す。

#### 表3 W<sup>52+</sup>に対する遷移確率の理論値

Feldman(th)[12]	0.593[ms]
Beck(th)[13]	0.677[ms]
Kato(th)[14]	0.705[ms]
Present(ex)	$0.71 \pm 0.04$ [ms]

ここで、 $W^{52+}$ のエネルギー準位は図 11 のようになっている。このとき、 $\Delta J$ にお ける選択則 $\Delta J=0,\pm 1$ を考慮すると、図 11 のように J=3準位は J=2,4 いずれの準位に も遷移が可能である。そのため、今回測定 した遷移寿命は J=2-3, J=4-3の両遷移 の合計での遷移寿命であったと考えられる。 表 3 の理論値はこのことを考慮したもので ある。



### 4. 結論と今後の課題

本研究では、ITER での将来のプラズマ 診断に貢献するために、タングステン多価 イオンの分光測定を行った。

可視領域のスペクトル測定においては、 上海 EBIT を用いて得られた W<sup>27+</sup>における 発光線について追試実験を行い、Z.Fei らの 同定が正しいことが確認できた。さらに、 500-560[nm]の波長領域において、W<sup>14+</sup> -W<sup>27+</sup>のタングステン多価イオンからの未 同定の発光線を確認し、その中から7本の 発光線についてイオンの価数と波長を決定 することができた。

遷移寿命測定では、プラズマ診断に有効 とされるチタン様タングステン多価イオン の遷移寿命測定を行った。その結果、J=2 -3,J=4-3の両遷移を考慮することで、既 に報告例のある理論値と近い値であること が確認できた。

今後は、スペクトル測定において、追試 を行うともに、可視領域のより長波長側な ど、まだ観測の行われていない部分につい ても引き続き観測を行っていく予定である。 また、遷移寿命測定においては、他の価数 についても測定し、より多くの遷移確率の データを蓄積する必要がある。

### 参考文献

- [1] F.J.Currell et al., J.Phys.Soc.Jpn.,<u>65</u> 10 (1996)
- [2] N. Nakamura et al., Rev.Sci.Instrum, 79 063104 (2008)
- [3] 左古田氏修士論文 電気通信大学
- [4] N. Nakamura et al., Rev.Sci.Instrum, 79 063104 (2008)
- [5] Z. Fei et al., Phys Rev A, <u>86</u>062501 (2012)
- [6] Akihiro KOMATSU et al., Plasma and Fusion Research, <u>7</u> 1201158 (2012)
- [7] to be published Physica Scripta
- [8] A. Lapierre et al., Phys Rev Lett, 95 183001 (2005)
- [9] E.  $T_{R\bar{A}BERT}$  et al.,  $T_{HE}A_{STROPHYSICAL} J_{OURNAL}$ , 541:506-511 (2000)

[10] F G Serpa et al., J.Phys. B, <u>31</u> 3345 (1998)

- [11]D. P. Moehs et al., Phys Rev A, 58 1111 (1998)
- [12] U. Feldman, J. Opt. Soc. Am. B 8 3 (1991)
- [13] D.R. Beck, Phys. Rev. A 60 3304 (1999)
- [14] D. Kato, J. Chin. Chem. Soc. <u>48</u> 525 (2001)