

# タングステン多価イオンの発光過程の研究

中村信行研究室

氏名:寺西若葉

平成 31 年 3 月 8 日

## 1. 背景と目的

現在フランスで建設中である国際熱核融合実験炉 ITER では、プラズマ中の粒子流を制御するプラズマ対向壁（ダイバータ）の材料にタングステンを用いることが予定されている。その理由として、タングステンは高い融点をもちプラズマの熱に耐えられること、核融合の燃料となるトリチウムを吸蔵しにくいことが挙げられる。しかしながら、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がある。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。しかし、波長や発光寿命などの原子データが不足しているため、具体的な診断計画を確立することができていないのが現状である。そのため、タングステン多価イオンからの発光線を系統的に探索・同定し、波長や遷移寿命などの基礎データを蓄積することが今強く求められている。本研究ではまず、電子ビームイオントラップ(Tokyo-EBIT) [1]を使って、52 価のタングステン多価イオンの基底状態微細構造準位間磁気双極子遷移の発光寿命測定を行った。実験では、まず電子ビームによる逐次電離により 52 価イオンを生成、

トラップした。その後電子ビームを止め、ペニングトラップの原理でイオンをトラップし、発光強度の時間変化を観測した。発光強度の減衰から寿命を測定することが出来る。また、Flexible atomic code : FAC)と呼ばれるコードを用いて計算した理論値と実験値を比較した。

## 2. 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。電子ビームを遮断することで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。本研究では Tokyo-EBIT を用いて遷移寿命の測定を行った。実験の測定系を図 1 に示す。

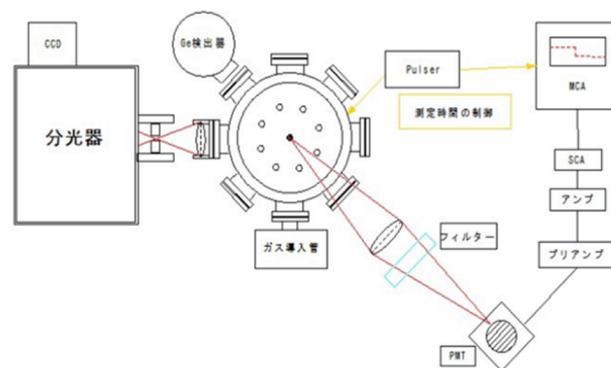


図 1:測定系

干渉フィルターを通った多価イオンからの発光を、光電子増倍管 (Photomultiplier Tubes : PMT) に入射させ、PMT からの電気信号を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) に入力する。ここで、PMT は R4220P (浜松ホトニクス製)、暗電流 : 0.2[nA]、暗計数 : 10[s<sup>-1</sup>]を用いている。また、分光器によるスペクトル測定を同時に行うことで、他の遷移による発光の寄与がないことを確認しながら測定を行った。

#### [スペクトル測定]

遷移寿命測定では、図 1 にあるように干渉フィルターを用いている。干渉フィルターは特定の対象の波長域のみ透過することができる。

図 2 に、分光器により測定した W<sup>52+</sup> のスペクトルを示す。

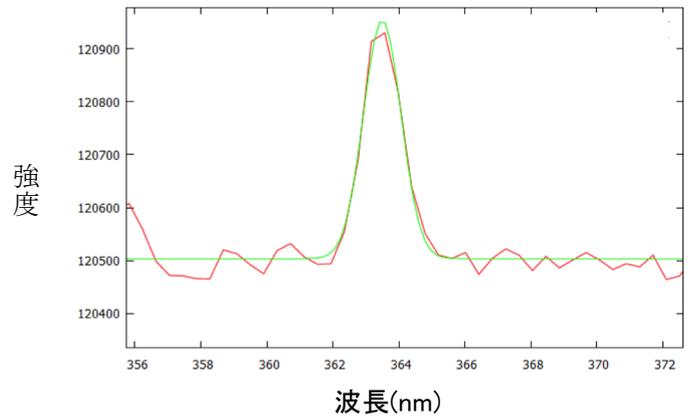


図 2: W<sup>52+</sup> (3d<sup>4</sup>)<sup>5</sup>D<sub>2</sub>-(3d<sup>4</sup>)<sup>5</sup>D<sub>3</sub>遷移に対するスペクトル

今回の遷移寿命測定では、半値幅が 11 nm のフィルターを使用した。図 2 からわかるように、その範囲内に他の発光線による寄与がないことが確認できた。

#### [アルゴンの発光寿命測定]

まずは動作確認を含め、過去に報告例のある、13 価のアルゴンの遷移寿命測定を行った。

図 3 にその結果を示す。

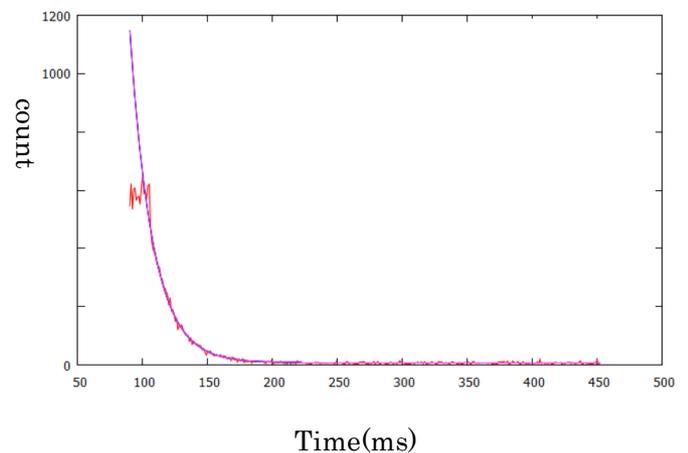


図 3: Ar<sup>13+</sup> (<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub> - <sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>) の遷移寿命測定結果

遷移寿命は 8.86ms となった。表 1 に今回の実験と過去の実験値を比較したものを示す。本実験で得られた遷移寿命の値を含め、既に報告されている値には少しばらつきがあるが、おおよそ一致していることがわかる。

表 1: Ar<sup>13+</sup>における磁気双極子遷移の遷移寿命に関する今回の実験値と過去の実験値との比較

	寿命[ms]
LLNL[2]	9.70
Kingdon[3]	9.12
NIST[4]	8.77
Heidelberg[5]	9.50
Present	8.86

[タングステンの発光寿命測定]

続いて、目的とするW<sup>52+</sup>の磁気双極子遷移に対する寿命測定を行った。その結果を図4に示す。

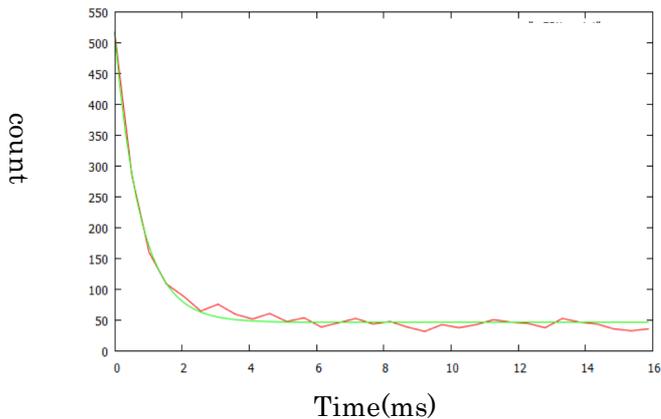


図 4: W<sup>52+</sup> (3d<sup>4</sup>)<sup>5</sup>D<sub>2</sub>-(3d<sup>4</sup>)<sup>5</sup>D<sub>3</sub>の遷移寿命測定結果

これより遷移寿命は 0.758ms となった。また、実験値と理論値を比較したものを表 2 に示す。

表 2: W<sup>52+</sup> における磁気双極子遷移の遷移寿命に関する今回の実験値と過去の実験値との比較

	寿命[ms]
Feldman[6]	0.593
Beck[7]	0.677
Kato[8]	0.705
Present	0.758

J=2-3、J=4-3 の両遷移を考慮し、遷移確率の和を求めた結果を表 3 に示す。

表 3: 遷移確率の実験値と理論値との比較

	J=2(/s)	J=4(1/s)	両遷移の合計
present	-	-	1316
Feldman[6]	263	1424	1687
Beck[7]	246	1231	1477
Kato[8]	244	1174	1418
FAC(present)	263	1433	1696

Present が今回の実験、FAC(present)が FAC で計算した値となり、若干のずれが見られ、遷移確率が小さくなっている。

このため、TokyoEBIT を使ってほかの価数の遷移寿命についても議論していく必要がある。

3.未同定発光線の同定

これまで研究室では多くの低価数タングステン多価イオンの発光線が観測されてきたが、ほとんどの発光線の遷移が未同定のままである。そこで、今回は FAC を用いて衝突輻射モデルによるスペクトルの計算を行い、観測された低価数タングステン多価イオン発光線の遷移同定を試みた。

衝突輻射モデルでは励起や脱励起のレートから各準位の占有密度を計算し、発光線強度を得る。

今回はW<sup>7+</sup>とW<sup>6+</sup>に絞って、FAC で理論計算をし、遷移同定を行った。また計算結果と比較するためにスペクトル測定の追試を行った。

図 5~図 8 にはそれぞれの計算結果、表 4~表 7 にそれぞれの計算結果を記載した。図 5、6 はそれぞれ  $W^{6+}$ 、 $W^{7+}$  の遷移の  $gA$  値、図 7、8 はそれぞれ衝突輻射モデルで求めた  $W^{6+}$ 、 $W^{7+}$  のスペクトルを示している。

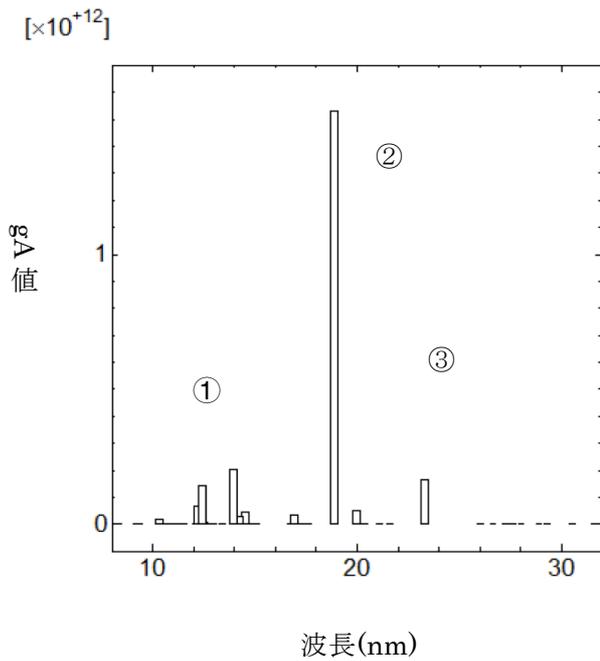


図 5:  $W^{6+}$  波長と  $gA$  値の関係

表 4:  $W^{6+}$  の主な遷移の波長と  $gA$  値、始状態と終状態

波長 (nm)	$gA$ 値 (/s)	始状態	終状態
① 13.9	1.97E+11	$5s^2 5p^5 6d^1$	$5s^2 5p^6$
② 18.9	1.52E+12	$5s^2 5p^5 5d^1$	$4f^{13} 5s^2 5p^6 5d^1$
③ 23.2	1.59E+11	$5s^2 5p^5 5d^1$	$4f^{13} 5s^2 5p^6 5d^1$

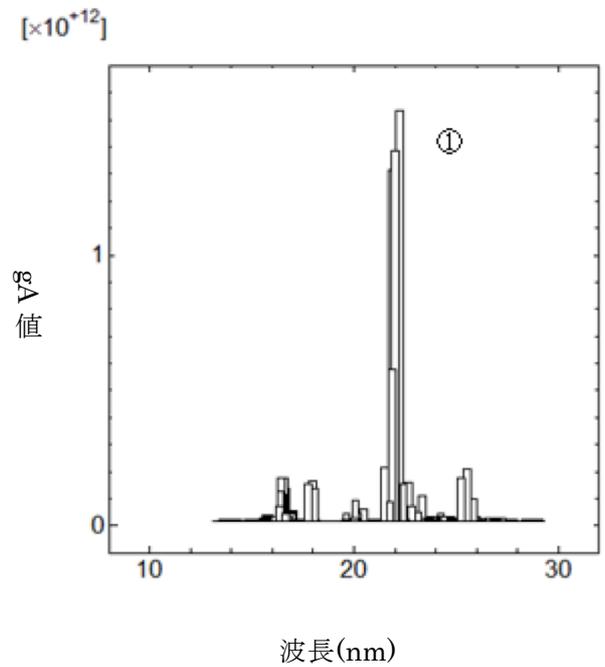


図 6:  $W^{7+}$  波長と  $gA$  値の関係

表 5:  $W^{7+}$  の主な遷移の波長と  $gA$  値、始状態と終状態

波長 (nm)	$gA$ 値 (/s)	始状態	終状態
① 17.7	1.25E+12	$4f^{13} 5s^2 5p^5 5d^1$	$5s^2 5p^5$

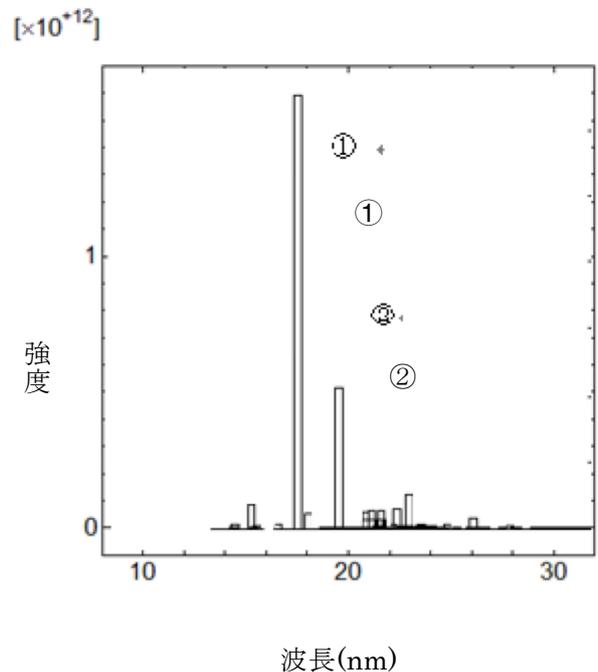


図 7:  $W^{6+}$  波長と強度の関係

表 6:  $W^{6+}$ の主な遷移の波長と強度、始状態と終状態

波長 (nm)	強度	始状態	終状態
① 18.8	6.50E-01	$4f^{13}5s^25p^65f^1$	$5s^25p^6$
② 23.2	2.11E-01	$4f^{13}5s^25p^65f^1$	$5s^25p^6$

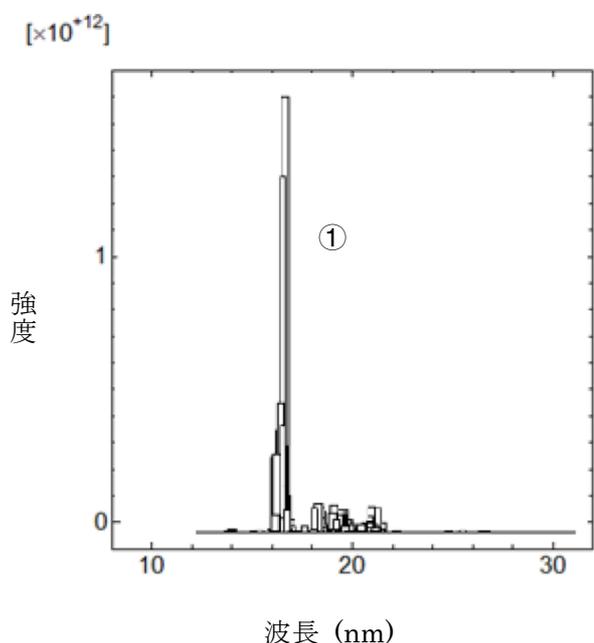


図 8:  $W^{7+}$ 波長と強度の関係

表 7:  $W^{7+}$ の主な遷移の波長と強度、始状態と終状態

波長 (nm)	強度	始状態	終状態
① 18.5	3.80E-00	$4f^{12}5s^25p^65d^1$	$4f^{13}5s^25p^6$

[追試試験]

タングステンの極端紫外域の遷移について CoBIT を用いてスペクトル測定を行った。試料はタングステンヘキサカルボニル  $W(CO)_6$  を用いた。波長較正線は  $Fe(C_5H_5)_2$  を利用した。表 8 に波長較正線、表 9 に試料の性質を示す。

表 8: 波長較正線[9]

	波長 [nm]
フェロセン	18.8994 19.5119 21.9305
$Fe(C_5H_5)_2$	25.3941 26.7889 27.5208

表 9: 試料[10]

	$W(CO)_6$
外観等	無色結晶性粉末
融点	~150 °C
蒸気圧	67 °C / 1.4 hPa
密度	2.65 g / cm <sup>3</sup> at 20 °C

結果を図 9 に示す。

[

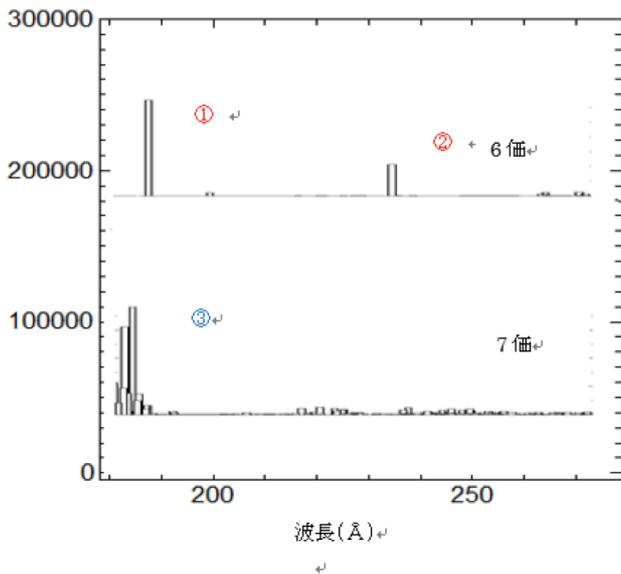
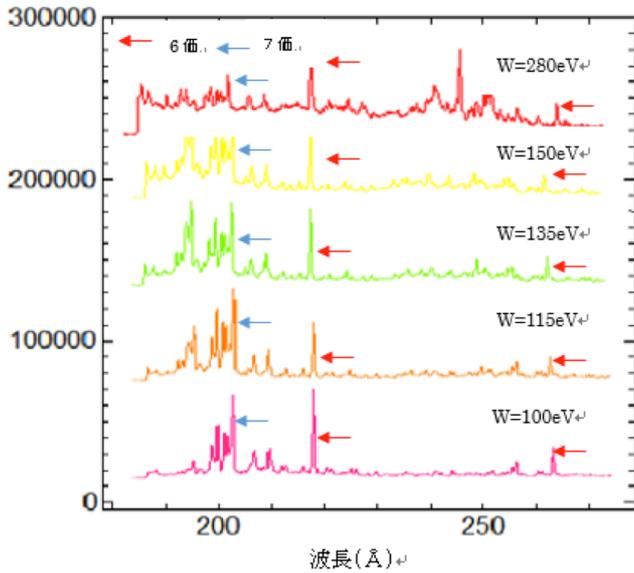


図 9: 18-27nm 領域のタングステン多価イオンと FAC 計算比較

下の図は衝突輻射モデルによる計算スペクトルを示している。6 価、7 価のスペクトルについてずれは見られるものの位置関係は適しているといえる。

#### 4. まとめ

(i)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。

(ii)遷移寿命測定では、本研究で使用した装置と測定方法を元にタングステン 52 価の可視域磁気双極子遷移寿命を測定した。

(iii)また、未同定のタングステン多価イオンの発光線を同定するため衝突輻射モデルによる計算を行った。

#### 5. 参考文献

- [1]E.D.Donets et al., IEEE Trans.Nucle.Sci.NS-23 904 (1976)
- [2]E. TRÄBERT et al., THE ASTROPHYSICAL JOURNAL,541:506-511 (2000)
- [3] F G Serpa et al., J.Phys. B, 31 3345 (1998)
- [4] A. Lapierre et al., Phys Rev Lett, 95 183001 (2005)
- [5] A. Lapierre et al., Phys Rev Lett, 95 183001 (2005)
- [6] U. Feldman, J. Opt. Soc. Am. B 8 3 (1991)
- [7] D.R. Beck, Phys. Rev. A 60 3304 (1999)
- [8] D. Kato, J. Chin. Chem. Soc. 48 525 (2001)
- [9] <https://www.nist.gov/>
- [10][https://www.hitachihightech.com/products/images/9797/ana-grating\\_05.pdf](https://www.hitachihightech.com/products/images/9797/ana-grating_05.pdf)