

タングステン多価イオンの 可視スペクトル測定

量子・物質工学専攻 中村信行研究室 小松明浩

1 背景

中性の原子から電子を剥ぎ取ると陽イオンができ、 q 個の電子を剥ぎ取れば q 価の陽イオンとなる。広義の定義では、多価イオンとは2価以上のイオンを指す。多価イオンは太陽コロナや核融合炉などの高温プラズマ中に存在している。そのため、様々なプラズマを理解するために重要なものとなっている。

現在、新エネルギー開発の超大型国際プロジェクトで建設が進められている国際熱核融合実験炉「International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER」において、プラズマ内部の不純物粒子を取り除く装置であるダイバータの材料にタングステンが用いられる予定である。タングステンには、高融点、低スパッタリング率、かつ核融合の燃料である水素やトリチウムなどを吸蔵しにくいメリットがある。その一方で、原子番号が大きく、高温のプラズマ中でも完全電離とはならないため、プラズマ内に混入すると高エネルギー X 線を放出し、温度を低下させるといった問題がある。したがって ITER 実験を成功に導くためには、タングステンのプラズマへの流入量や流入

経路を正確に診断し、それを制御する必要がある。そのためにタングステン多価イオンからの発光を観測し分光診断を行う予定である。しかしながら3価以上の価数を持つタングステン多価イオンについては既知の発光線が極めて不足している状態にある [1]。特に可視領域の発光線については、ファイバーやレンズを使えるなど分光診断における利点が多いにもかかわらず、一例 [2] を除いて過去に報告例がない。そのため、特に可視領域におけるタングステン多価イオンからの発光線を探索・同定し、波長や遷移確率などの基礎データを蓄積することが強く求められている [3]。本研究は電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap : EBIT) [4] を用いてこれらの基礎データを蓄積し、ITERでのプラズマ診断に貢献することを目的としている。

2 電子ビームイオントラップ「Electron Beam Ion Trap : EBIT」

EBIT はトラップしたイオンを電子ビームによる逐次電離で多価イオン化する装置である。図1(a)にEBITの概略図を示す。イオンは以下の方法により空間的にトラップされる。

[動径方向] 超伝導コイルによるビーム軸方向の強磁場と、磁場で圧縮された電子ビームの空間電荷ポテンシャルによって多価イオンを径方向に閉じ込める。

[軸方向] 中央のドリフトチューブ電極 (DT2) の電位を両極 (DT1、DT3) より低くして、図 1(c) のような井戸型ポテンシャルを電子ビーム軸方向に生成し、閉じ込める。

こうして DT2 内部に閉じ込められたイオンは電子ビームによる逐次衝突を受け、電離が進み多価イオンが生成される。DT を通過した電子は電子コレクタによって回収される。また、電子ビームのエネルギーを高くすると、より高価数のイオンを生成することができる。また、電子ビーム電流を高くすると生成するイオンの数が多くなる。このように電子ビームを適宜調節することで任意の価数のイオンを得ることが可能である。EBIT は単色電子ビームとトラップ多価イオンからなる単純なプラズマであり、プラズマの原子過程を記述するモデル計算の試験にも最適であるといえる。

2.1 小型イオン源 CoBIT

小型多価イオン源「CoBIT」は、10 価程度の鉄多価イオンの EUV 分光を目的に製作された装置である。本研究室にある Tokyo-EBIT と CoBIT の仕様を比較すると下表のようになる。

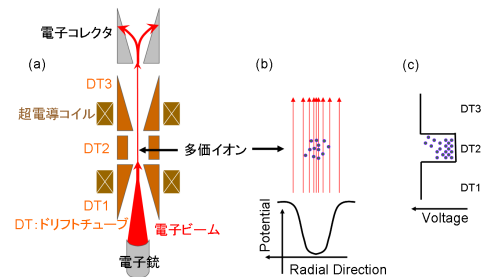


図 1: EBIT 概略図

表 1: CoBIT と Tokyo-EBIT の比較

	CoBIT	Tokyo-EBIT
装置全体のサイズ [m]	~0.5	~5
最大電子ビームエネルギー [keV]	2.5	300
最大電子ビーム電流 [mA]	20	330
電子ビーム径 [mm]	~0.4	~0.1
電子銃パービアンス [$\mu\text{A}/\text{V}_a^{3/2}$]	0.4	0.4
最大電流密度 [A/cm]	32	10000
最大磁場強度 [T]	0.2	4.5
イオントラップ領域の長さ [cm]	2	3

図 2 に CoBIT で得られた Kr の既知のラインのスペクトルの一例を示す。図の右に記したのは $\text{Kr}^{(15\sim 17)+}$ のイオン化エネルギーである。この例で示されているように、電子ビームエネルギー E_e が各々の価数のイオン化エネルギーを超えるとその次の価数からの発光線が速やかに現れる事がわかる。つまり、未知の発光線についても、電子エネルギー依存性を調べることにより、その出現エネルギーからイオンの価数を同定することができる。

3 多価イオンの発光過程

励起状態に励起された電子は基底状態 (またはより下の励起状態) へ光

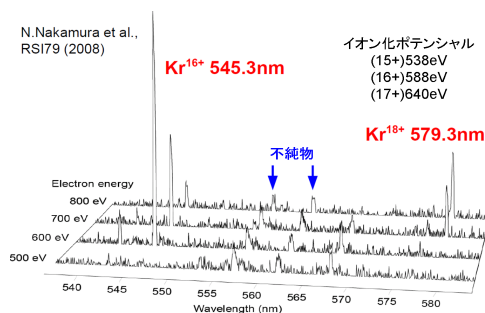


図 2: 小型 EBIT で得られた Kr の発光スペクトル

を放出しながら安定化するが、いつ起こるかは予測できない。励起状態にあるイオンや原子 1 個が単位時間にそうした遷移を起こす回数を放射遷移確率と呼ぶ。放射遷移のうち、電気双極子によるものを電気双極子遷移 (一般に E1 と表記される) と呼び、磁気双極子モーメントによるものを磁気双極子遷移 (M1) と呼ぶ。一般に、E1 以外の遷移は遷移確率が非常に小さいため、禁制遷移と呼ばれる。通常の原子やイオンの遷移では E1 遷移のみを考慮すれば良いことが多いが、太陽コロナから E1 遷移では解釈できない発光線がいくつも見つかり、長年の間未解決であった。後年、Edlén [5] によってそれらが多価イオンからの M1 遷移によるものと同定された。この例のように多価イオンでは禁制遷移が E1 遷移に匹敵する遷移確率を持つ事がある。

等電子系において原子番号が大きくなるとエネルギー準位間隔が広が

る。そのため多価イオンからの発光は通常 X 線領域となる。本研究で対象としている可視領域の発光は、電子配置の変化を伴わない微細構造準位間遷移の M1 遷移が主となる。

4 実験

4.1 分光測定

可視分光測定するための実験装置を図 3 に示す。CoBIT へのタングステンの導入方法は減圧下で容易に昇華するタングステンヘキサカルボニル $W(CO)_6$ を可変リーク弁を用いて導入した。電子ビーム衝撃により $W(CO)_6$ 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。発光は両凸レンズによって集光し、分光器で波長を弁別した後に、液体窒素冷却型 CCD により検出する。波長校正用に He、Ar、Kr、Xe、Hg の標準ランプを CoBIT をはさんで分光器の対向窓に設置した。分光器には、Czerny-Turner 型回折格子分光器 (Jobin Yvon HR 320) を用いた。また、熱陰極電子銃からの熱放射による迷光をカットするため、分光器のスリットの直前に熱線吸収フィルタ (CCF-50S-500C) を設置した。測定は 2 種類の回折格子 (刻線密度: 300 [本/mm], 1200 [本/mm]) を用いて行った。CoBIT の電子エネルギーは 200~1300 [eV] の範囲で詳細にエネルギー依存を調べ、

10~30 価 (W XI~W XXXI) 程度の価数に対応する範囲で測定を行った。前者の低分散回折格子では広い波長範囲を一度に測定することで、遷移波長データの乏しいタングステン多価イオンのライン探索を目的とした測定を行った。後者の高分散回折格子では、高分解能での測定を行うことで波長の決定を行った。図 4 に低

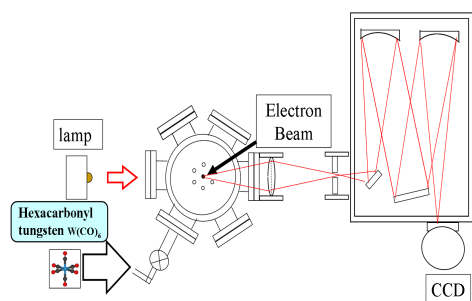


図 3: 可視光分光実験装置の配置図

分散回折格子を用いたタングステン多価イオンのスペクトルを示す。図中右肩に記したのは電子ビームエネルギーと、そのエネルギーで生成し得る最高価数である。またその最高価数のタングステンイオンからのラインに赤矢印を付けた。

図 5 に WXXVII を高分散回折格子を用いて測定をした結果を示す。この測定より、389.41(6)、464.61(6)、501.99(6) [nm] の 3 つの発光線の波長を決定した。この実験で得られた W XXVII の波長と Grasp による理論計算 [6] との比較を表 1 に示す。

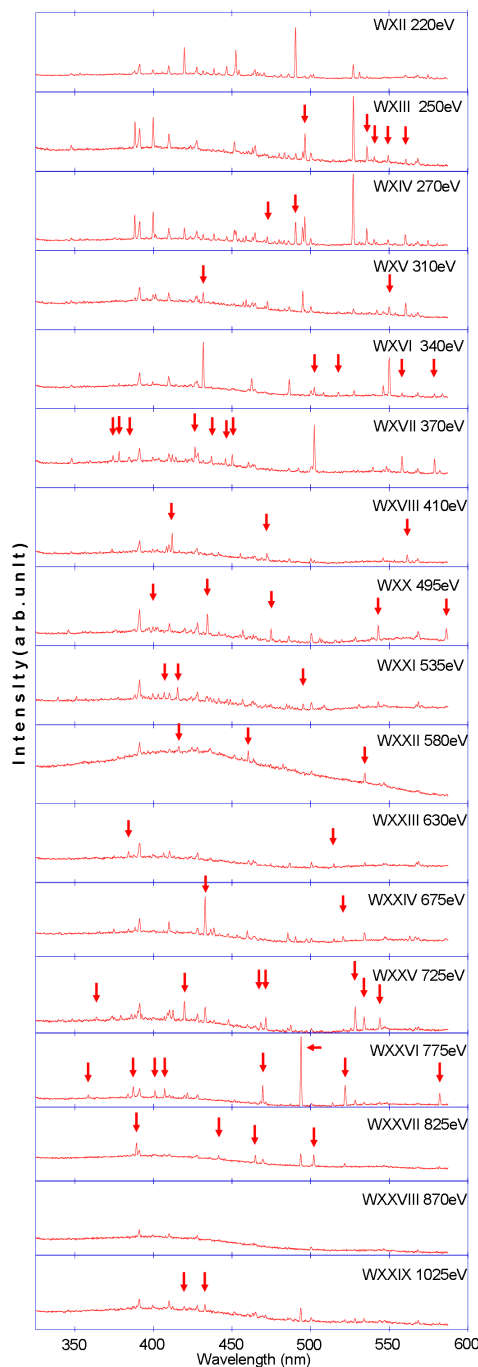


図 4: $E_e = 220\text{-}1025\text{ eV}$ (W XII - XXIX) の広域測定, 赤矢印: 最高価数イオンからの発光

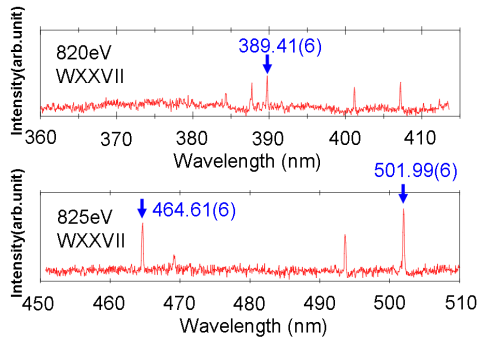


図 5: W XXVII の高分散測定

4.2 遷移寿命測定

EBIT を用いて遷移寿命を測定するためには、電子ビームを停止した状態で磁場だけでイオンのトラップを行わなくてはならない。ここで、超電導コイルの磁場に巻きつくイオンの半径 R [m] は、次式により計算することができる。

$$R = \frac{mv}{qB}$$

m は粒子のイオンの質量、 v は半径 R で円運動するイオンの接線方向の速度、 q はイオンのもつ電荷、 B は磁場の大きさである。W²⁶⁺ の場合、トラップされているイオンのエネルギーを 50 [eV] 程度として、磁場 B を磁場 0.1 [T] とすると、 $R = \sim 6$ [mm] となる。つまり CoBIT の磁場 0.1 [T] だと電子ビームがある時と比べると電子ビームを止めた時にイオンが数 mm も広がってしまう。その

ため、遷移寿命の測定は CoBIT でなく、より高い磁場を発生することのできる Tokyo-EBIT を用いた。

実験配置を図 6 に示す。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をフィルターで選択し、光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tubes : PMT) に入射させる。PMT から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、Pulser を用いて電子ビームの起動及び停止と MCA の観測開始のタイミングを同期している。電子ビームによるイオンの生

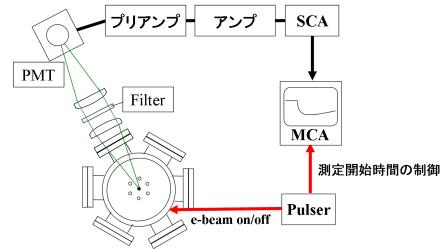


図 6: 遷移寿命測定配置図

成時間は 0.67 [s]。図 7 に W XXVII の 389.41(6) [nm] のラインについて遷移寿命測定を行った結果を示す。減衰部分をフィッティングすることにより、寿命は 5.0 ± 0.1 [ms]、遷移速度 $A = 2.0$ [s⁻¹] となった。以上の結果を表 1 にまとめた。

表 2: 実験と理論計算との比較 (W XVII の基底状態微細構造間)

transition	λ_{ex} [nm]	λ_{cal} [nm]	Type	$A_{ex}(s^{-1})$	$A_{cal}(s^{-1})$	gf
$^3H_{J=5} \rightarrow ^3H_{J=4}$	389.41(6)	388.434	M1	$2.00(8) \times 10^2$	3.94×10^2	9.80×10^{-6}
$^3H_{J=6} \rightarrow ^3H_{J=5}$	464.61(6)	467.796	M1		2.05×10^2	8.75×10^{-6}
$^3F_{J=3} \rightarrow ^3F_{J=2}$	501.99(6)	501.799	M1		1.75×10^2	4.62×10^{-6}

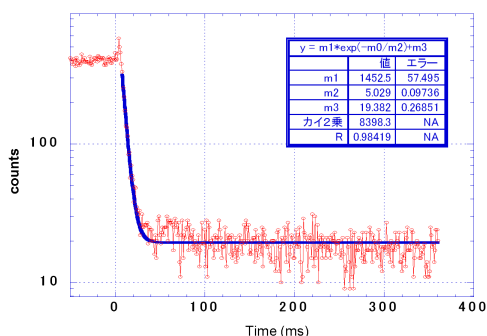


図 7: W XXVII の $^3H_{J=5} \rightarrow ^3H_{J=4}$ 波長 389.41(6) [nm] のラインの寿命測定結果

5 まとめ

可視領域でのタングステン多価イオンの分光測定及び遷移寿命測定を行った。多くのプラズマ診断において重要となる可視領域の発光のうち、過去に報告例のない 60 個近いラインを初めて発見し価数を同定した上で波長を決定した。発見されたラインのうち W XXVII については理論計算との比較を行い遷移の上準位と下準位まで同定した。理論計算との比較の結果、基底状態微細構造間の遷移を考えているにも関わらず、波長については、ほぼ一致する結果が得られた。遷移確率については差が見られたが、 W^{25+} の発光線もフィル

ターを透過している可能性があり、今後、追実験などを行う必要がある。

6 今後の展望

多くのラインを発見したが、上準位と下準位を含めて詳細に同定されたラインは数本である。今後は他の価数についての理論計算との比較を行い、同定を行っていく。将来的にはこれらのタングステンのデータを、ITER のプラズマ診断に活かしてもらいたい。

参考文献

- [1] Atomic Data and Nuclear Data Tables 95 (2009)
- [2] Phys. Rev. A 63, 042513 (2001)
- [3] Can. J. Phys. Vol. 86, (2008)
- [4] 日本物理学会誌 52 (1997) pp.919-923
- [5] B.Edle'n, Arkiv. Matem. Astr. och Fys. 28, B No.1 (1941)
- [6] Physica Scripta to be published