

蒸着源による電子ビームイオントラップへの金属元素導入

中村信行研究室 伊藤大貴

1 序論

1.1 多価イオン

多価イオンとは、一般には 2 価以上の正、負イオンのことであるが、ここでは中性原子からいくつかの電子を取り除いた正のイオンのことを指す。また、電子を z 個取り去ったものを z 価の多価イオンと呼び、その電子の個数をイオンの「価数」と呼ぶ。例えば、A という原子の z 価の多価イオンは、 A^{z+} と表されるが、中性原子を I としてこの表記法の $2+$ や $3+$ をそれぞれ III、IV として A III、A IV のように表す方法もある。

1.2 多価イオンの発光スペクトルによるプラズマ診断

多価イオンは高温プラズマ中に多く存在しており、一般には低温環境下では存在しない。多価イオンからの発光はプラズマ温度や電子密度と密接に関係しているため、その発光を利用して直接の観測が難しいプラズマ温度や電子密度を診断することができる。多価イオンの発光スペクトルを用いたプラズマ診断の一つの例として、核融合炉内のプラズマ中に存在する多価イオンの発光を利用するものがある。特に注目されているのが国際熱核融合実験炉 ITER[1] のプラズマ診断である。ITER にはプラズマの受け皿となるダイバータと呼ばれる部分がある。この材料として熱負荷が非常に高いためタングステンが採用されることとなった。しかし、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してしまう。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、電離を起こして多価イオンとなり、X 線を放射する。その結果、放射冷却によってプラズマの温度を下げたしまい、核融合

の効率が下がるという問題がある。これ防ぐためには、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必要があり、タングステンの流入経路や流入量を正確に把握することが重要である。

1.3 電子ビームイオントラップ

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。EBIT は電子銃、ドリフトチューブ (Drift Tube:DT)、ヘルムホルツ型超伝導コイル、電子コレクターから構成されている。図 1 は EBIT の原理図である [2]。

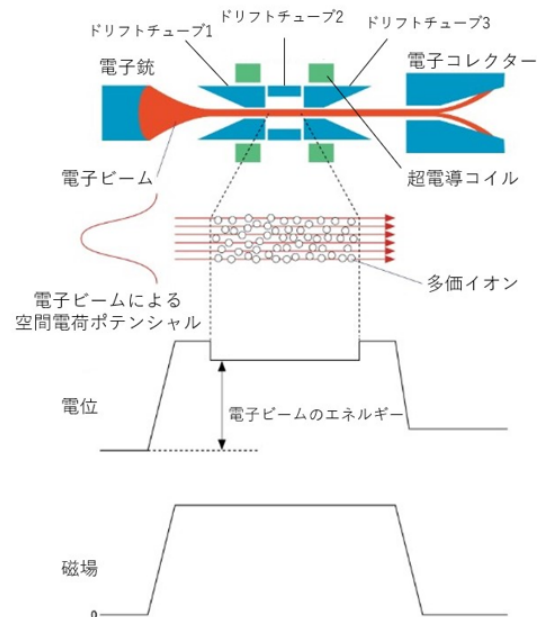


図 1 EBIT の概略図

電子銃から生成された電子ビームは、超伝導コイルによって圧縮され、そして DT 内部を通過した後に電子コレクターで回収される。DT は DT1、DT2、DT3 と 3 つの電極に分かれており、DT2 の

印可電圧を他の DT1、3 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できる。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軸方向の井戸型ポテンシャルと、電子ビームによる径方向の空間電荷ポテンシャルによって 3 次元的にトラップされる。それによって電子ビームがトラップイオンに衝突し、逐次電離を起こすことで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ーで発散し回収される。

1.4 研究目的

本研究の目的は、新たに採用した蒸着源を用いてタングステンが多価イオン源内に導入し、既存の導入方法と比較し性能を評価することである。

まず、蒸着源を用いた導入とガス導入で導入元素がどれだけの時間多価イオン源内に残るかを測定する。次にそれぞれの導入方法で W^{11+} から W^{14+} までをビームエネルギーを変えて測定、比較し評価する。

2 実験装置

2.1 小型電子ビームイオントラップ：CoBIT

本研究室には多価イオン源として Tokyo-EBIT[3] と小型電子ビームイオントラップ [4](以下 CoBIT) がある。CoBIT は Tokyo-EBIT と原理は同じであるが低エネルギー化、小型化したものである。図 2 に断面図を示す。Tokyo-EBIT は高エネルギー運転による高価数の多価イオン生成に適しているが、低エネルギーでの運転を行うと電子ビームが安定しない。CoBIT は低エネルギーでの運転に適した装置であるため、低価数の多価イオンの生成に向いている。また、Tokyo-EBIT は装置の冷媒に液体ヘリウムを用いるが、CoBIT は液体窒素で冷却を行うため運転コストが低いことが特徴である。今回の観測では中価数程度の多価イオンであるため CoBIT を用いて多価イオンを生成する。

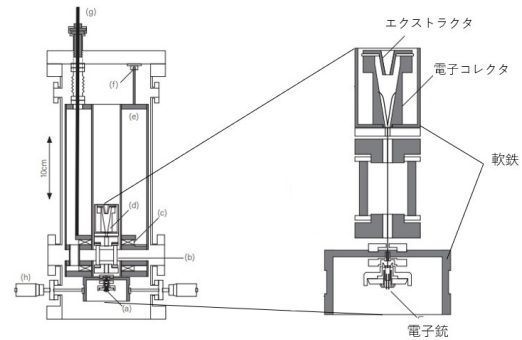


図 2 小型 EBIT の概略図 (a) 電子銃 (b) イオン化領域 (c) コイル (d) 電子コレクター (e) 液体窒素素容器 (f) 吊り下げ機構 (g) 電流導入端子 (コイル) (h) 直線導入 [9]

2.2 種元素の導入方法

本研究室ではタングステンを測定する際、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、CoBIT 内部に導入していた。しかし、化合物での導入だとタングステン以外に目的としない炭素や酸素も同時に導入するため、それらの発光線も見えてしまう。よって、新たに電子衝撃加熱による蒸着源を用いてタングステンを導入した。図 3 に蒸着源を用いた導入法の概略図を示す。

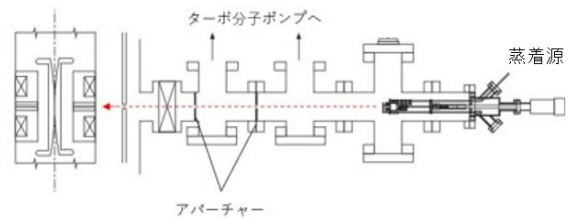


図 3 蒸着源を用いた種元素導入の概略図

フィラメントからの電子の衝撃によって金属試料を加熱し、金属蒸気を生じさせトラップ領域内に導入した。また、金属蒸気を不要に散らさないように、CoBIT 前のゲートバルブ、CoBIT 側のターボ分子ポンプと蒸着セル側のターボ分子ポンプの間に口径 1 mm のアパーチャーが配置してある。これらのアパーチャーで流量を制限することにより 2 つのポンプで真空を引く差動排気構造となっている。

2.3 分光器

本研究では可視領域スペクトルを観測するために HORIBA Scientific 製分光器の iHR550 を用いた。仕様を表 1 に示す。

表 1 分光器の仕様

型番	iHR550
焦点距離	550 mm
F 値	6.4
グレーティングサイズ	76 mm × 76 mm
分解能	0.025 nm
波長精度	± 0.2 nm

この分光器は回折格子を Czerny-Turner 型に配置した分光器である。溝本数は 150 本である。CCD カメラは Andor 製の iDUS416Series を用いており、電子冷却型のため -70 °C に冷却し、ノイズの原因となる暗電流を抑えた。

2.4 波長校正

多価イオンからのスペクトルを観測する上で、波長校正は波長決定のために大変重要な過程である。よく研究されていて、波長が既知である強い発光強度の発光線を用いて実験データの校正を行う。また、用いる回折格子の溝本数や CCD カメラの位置によって測定できる波長域が異なるため、これらの発光線は実験前に測定波長域の調整のためにも使用できる。測定には標準ランプを用いた。標準ランプの発光線の波長を参照する際にはアメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology : NIST) のデータベース [5] を参照した。

本研究の波長校正で用いた標準ランプは He、Hg である。

得られた標準ランプのスペクトルについて、正規関数の式 (1) をフィッティングしてピクセル位置を求めた。

$$f(x) = a \exp\left\{-4 \ln 2 \frac{(x-b)^2}{c^2}\right\} + d \quad (1)$$

x がピクセル数であり、 a から d はフィッティン

グパラメータである。フィッティングから、発光線の中心のピクセル位置が得られる。NIST のデータベースと比較して発光線の波長を決定し、ピクセル位置と対応させることを繰り返す。

3 結果と考察

3.1 導入元素残留の比較

本研究ではまず、蒸着源とガス導入によって導入元素がどの程度の時間残るかを比較する。ビームエネルギーはタングステンの 14 価を生成する 300 eV に設定した。測定結果を図 4 に示す。ガス導入

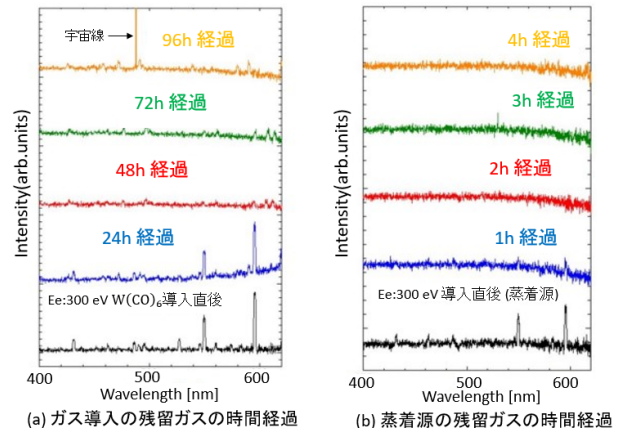


図 4 経過時間ごとの残留ガスの比較

による結果 (a) を見ると 24 時間経過しても発光線がはっきりと映っている。一方で蒸着源による結果 (b) を見ると 1 時間経過した時点でスペクトルがほとんど消え、それ以降はスペクトルが見られなかった。これは、ガス導入では冷たい液体窒素容器の壁に分子が吸着してもある蒸気圧で真空内に残留ガスとして残ってしまうが、蒸着源を用いて導入した金属元素は蒸気圧が低いいため吸着した後に真空中にすることはないのであると考える。

3.2 スペクトルのエネルギー依存性の測定

先行研究と比較して本研究の実験データの有用性を確かめるために、電子ビームエネルギーを 220 から 300 eV に変化させて測定した。測定時間は 30 分、回折格子の溝本数は 150 g/mm である。本研

究の結果を図5に示す。それぞれのスペクトルにおいて、得られた際の電子ビームエネルギーと支配的に生成されているイオンの価数がスペクトルの右肩に記載されている。

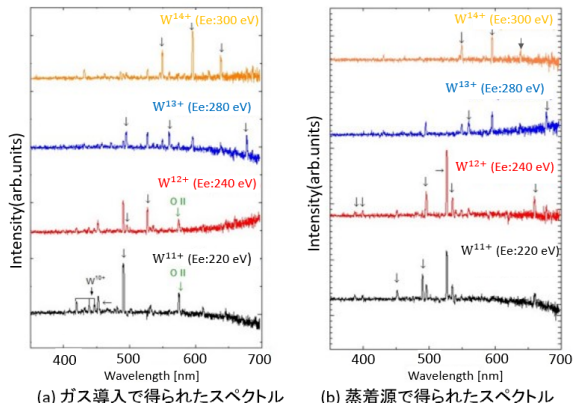


図5 ガス導入、蒸着源によるタングステンのスペクトル

過去の結果を参考に各エネルギーにおいて記載された価数の発光線と考えられるものに図5のグラフ中に矢印を書き込んだ。一致しているとみなせるスペクトルがあることより先行研究の結果を部分的に再現することができた。ビームエネルギーが220 eVのとき蒸着源のスペクトルではほぼ11+のみで10+の発光線が観測されなかった一方、ガス導入によるスペクトルでは、10+由来のスペクトルが観測できた。これは残留ガスとの電荷交換反応によるものだと考える。また、緑の矢印で示した575 nmのスペクトルはNist Atomic Spectra Databaseのデータより575.3917 nmの2価の酸素の発光線であると考えられる。

蒸着源によるスペクトルでは524 nm付近の発光線はこれまでに観測されているスペクトルの中でも発光強度の強いW¹²⁺由来のものである。また、ビームエネルギーが240 eVのとき400 nm付近でガス導入では観測されなかったW¹²⁺由来の発光線が観測できた。これは、蒸着源では不純物原子の導入量が少ないため電荷交換反応の寄与が少ないためだと考える。

4 結論

本研究では電子衝撃加熱による蒸着源とW(CO)₆を用いたガス導入によるタングステン多価イオンのスペクトル測定の比較を行い、性能の比較を行った。残留ガスの比較においてガス導入では数日スペクトルが残ったが、蒸着源ではゲートバルブを閉じて1時間でほとんどスペクトルが見えなくなった。このことより、残留ガスがすぐに消える蒸着源での測定のほうがより純粋なタングステンのスペクトルを観測できると考える。

次に、ビームエネルギーを変化させて行った測定では、ガス導入による結果において酸素の多価イオンや、目的とする価数とは違ったタングステン多価イオンが見られた。蒸着源による結果では目的とする価数と違ったタングステン多価イオンも見られたが、タングステン以外の多価イオンは見られなかった。このことより蒸着源によるスペクトル測定のほうがタングステンの発光線を不純物なく価数分布が狭い状態で観測することができる。

今後は、過去にガス導入によって測定されたタングステン多価イオンの再測定、再評価を行う。また紫外線領域、ニオブなどの高融点金属のスペクトル測定を行っていきたい。

参考文献

- [1] ”国際熱核融合実験炉 ITER ウェブサイト”、
https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_7.html
- [2] J. K. Webb, J. A. King, M. T. Murphy, V. V. Flambaum, R. F. Carswell, and M. B. Bainbridge, arXiv:1008.3907 (2011)
- [3] 中村・大谷、日本物理学会誌 52 (1997) pp.919-923
- [4] 菊池浩行氏 修士論文 (2007) 電気通信大学
- [5] NIST ASD Holdings - Physical Measurement Laboratory、<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>