

タングステン多価イオンの真空紫外領域における分光

中村信行研究室 船橋 茉由子

2022年3月4日

1 序論

1.1 多価イオン

多価イオンとは、一般に2価以上の正、負イオンのことである。ここでは特に、価数が2以上の正の原子イオンを指す。Aという元素で価数が q の多価イオンは A^{q+} と表記する。

多価イオンの特徴を示すために、水素様イオンで比較する。ボーアの原子模型で考えると、原子番号を Z 、主量子数を n として、エネルギー $E(n)$ 、軌道半径 $r(n)$ 、軌道速度 $v(n)$ は式 1.1、1.2、1.3 のようになる [1]。

$$E(n) = -E_0 \frac{Z^2}{2n^2} \simeq -27.2 \frac{Z^2}{2n^2} \text{ (eV)} \quad (1.1)$$

$$r(n) = a_0 \frac{n^2}{Z} \simeq 5.3 \times 10^{-11} \frac{n^2}{Z} \text{ (m)} \quad (1.2)$$

$$v(n) = v_0 \frac{Z}{n} \simeq 2.2 \times 10^6 \frac{Z}{n} \text{ (ms}^{-1}\text{)} \quad (1.3)$$

ここで、 E_0 はエネルギーの原子単位、 a_0 はボーア半径、 v_0 はボーア速度と呼ばれる。 n を固定した場合、軌道速度 $v(n)$ は Z に比例して大きくなり、軌道半径 $r(n)$ は Z に反比例して小さくなる。

1.2 国際熱核融合実験炉 ITER

国際核融合実験炉 (ITER) 計画は、2025 年の運転開始を目指している国際的なプロジェクトである。

ITER はトカマク型という構造を採用している。ドーナツ型の中核が超高温プラズマとなっており、この周りにある超伝導コイルによって強い磁場を作ってプラズマを閉じ込める。プラズマの下部にはダイバータという部分があり、プラズマからの高い熱流や粒子の流れを受け止める役割を持つ。ダイバータの材料には熱負荷に強いタングステンが使用されることになった。しかし、スパッタリングによってタングステンがプラ

ズマ中に混入し多価イオン化すると、放射損失が大きくなるため、プラズマ温度の低下や閉じ込め性能の低下の原因になる。そのため、タングステンの流入量や流入経路を把握して制御することが必要である [2]。

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、1980 年代後半に米国のリバモア研究所で開発された多価イオン源である [1]。EBIT は図 1.1 で示すように、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、電子コレクターで構成されている。

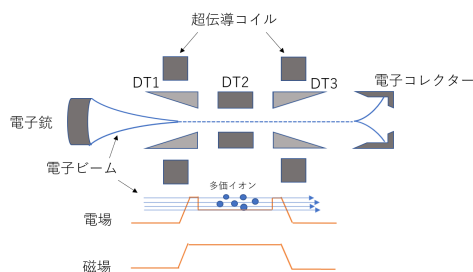


図 1.1: EBIT の概略図

電子銃から出射された電子ビームは、超伝導コイルによって径方向に圧縮されてDT内部を通過し、電子コレクターに回収される。DTは3つあり、DT1とDT3にDT2より高い電圧を印加すると、軸方向に井戸型ポテンシャルができる。また、径方向には電子ビームが空間電荷ポテンシャルをつくる。軸方向と径方向のポテンシャルに3次的にトラップされたイオンは、電子ビームが衝突することによって多価イオン化される。EBITは電子ビームエネルギーを任意の値に設定できるため、生成する多価イオンの価数ある程度定めることができる。

1.4 真空紫外光

波長範囲に明確な定義はないが、波長が 200 nm 以下の紫外線を真空紫外 (Vacuum Ultraviolet, VUV) 光と呼ぶ。真空紫外光は大気中の分子による吸収があるため、伝搬させるには光路を真空にする必要がある。本論文では、30 nm より短波長の領域を「極端紫外 (Extreme Ultraviolet, EUV) 領域」と呼び区別することとする。

1.5 研究目的

本研究の目的は、ITER のプラズマ診断に必要なタングステン多価イオンの分光データを集めることである。今回の実験では、まだ観測されていない真空紫外領域での発光線を観測し、その価数の同定を行うことを目的とした。また、先行研究との整合性を確認するために、可視領域と極端紫外領域の発光線と並行して測定することにした。

2 実験

2.1 実験装置

小型電子ビームイオントラップ (Compact EBIT, CoBIT) の概略図を図 2.1 に示す [3]。CoBIT は一般的な EBIT に比べて低エネルギーで運転するため、中程度の価数の多価イオンを扱うのに適している。冷却には液体ヘリウムではなく液体窒素を使用できるので、コストを低く抑えられる。CoBIT に可視分光器、極端紫外分光器、真空紫外分光器を設置して観測を行った。真空紫外分光器には、平面結像型斜入射分光器を用いた。この分光器は入口スリットがないのが特徴で、本来の入口スリットの位置を電子ビームに一致させるように回折格子が配置されているため、より効率的に分光ができる。試料はヘキサカルボニルタングステンを使用した。

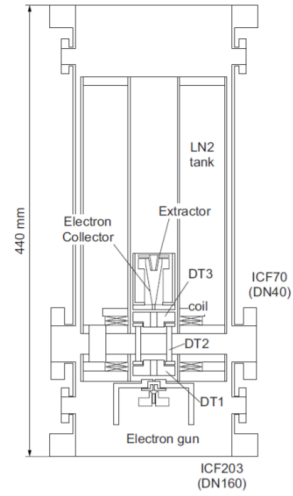


図 2.1: CoBIT の概略図 [3]

2.2 波長較正

可視領域における波長較正を行うために、Hg と He の標準ランプを使用した。得られたスペクトルに正規分布の式をフィッティングしてピクセル位置を求めた。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 [4] 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。求めた発光線のピクセル位置と、適用した NIST のデータベースの波長を表 2.1 に示す。

表 2.1: 可視領域測定に用いた発光線のピクセル位置と波長の文献値の対応

	位置 (pixel)	波長 (nm) [4]
Hg I	318.63	404.6565
	526.32	435.8335
	1264.41	546.0750
He I	213.97	388.8648
	602.03	447.1480
	903.06	492.1931
	965.87	501.5678
	1543.79	587.5621

これらの結果を 3 次多項式にフィッティングし、ピクセルを波長に変換する式を求めて波長較正に用いた。

表 2.2: 真空紫外領域測定に用いた発光線のチャンネル位置と波長の文献値の対応

(a) PSD 位置が 30.00 mm のとき		
	位置 (ch)	波長 (nm) [10]
O III	728.356	83.2927
C III	320.047	97.703
O VI	166.781	103.1912
O VI	151.281	103.7613
(b) PSD 位置が 45.00 mm のとき		
	位置 (ch)	波長 (nm) [10]
O VI	627.505	103.1912
O VI	612.015	103.7613
C I	418.596	110.9639
O V	132.97	121.3809
O V	130.857	121.8344

真空紫外領域における波長較正は、不純物として観測される O や C のスペクトルを用いた。フィッティング方法は、可視領域の波長較正と同じである。求めた発光線のチャンネル位置と、適用した NIST のデータベースの波長を表 2.2 に示す。

3 結果および考察

3.1 先行研究の再現実験

先行研究 [5] 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 100 eV から 280 eV に変化させて可視領域スペクトルと極端紫外領域スペクトルを測定した。測定時間は 30 分である。ページの都合上、スペクトルの図は割愛する。可視領域スペクトルは先行研究を部分的に再現したが、極端紫外領域スペクトルは共通の発光線を見つけることが困難だった。

3.2 真空紫外領域スペクトルの測定

PSD 位置が 30.00 mm のものと 45.00 mm のものを、電子ビームエネルギーを 100 eV から 280 eV に変えながらそれぞれ測定時間 15 分で測定した。図 3.1 は

PSD 位置が 30.00 mm のスペクトル、図 3.2 は PSD 位置が 45.00 mm のスペクトルである。

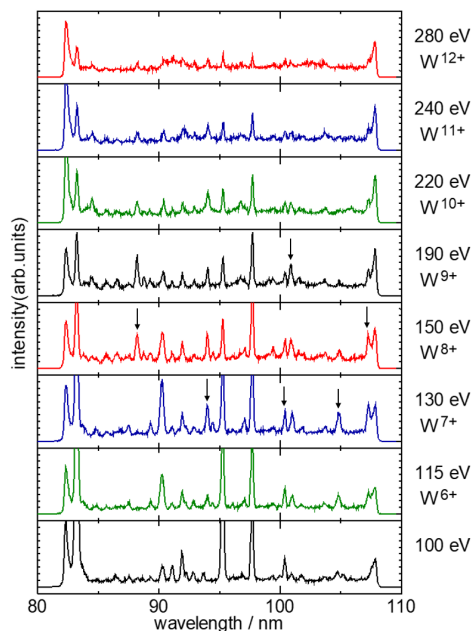


図 3.1: PSD 位置 30.00 mm の真空紫外領域スペクトル

図 3.1、図 3.2 中の、電子ビームエネルギーに依存しているように見える発光線に矢印を付与した。先行研究の波長領域のスペクトルの再現性が低いことから、矢印の発光線の価数や、その発光線がそもそもタングステンであるかどうかは断定できなかった。

後日、ヘキサカルボニルタングステンを補充して再度実験を行ったところ、可視領域と極端紫外領域で先行研究をよく再現したスペクトルが取れた。真空紫外領域スペクトルを比較すると、本研究と同じ位置に発光線が現れていたため、出ている発光線はタングステンの発光線であるとみなして考察を進めても良いと言える。

図 3.1 と図 3.2 に矢印で示した発光線をまとめると、表 3.1 のようになった。ただし、フィッティングが行えなかったため、グラフソフト上で x 座標を読み取ることで波長を決定した。

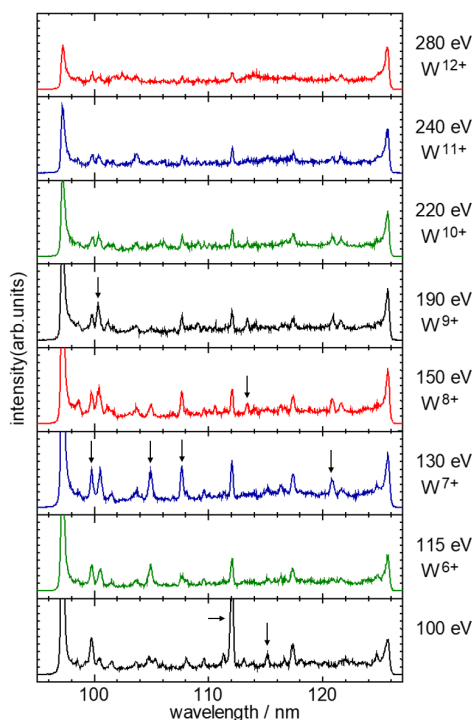


図 3.2: PSD 位置 45.00 mm の真空紫外領域スペクトル

表 3.1: 80 nm から 126 nm の間に出ていた発光線の波長

価数	波長 (nm)
W ⁶⁺	112.0
	115.2
	115.2
W ⁷⁺	94.0
	100.4
	104.9
	107.6
	120.8
W ⁸⁺	88.2
	107.2
	113.4
W ⁹⁺	100.9

4 結論

本研究では、タングステン多価イオンの真空紫外領域での分光を行い、今まで観測されていなかった波長域からもいくつかの発光線を得ることができた。しかし、先行研究の再現が上手くいかず、本研究で観測されたスペクトルがタングステンの発光かどうか確認が持てなかった。試料を補充した後の真空紫外領域のデータには再現性があったことから、本研究で得られた発光線はやはりタングステンによるものと考えられる。

今後は、新たなデータの方を解析する必要がある。また、計算で予想されている発光線や2次光の存在を確認するために、より広い波長域のデータも取得していきたい。

参考文献

- [1] 市川行和、大谷俊介 (2012) 『原子分子物理学ハンドブック』、朝倉書店
- [2] 鈴木哲、秋場真人、齊藤正克 (2006) 「2. ダイバータの構造を理解する (核融合炉・炉内 機器の構造を理解する)」、『プラズマ・核融合学会誌』 82 (10)、p.699-706
- [3] N Nakamura, et al. "Compact electron beam ion trap for spectroscopy of moderate charge state ions" Rev.Sci.Instrum. 79, 063104, June 2008
- [4] NIST, "NIST Atomic Spectra Database", https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (2022.1.19 閲覧)
- [5] 三田百恵 修士論文 (2017) 電気通信大学