

タングステン多価イオンの未同定発光線の探索

電気通信大学大学 情報理工学部 先進理工学科
応用物理工学コース 中村信行研究室 近藤 丈洋

1 背景・目的

核融合炉工学技術を立証することを目的とした国際プロジェクトとして国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設が 2025 年の稼働を目標として進められている。ITER 内部には、プラズマからの高い熱流や量子の流れを受け止める部分であるダイバータという機器があり、その材料としてタングステンが使用される。しかしスパッタリングにより炉内にタングステンが混入すると、多価イオン化して放射冷却を引き起こす問題がある。タングステン多価イオンからの発光線を見る分光診断は、ITER 内部のプラズマを見る手法として有用とされているがそのデータは不足しているのが現状である [2]。

本研究では、小型電子ビームイオントラップ (electron beam ion trap: EBIT) を用いて 14-21 価の範囲にて過去に報告例の無いタングステン多価イオン発光線を観測し、その帰属イオンを同定した上で波長を決定することを目的とした。

2 実験

2.1 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 1970 年ごろにロシア原子核研究所にて開発された電子ビームイオン源 (electron beam ion source: EBIS) をもとにローレンスリバモア研究所にて開発された多価イオン源である。図 1 にて EBIT における多価イ

オンの生成原理図を示す。

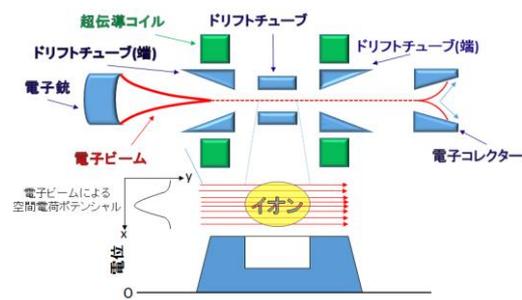


図 1. EBIT における多価イオンの生成原理図

EBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ、超伝導コイルに電子コレクターの 4 つから構成される。ドリフトチューブは 3 つの円筒型電極からなり、中央の電位を両端の電位よりも低くして井戸型電位を印加することで軸方向にイオンを閉じ込める。一方で径方向には電子ビームの空間電荷ポテンシャルで閉じ込める。こうして 3 次的に閉じ込めたイオンに対して電子銃からの高エネルギー電子の衝突による電離を行って多価イオンを生成する。その後電子銃からの電子は電子コレクター部によって減速した上で回収される。

今回の実験には小型の EBIT である CoBIT を用いて多価イオンの生成を行った。

2.2 可視分光器

今回の実験における可視領域スペクト

ルの分光には、Jobin Yvon 社製の HR320 を用いた。実験装置の概略図を図 2 にて示す。

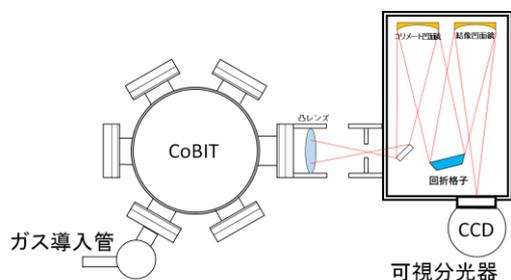


図 2. 実験装置の概略図

CoBIT にて生成した多価イオンからの光は、スリットから入射してコリメート凹面鏡で平行光となり、反射型平面回折格子にて回折されて、結像凹面鏡によって CCD カメラに集光される。回折格子を回転することにより、観測する波長領域を変化させることが可能である。また、回折格子の溝本数を変えることによって、同様に検出できる波長域を変化させることもできる。CCD カメラの使用に際しては、熱雑音を低減する為に液体窒素を用いて冷却する

2.3 発光スペクトルの同定

観測した発光スペクトルに対して、EBIT の電子ビームエネルギーに対する依存性を調べ、イオン化エネルギーと比較することで発光線の帰属イオンの同定が可能になる。今回観測した溝本数 300 本におけるタングステン多価イオンの発光スペクトルの一部を例としてタングステンのイオン化エネルギーと併せて図 3, 表 1 に示す。

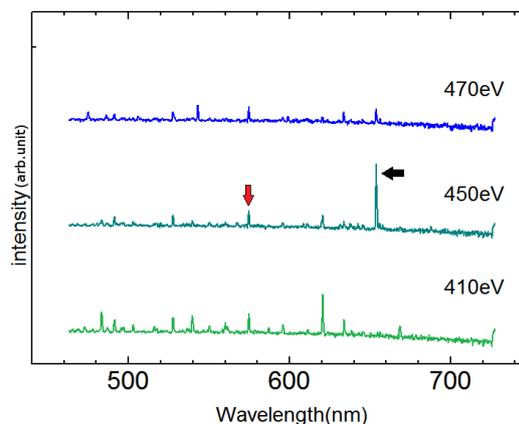


図 3. 発光スペクトルのエネルギー依存性

表 1. イオン化エネルギー [3]

イオン化エネルギー
$W^{16+} \rightarrow W^{17+}$: 387eV
$W^{17+} \rightarrow W^{18+}$: 426eV
$W^{18+} \rightarrow W^{19+}$: 466eV

黒い矢印で示した発光線は 450eV では強い強度であるが、410eV では見えておらず、470eV では強度が小さくなっている。EBIT では、電子ビームエネルギーを変化させることによって生成されるイオンの価数の上限を定めることが出来る。また、タングステン多価イオンの発光線の強度は EBIT 内のイオンの価数分布に大きく依存しているため、イオン化エネルギーと照らし合わせることで、この発光線は 18 価のイオンから生じたものであると同定できる。一方で赤い矢印で示した発光線は、エネルギーが変化しても強度が大きく変化してはいないため、EBIT 内のイオンの価数分布に対応しない、イオン化エネルギーが電子エネルギーよりも大幅に小さいイオン、つまり軽

元素の不純物イオンの発光線であると推定できる。

2.4 波長校正

タングステン多価イオン観測前の観測波長域の確認、および観測した多価イオン発光スペクトルに対して、その波長域を決定するために、測定するタングステンイオンとは別に既知の波長の発光線を持つ標準ランプを用いて波長較正を行った。回折格子の溝本数が 300g/mm では He, Ne, Ar を、1200g/mm では Xe, Kr, Ar, Ne の標準ランプを用いた。波長較正用の発光線の波長を参照する際には NIST データベースを用いた[4]。

3 結果及び考察

回折格子の溝本数 300 本におけるタングステン多価イオンの発光スペクトルの観測条件は測定時間 10 分、電子ビーム電流 10mA、電子ビームエネルギーを 310-570eV に設定して波長範囲は 460-720nm にて観測した。観測結果を図 4 にて示す。

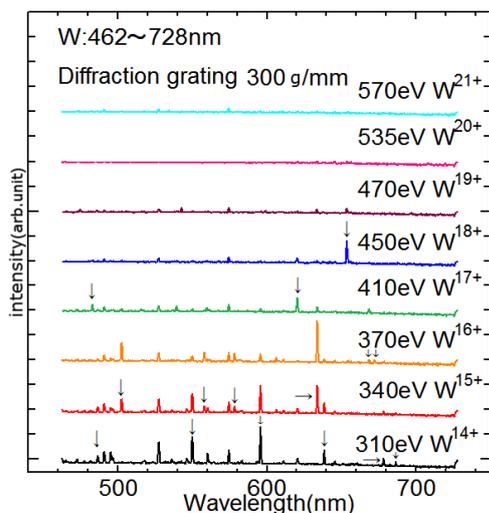


図 4. 300 本における観測結果

図 4 において矢印にて示した発光線はそのスペクトルの右に示した価数のタングステン多価イオンに属する発光線と考えられるものである。この結果を踏まえて測定時間を 30 分にした上で溝本数 1200g/mm の回折格子にて観測を行った。

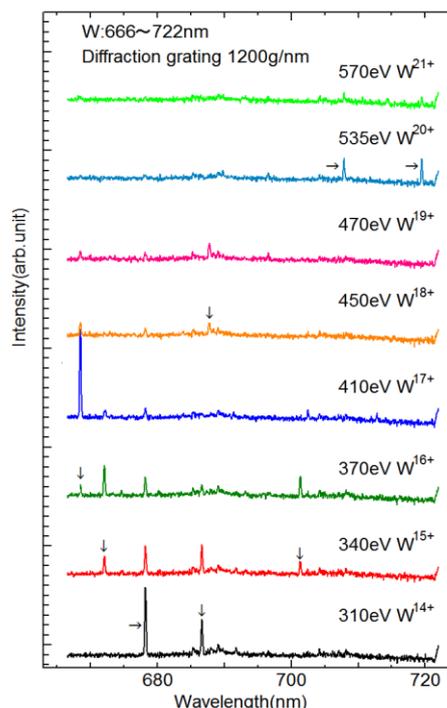


図 5. 1200 本における観測結果

図 5 より、溝本数 1200g/mm において観測、同定を行った発光線の価数、波長を表 2 に示す。

表 2. 今回同定を行った発光線

価数	波長 [nm]
W ¹⁴⁺	678.2, 686.7
W ¹⁵⁺	672.0, 701.3
W ¹⁶⁺	668.5
W ¹⁸⁺	687.8
W ²⁰⁺	707.9, 719.5

溝本数 1200g/mm での高分散測定では、300g/mm にて確認できた発光線の再現に加えて、新たに 5 本の発光線を確認できた。これらは、溝本数 1200g/mm における観測時間を 300g/mm のときよりも長時間にしたことから観測できるようになった発光線であり、電子ビームエネルギーに対する依存性を示すことから、タングステン多価イオンからの発光線であると考えられる。

4 結論

今回、タングステン多価イオンの可視領域に対して、研究室内で過去に観測されていない領域における発光スペクトルの観測を行った。その結果、溝本数 1200g/mm での高分散測定において、溝本数 300g/mm にて観測できなかった発光線が 5 つ観測できた。そのため、これらが本当にタングステン多価イオンからの発光線であるか、より確かな結果を追究する必要がある。

今後の展望としては、溝本数 300g/mm の回折格子にてより長時間の観測を行い、今回の溝本数 1200g/mm における観測結果との比較を行う。それに加えて、タングステンの導入量を変化させて再度観測し、今回の測定に用いた 2 種の回折格子にて、同様の発光線が見られるかどうかを確かめたい。

5 参考文献

[1] JADA ITER Project
<<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/index.php>> 2017 年 1 月 23 日アクセス

[2] 菊池浩行 “2007 年修士論文

[3] J. Scofield, Ionization Energies, Internal report, LLNL, Livermore, USA

[4] NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html> 2017 年 1 月 23 日アクセス