

タングステン多価イオンの分光測定

中村信行研究室 小林 優介

・背景と目的

核融合を用いた次世代エネルギー開発のプロジェクトである国際熱核融合実験炉 ITER では、炉内に高温、高密度なプラズマを作るため、炉壁やダイバーター等のプラズマに直接面する部位には非常に高い熱負荷がかかる。これらの部位の材料として高融点、低スパッタリング率を持つタングステンが最有力候補として挙げられているが、高温のプラズマ内でも完全電離とはならないため、放射冷却により温度を低下させるという問題がある。従って、タングステン多価イオンの分光計測により、タングステンの流入量や流入経路を診断する必要がある。そのため、タングステン多価イオンの分光データの蓄積が求められている。

本研究は 10~30 価程度のタングステン多価イオンを対象に極端紫外(EUV)領域での分光データを蓄積することを目的とした。

・原理と実験装置

我々の研究室では、多価イオンを生成する装置として、高価数の多価イオンを生成する大型の電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap、通称 Tokyo EBIT[1])と、低価数、中価数の多価イオンを生成する小型 EBIT(通称 CoBIT[2])を用いて様々な分光研究を行っている。本研究では主に 10~30 価程度のイオン生成に適している CoBIT を用いた。CoBIT の原理を図 1 に示す。CoBIT は電子ビームエネルギー~2.5KeV、ビーム電流~20mA、中心磁場~0.2T を最大としている。多価イオン生成部分は主に電子銃、ドリフトチューブ(DT)、電子コレクターで構成されている。DT は円筒電極であり、三つに分割されている。DT の周りには超伝導コイルを配置しており、軸方向の強磁場を形成する。電子銃から放射された電子ビームは電場によって加速され、磁力線に沿って径方向に圧縮されつつ DT に入射される。三つの DT 電極の内、中央にかける電圧のみを下げることで井戸型ポテンシャルを形成し軸方向に、また電子ビームの空間電荷ポテンシャルにより動径方向に DT 内部のイオンをトラップすることができる。トラップされたイオンは電子の逐次衝突を受け、電離が進む。このように逐次電離が起きることで多価イオンが生成される。生成される多価イオンの価数は、電子ビームエネルギーに依存する。

本研究に用いた EUV 測定系の概略図を図 2 に示す。EUV 領域では鏡面反射率が低いため、通常のミラーやレンズを使えない。そこで分散素子には不等間隔の平面結像型凹面回折格子(溝本数 1200 本/mm)を用いている。これにより入射光をミラーやレンズを用いることなく、平面上に回折光を集光することができる。また、87 度の入射角による全反射で、回折効率を高めている。回折された光は CCD カメラによって検出される。この CCD はペルチェ冷却型を用いており、熱雑音を防ぐために実験時には-70℃に設定されている。尚、空気による紫外線吸収を防ぐため、光学系は全て真空容器内に収められており、真空度は~ 10^{-6} Pa に保たれている。

・実験

タングステンの分光測定を行うために、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を CoBIT に導入した。尚、波長較正のため、鉄の分光測定を行う際にはフェロセンを導入した。電子ビーム電流を 6~10mA、ビームエネルギーを 200~500eV に設定し、生成した多価イオンからの発光を 30 分間 CCD に露光し、分光測定を行った。

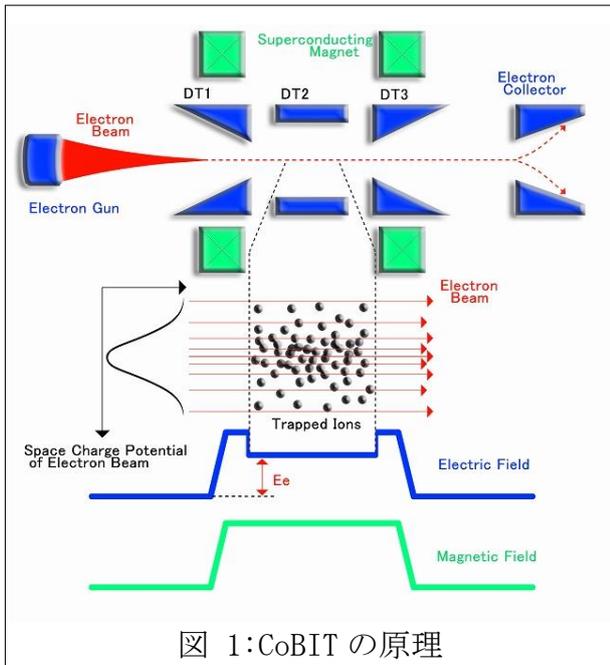


図 1: CoBIT の原理

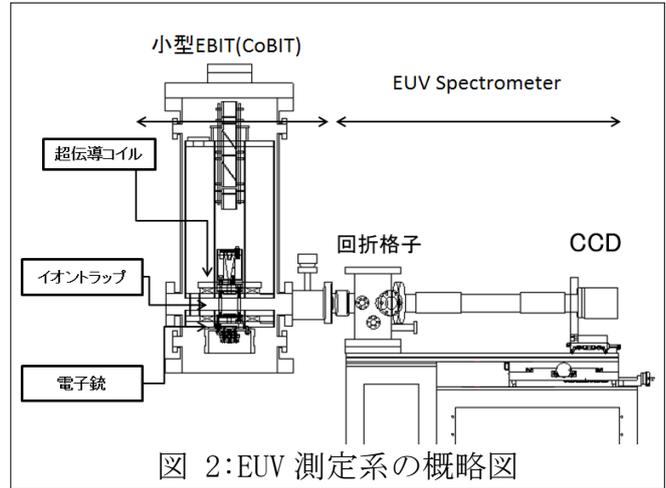


図 2: EUV 測定系の概略図

・結果

まず、波長較正を行うためにビームエネルギー400eV、500eV で鉄のスペクトルを測定した。その結果を図3に示す。ここで得られているラインはFe XIV~XV の波長のよく知られたラインであり、これらを用いて波長較正を行った。

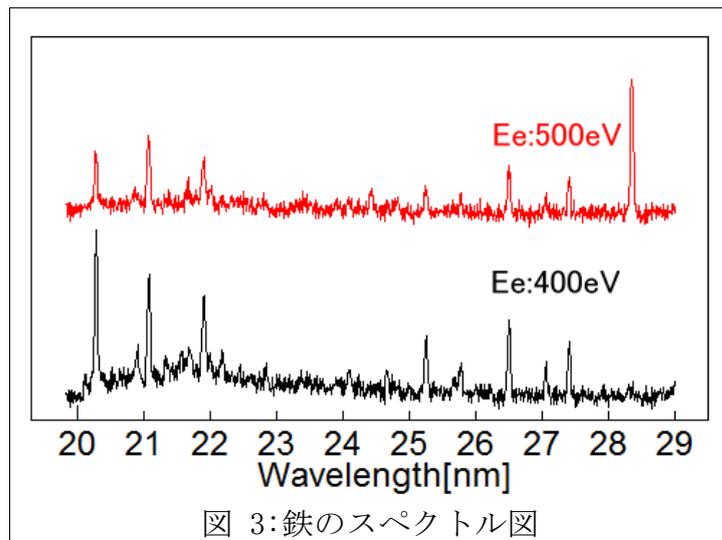


図 3: 鉄のスペクトル図

次にタングステンについて、13 価のイオンが生成される付近のビームエネルギー数箇所分光測定を行った。その結果を図4に示す。電子ビームエネルギーが 200eV ではタングステン 10 価が、同様に 220eV では 11 価が、240eV では 12 価が、280eV では 13 価数のタングステン多価イオンが生成される。今回観測したラインの同定について、200eV、220eV、240eV で観測したラインは NIST Atomic Spectra Database で過去にタングステン 13 価として報告されているラインと近い波長であり、280eV で観測したラインについては、これまでに観測例のないものとなっている。

表 1: タングステン多価イオンの発光ラインの波長比較

価数	電子ビームエネルギー (eV)	実験値 (nm)	文献値 (nm) [3]
10	200	26.147	26.110
11	220	25.771	25.838
12	240	25.401	25.384
13	280	24.319	none

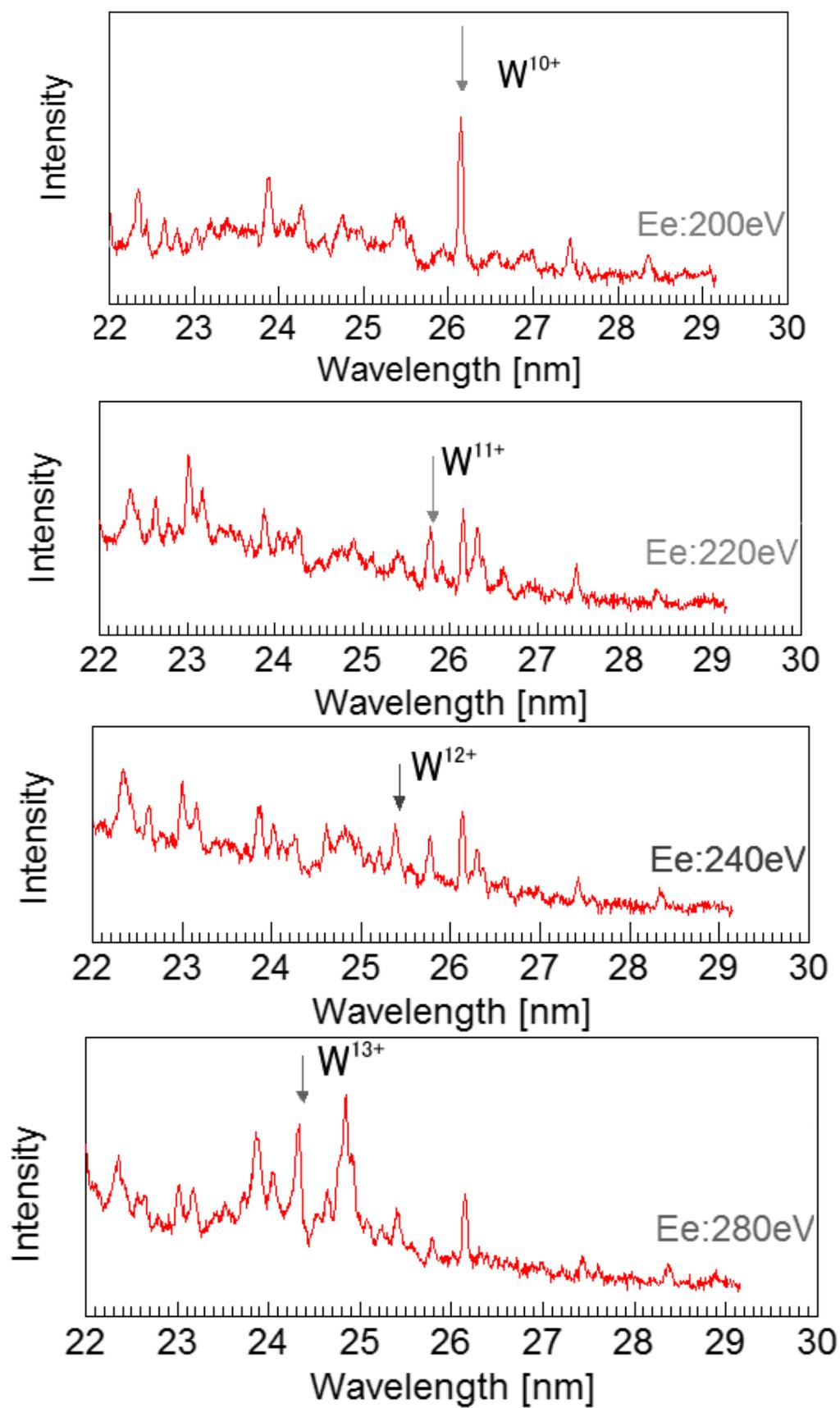


図 4: タングステン多価イオンの電子ビームエネルギー依存スペクトル

・まとめと今後の展望

本実験では小型電子ビームイオントラップを用いてタングステン多価イオンの極端紫外領域での発光を観測した。波長領域 22~29nmn において、11 価~13 価のタングステン多価イオンからの発光と思われるラインを確認することができた。NIST のデータベースではこれら全てが 13 価のラインと同定されているが、エネルギー依存を見る限り、明らかに 13 価ではないものがある。また、ラインの波長についても実験値と文献値で差異が見受けられる。更に詳しく調べるため、波長較正を再確認した上での追試や、回折格子と CCD の間に二次光遮断フィルターを設置した上で再測定などを行う予定である。また、今回は低価数のタングステン多価イオンについて長波長側の分光測定を行ったので、短波長側での測定や、より高価数なイオンでの測定を行っていく予定である。

参考文献

[1]中村・大谷、日本物理学会紙 52(1997) pp. 919-923

[2]菊池氏修士論文 電気通信大学

[3]M. J. Vilkas and Y. Ishikawa, Phys. Rev. A77, 042510(2008)