

小型電子ビームイオントラップを用いた 多価イオンの可視スペクトルの観測

中村信行研究室 左古田 淳平

・背景と目的

原子から電子を2個以上取り除いたイオンを正の多価イオンと言う。多価イオンは太陽コロナや核融合プラズマ中に多く存在するため、それらのプラズマの診断や制御を行う際には多価イオンの知見が必要となる。現在、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)と呼ばれる大型核融合炉の計画が、2018年ごろの運転開始を目指して、日本やアメリカなど7カ国の国際プロジェクトによって進められている。この計画は、核融合炉工学技術の実証が目標とされている。このITERの中にプラズマ中の不純物を排出する役割を持つダイバータと呼ばれる部分がある。このダイバータにはタングステンが用いられることになっているが、そのタングステンがスパッタリングにより不純物としてプラズマに混入し、X線を放出し、その放射冷却によりプラズマの温度を下げることが問題視されている。したがって、次世代の核融合実験炉を制御・診断し、計画を成功に導く上で、タングステン多価イオンの素過程や放射特性は極めて重要であり、遷移波長、遷移確率、衝突断面積などのデータが必要とされている。特に、可視領域の遷移線はX線や真空紫外線と違い、真空を用意する必要がない等診断において非常に有用であるが、2価以上のイオンについては全くデータがないと言えるほど、データが不足している。

以上のことから観測対象としてタングステンを選び、可視領域で未同定ラインの観測を行った。

・原理と装置

Electron beam trap(EBIT)の原理を図1に示す。電子銃、ドリフトチューブ(DT)と呼ばれる円筒電極、電子コレクターで構成され、DTは更に3つの電極に分割されている。DTの周りには超伝導コイルを配置し、軸方向の強磁場を形成する。電子銃から出射した電子ビームは電位によって加速され、磁力線に沿って径方向に圧縮されながらDTに入射する。ビームの動径方向には電子ビームの空間電荷ポテンシャル、軸方向はDTに加える井戸型ポテンシャルによってイオンをトラップする。DT内部に閉じ込められたイオンが電子の逐次衝突を受け、電離が進み多価イオンが生成される。大雑把に言って、電子エネルギーが生成するイオンの最高価数を、電子ビーム電流が生成するイオン量をそれぞれ決定する。今回実験では、コイル材に高温超伝導材を用いたことにより液体窒素での運転が可能な小型EBIT(通称CoBIT)を用いた。このCoBITは電子ビームエネルギー $\sim 2.5\text{keV}$ 、ビーム電流 $\sim 20\text{mA}$ 、中心磁場 $\sim 0.2\text{T}$ を最大として、主に10 \sim 20価程度のイオン生成に適している。

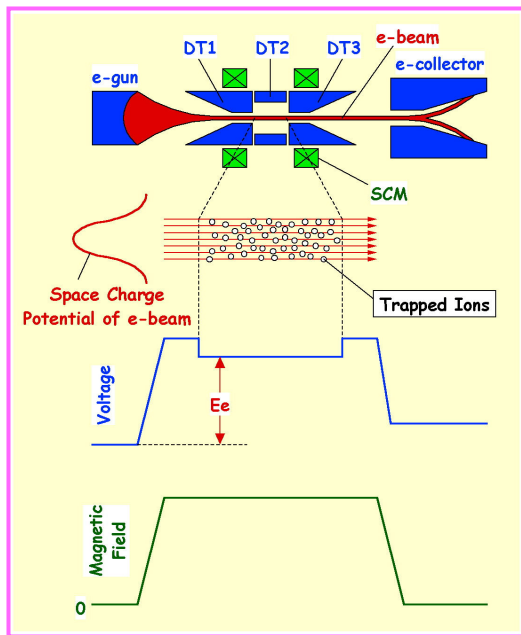


図1 .EBIT の原理

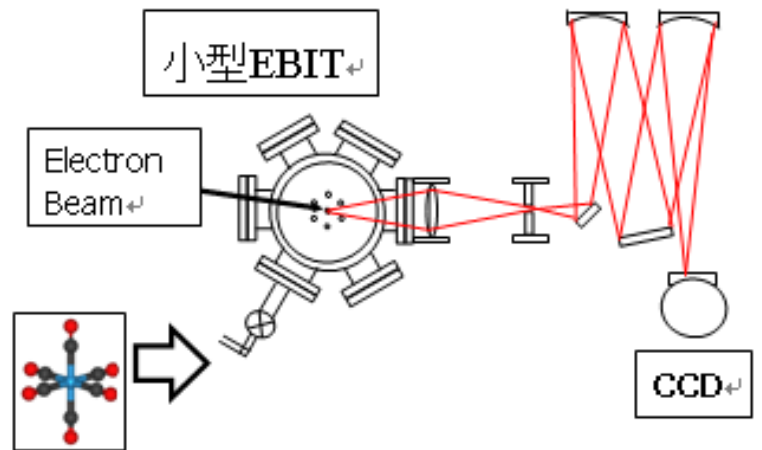


図2. 実験概略図

・実験について

図2に実験装置の概略図を示す。回折格子は溝本数 1200 本/mm、スリット幅 0.01mm でツェルニーター型分光器を用いた。分光器は Ar ランプを用いて 400~460nm の波長領域を校正した。CCD は ROPER SCIENTIFIC 社製の液体窒素冷却型 CCD(LN/CCD-1100PB/VISER/1)を用いた。CoBIT 内の圧力を $\sim 8.0 \times 10^{-8}$ Pa の高真空中に保ち、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導入し、10mA のビーム電流によりタングステンを生成した。ビームエネルギー200~1300eV で生成した多価イオンからの光をツェルニーター型分光器に導いて分光測定した。

・結果

図3はビームエネルギー360~450eV で得られたスペクトルである。横軸が波長、高さが強度を示している。例えば、 W^{16+} イオンのイオン化エネルギーは 387eV であるため、ビームエネルギーが 360eV の時には W^{17+} を生成することが出来ない。従って、イオン化エネルギーを超えた 400eV になって初めて現れる 455nm 付近のラインは、 W^{17+} のものであると考えることが出来る。同様に、 W^{17+} のイオン化エネルギー(426eV)を超えた 450eV で初めて現れる 435nm 付近のラインは W^{18+} のものであると考えることができる。このように電子エネルギーに対する依存性を詳細に調べることで、そのラインの帰属(イオンの価数)を同定することが出来る。

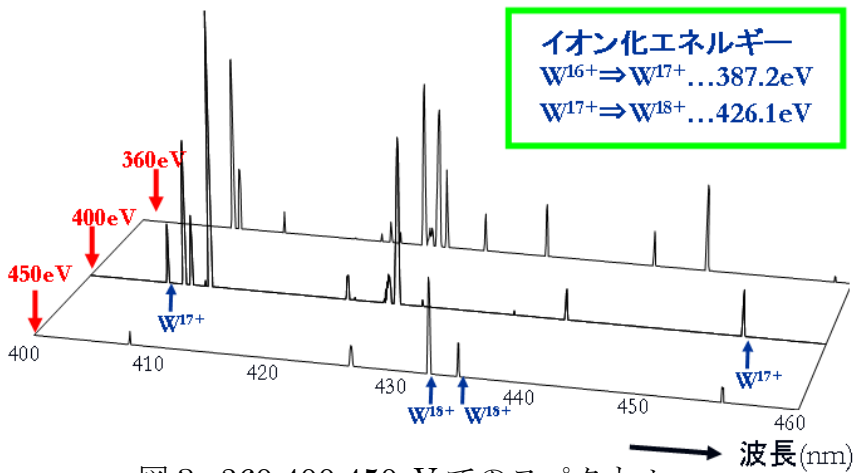
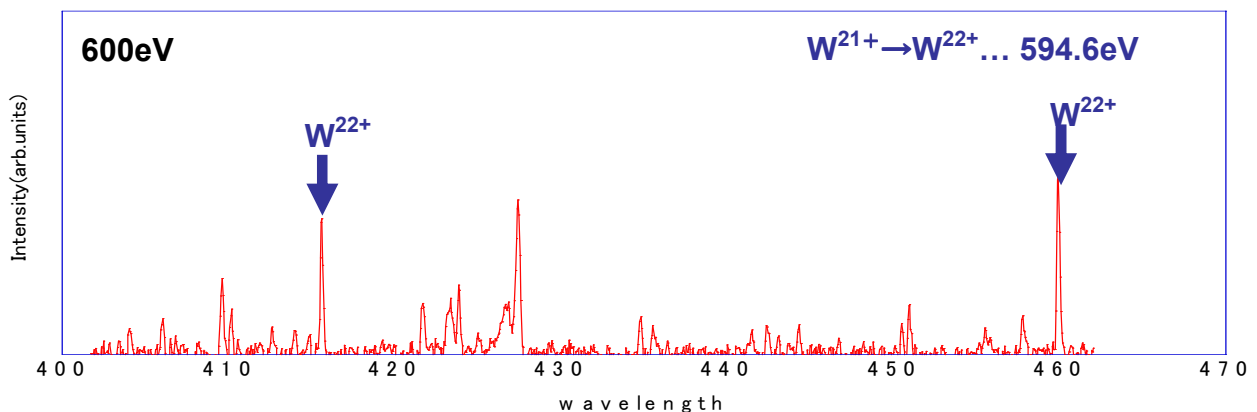
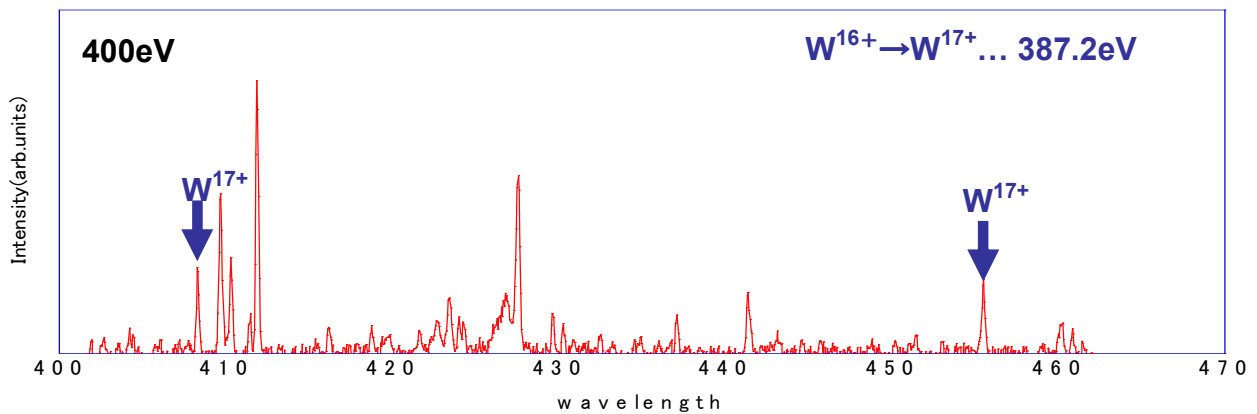


図 3. 360,400,450eV でのスペクトル

図 4 に、電子ビームエネルギー400~1300eV でのスペクトルを示す。ビームエネルギー400eV では上述の通り、 W^{17+} のラインが現れている。600eV の時には W^{22+} のイオン化エネルギーを超えており、 W^{22+} のラインが現れている。700eV の W^{24+} も同様であるが、イオン化エネルギー643.2eV の W^{23+} による強いラインも現れている。今回観測したこれらのタングステンラインは全て、これまでに観測された例のないものである。なお、1300eV の時に波長 428nm 付近に現れるスペクトルは今回測定したエネルギーのスペクトル全てに現れており、ビームエネルギーに依存しないことが分かったので、酸素などの不純物のスペクトルであると考えられる。



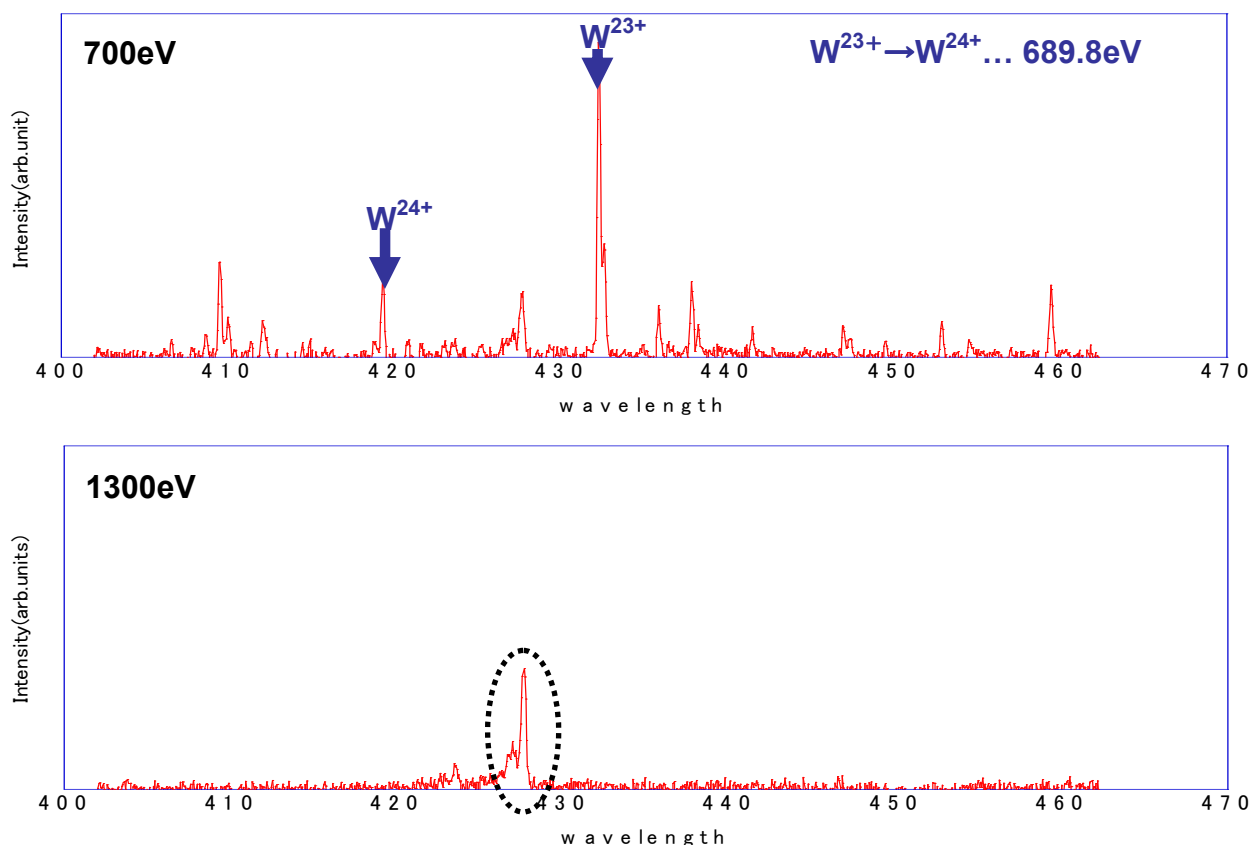


図4. スペクトルの変化とイオン化エネルギー

・まとめ

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可視領域の発光を観測した。

今回は 400～460nm の波長領域においてビームエネルギー依存性を調べることで、13 価～25 価のタングステン多価イオンに帰属すると思われる多くのラインを確認することができた。本測定により、価数は大よそ特定することができたが、今後はこれらのラインがどのような準位間の遷移によるものであるか理論計算との比較などにより同定したい。

また、460nm 以上の波長領域でも同様に測定を行っていく予定である。

《参考文献》

中村信行、大谷俊介：日本物理学会誌 52(1997) P119

菊地浩行 他 日本物理学会第 62 回年次大会 21pRF-7