

二電子性再結合からの X 線観測

中村信行研究室 市東 佑介

● 背景と目的

核融合実現に向け国際熱核融合実験炉 ITER の建設が進められている。ITER プラズマ中の不純物を取り除くなどの役割を持つプラズマ対抗壁ダイバータはタングステンが使用される予定である。スパッタリングによりタングステン原子がプラズマ中に流入すると多価イオンとなり電子と再結合するなどして X 線を放出し放射冷却を起こすためこれを解決する必要がある。多価イオンと電子の再結合過程には放射性再結合(Radiative Recombination : RR)と二電子性再結合(Dielectronic Recombination : DR)があるが、特に共鳴過程である DR の断面積を調べるのが求められている[1]。我々の研究室では多価イオンの X 線観測のために電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap : EBIT)型イオン源 Tokyo-EBIT を使用しているが、近年は装置不具合のため観測が行えていなかった。本年度修復作業が終了したため Tokyo-EBIT を用いて DR が観測可能か試運転を行う必要があった。

以上から本研究はタングステン多価イオンの DR からの X 線を観測及び観測された X 線の共鳴幅から電子ビームエネルギーの広がりを出し Tokyo-EBIT の状態診断を行うことを目的とした。

● 原理と実験

i. 放射性再結合(Radiative Recombination : RR)

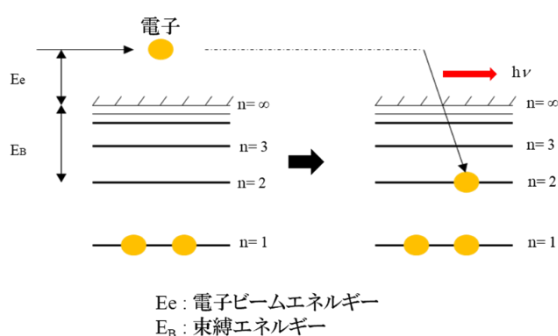


図 1. RR 模式図

図 1 に RR の模式図を表す。RR は多価イオン近傍を通過する電子が多価イオンに捕獲され、その際に X 線を放出する。放出される X 線のエネルギーは電子ビームエネルギーと多価イオンの捕獲準位での束縛エネルギーの和で与えられる。この過程はあらゆる電子エネルギーで生じる非共鳴過程である。

ii. 二電子性再結合(Dielectronic Recombination : DR)

図 2 に DR 過程の模式図を示す。DR 過程は自由電子が多価イオンに捕獲されると同時に内殻電子を励起させ二電子励起状態を形成した後脱励起して X 線を出すことで安定化する過程である。DR が RR と異なるのは図 2 において $E_1 = E_2$ となる条件下でのみ生じる共鳴

過程という点である．つまり DR は特定の電子エネルギーで大きな断面積を持つ．

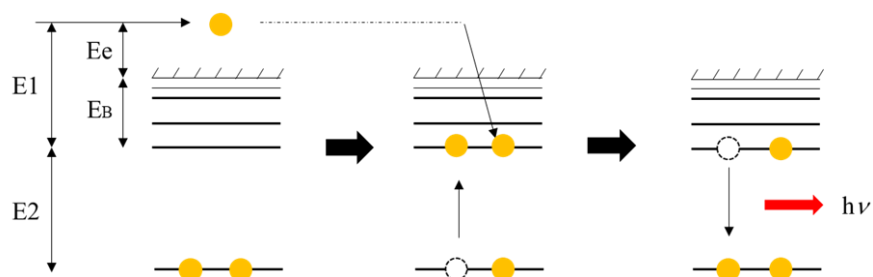


図 2. DR 模式図

iii. 観測システム

図 3 に本実験で使用した DR 観測システムを示す．本実験では電子ビームエネルギーを 38 - 44 keV の範囲で掃引した．電子ビームエネルギーは電子銃の電位を -44 kV に固定した上で DT2 の電位を図 4 に示す波形で制御することにより掃引した．X 線の観測には Ge 検出器を使用した．測定条件を表 1 に示す．

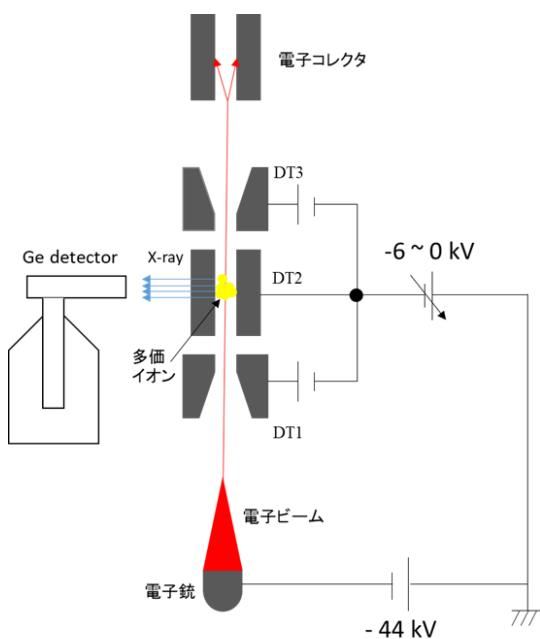


図 3. DR 観測システム

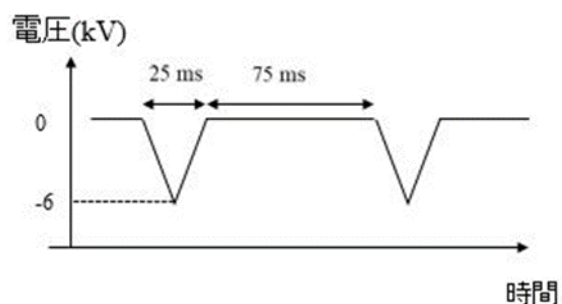


図 4. DT2 制御波形

表 1. DR 測定条件

磁場	4 T
電子ビームエネルギー	38 - 44 keV
電子ビーム電流	~ 72 mA

● 結果

図 5 に観測されたタングステン多価イオンからの X 線スペクトルの電子エネルギー依存性を示す．図 5 は横軸が X 線エネルギー，縦軸に電子ビームエネルギーをとっており，X 線の強度が強くなるにつれ順に黒，青，白色へと変化している．図 5 から，主量子数 $n = 2, n$

= 3, n = 4 への RR による X 線が観測された。また、X 線強度の電子ビームエネルギー依存性を調べるため、図 5 中の赤の直線で囲んだ X 線強度の電子ビームエネルギー依存性を図 6 に、青の直線で囲んだ X 線強度の電子ビームエネルギー依存性を図 7 に示す。図 6 と図 7 より特定の電子ビームエネルギーにおいて X 線強度が大きくなっていることが分かる。これらは DR に由来する X 線であると考えられ、先行研究[2]との比較により荷電状態の同定を行った。

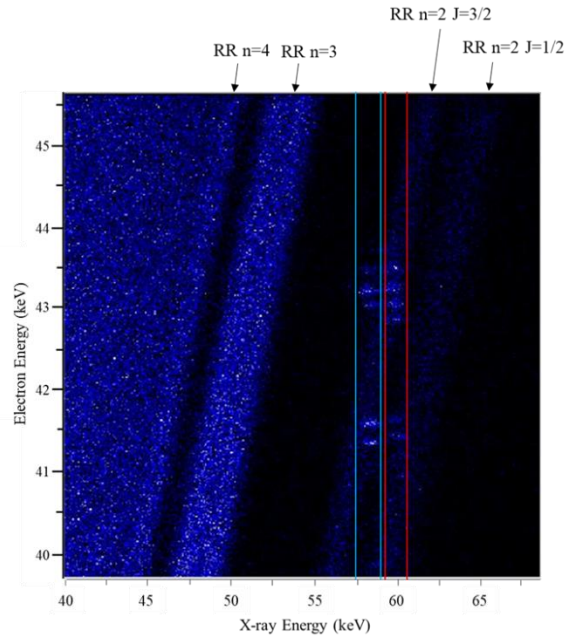


図 5. X 線スペクトルの電子エネルギー依存

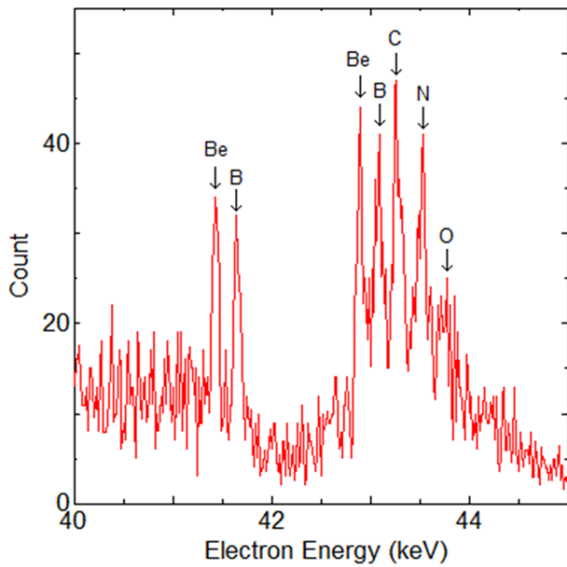


図 6. X 線強度の電子ビームエネルギー依存性(1)

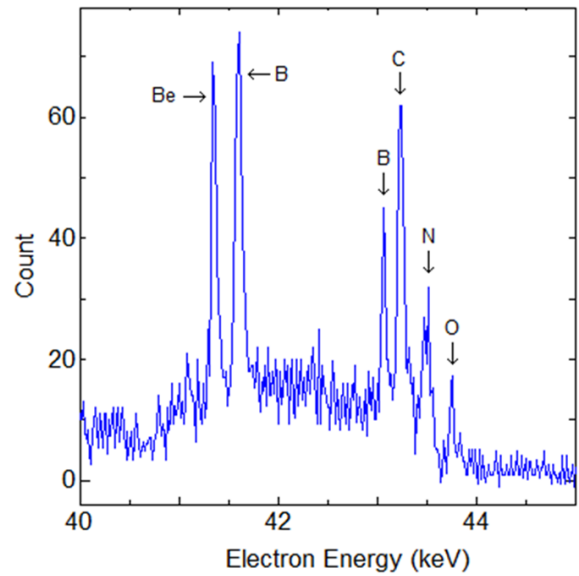


図 7. X 線強度の電子ビームエネルギー依存性(2)

過去経験則から Tokyo-EBIT における電子ビームエネルギーの広がりには電子ビーム電流値とおおよそ線形的と考えられている。もし電子エネルギー幅が実績より大きいようであれば Tokyo-EBIT に不具合があると判断する基準となる。そこで過去の測定結果と本実験で得られた電子ビームエネルギー広がりとの比較を表 2 に示す。

表 2. 先行研究と本実験の比較

	先行研究[3]	先行研究[4]	本実験(1)	本実験(2)
電子ビーム電流(mA)	40	50	72	72
ビームエネルギー広がり(eV)	40	65	67±7	72±5

表 2 より、本実験で得られた電子ビームエネルギー広がりへの電子ビーム電流値に対する依存性は以前と変わらないといえるので、Tokyo-EBIT に不具合があるとは考えにくく、正常な状態に復旧したといえる。

● まとめ

Tokyo-EBIT を用いてタングステン多価イオンの DR による X 線を観測し、得られたエネルギー依存スペクトルから先行研究との比較により荷電状態の同定を行った。また、得られた DR の共鳴幅から電子ビームエネルギー広がりを出し、Tokyo-EBIT の状態診断を行った。

今後は掃引するエネルギーを変え DR の測定データを蓄積し、断面積の算出といった共鳴過程の解析を試みる。

● 参考文献

[1] Z. Wu et al., *Atoms* 2015, 3(4), 474-494
 [2] A. J. Gonzalez Martinez, et.al., *PhysRevLett.*94.203201 (2005)
 [3] 平成 24 年度 胡民智氏 博士論文
 [4] Z.Hu, et.al., *PhysRevLett.*108.073002 (2012)