

多価イオン分光計測による対向壁からのタングステン不純物の 放出および電離過程

The spectroscopy of highly charged tungsten ions and spattered tungsten atoms from the plasma wall.

坂上裕之¹、加藤太治¹、村上泉¹、森田繁¹、本橋健次²、酒井康弘³、
山本則正⁴、中村信行⁵

Hiroiyuki A SAKAUE¹, Daiji KATO¹, Izumi MRAKAMI¹, Shigeru MORITA¹, Kenji
MOTOHASHI², Yasuhiro SAKAI³, Norimasa YAMAMOTO⁴ and Nobuyuki NAKAMURA⁵

核融合研¹、東洋大²、東邦大³、中部大⁴、電通大レーザー⁵
NIFS¹, Toyo Univ.², Toho Univ.³, Chubu Univ.⁴, ILS/UED⁵

タングステンは、熱負荷に強く、損傷・損耗の少ないプラズマ対向材料として、ITERや次期核融合装置において導入が検討されている。しかし、一度スパッタリングにより不純物としてプラズマ中に供給されると、電離が急激に進み高価数の多価イオンとしてプラズマ内部に蓄積されてしまう。タングステンは高電離化により高い内部エネルギーを取得するが、プラズマを加熱するエネルギーが多価イオンの電離エネルギーに費やされ、それが脱励起や再結合過程により光として放出すると大きな放射損失量となりプラズマを冷却することが懸念されている。従って炉壁からのタングステン不純物の放出とプラズマ内の挙動を知るため、制御されたタングステンの放出・電離実験と多価イオンを含む分光計測が非常に重要となる。

我々は、核融合装置におけるタングステン不純物の放出及び電離をイオン・電子ビームによって模擬し、高度な分光計測によりその素過程を明らかにするとともに、LHD等へその知見を生かすことを目的とした研究を進めている。本研究では、まずタングステン金属表面にイオンビームを照射し、スパッタリングによって放出される励起タングステン原子を表面法線に対して90°方向で分光計測を行った。図1に代表的なスペクトルを示す。スパッタされた励起タングステンからの発光線が11本観測され、それぞれ発光強度の表面法線方向Z依存性から、Z方向平均速度を求めた。図2がline Aの発光強度Z依存性であり、その平均速度は $\langle v \rangle = 5.7 \pm 1.0 \text{ km/s}$ となった。それぞれの励起状態の平均速度は励起機構と相関があることが示唆された。

一方、プラズマ中の高電離化した不純物タングステニイオンの分析のための発光ラインの同定手法は、多電子系による放出スペクトルの複雑さ故に、未だ確立されていない。我々は、この困難を

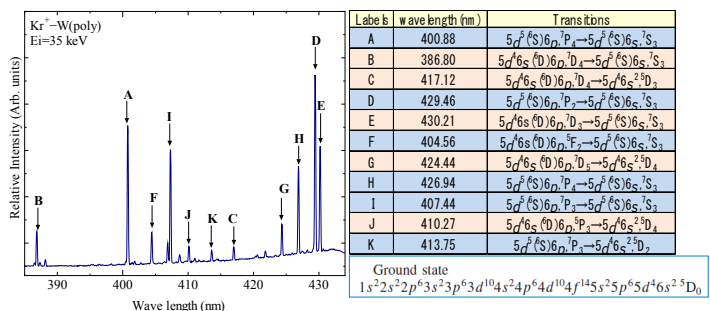


図1 Kr⁺のタングステン表面照射での発光スペクトル(Ei=35keV)。

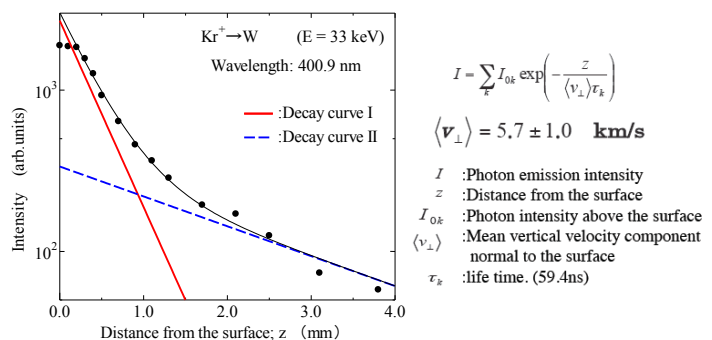


図2 発光ライン(line A)強度のZ依存性およびZ方向平均速度。

克服するために独自に多価イオン源CoBIT(Compact Electron Beam Ion Traps)[2]を開発した。図3にCoBITの概略図を示す。この多価イオン源は、高効率に多価イオンを生成することが可能で、トラップ領域にイオンを閉じ込め、その多価イオンからの発光を連続的に観測することができる。電子エネルギーは数keVから100eV程度まで可変で、生成されるタングステン多価イオンは W^{40+} から W^{10+} 程度まで可能であり、これはちょうどLHDであれば、ダイバータ・周辺プラズマからコアプラズマ付近までで存在しうるタングステン多価イオンの価数である。図4にタングステン多価イオンのEUVスペクトルを示す。今回はイオン源トラップ内にタングステン多価イオン $W^{19+} \sim W^{35+}$ を生成し、その多価イオンの極端紫外(EUV)分光測定を波長範囲10~300Åで実施。電子エネルギー依存性を測定し、15~45Å付近に6g-4f, 5g-4f, 5f-4d, 5p-4d の遷移を初めて同定することに成功した。図5-1, 2にそれぞれ電子エネルギー $E_e=950, 1370$ eV のEUVスペクトルを示す。また我々は、これらの実験から得られたデータを基に、独自に衝突輻射モデル(CRモデル)を構築し、そのスペクトルの再現を試み、それによりピークの同定が可能となった。

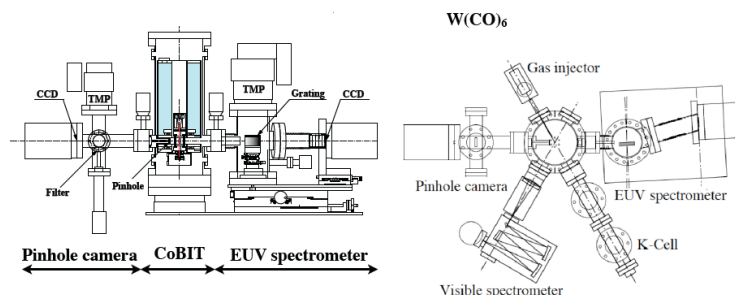


図3 CoBIT 実験装置および EUV 分光装置の概略図。

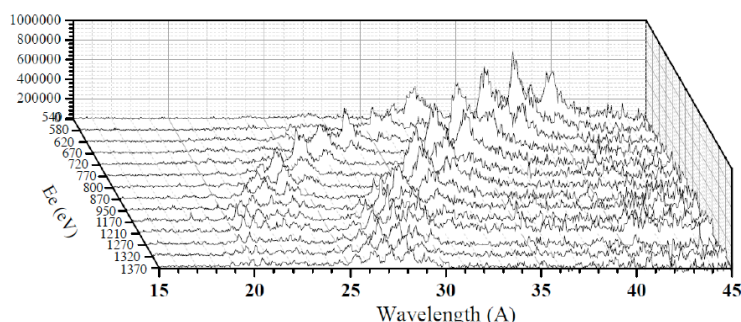


図4 タングステン多価イオン EUV スペクトルの電子エネルギー依存性。

内殻励起過程の寄与が強い場合があることや高励起状態からの寄与が示唆される結果も出てきた。またCoBIT のスペクトルとCRモデルの比較によりモデルの精度が向上し、ドイツのASDEX Upgrade トカマク装置や核融合科学研究所のLHDヘリカル装置のタングステンEUVスペクトルと比較し、それらのプラズマからの発光線の同定も可能となった。図5-3はLHDのスペクトルのラインをCoBITのスペクトルから同定した例である。当日は、これらの結果の詳細について紹介する。

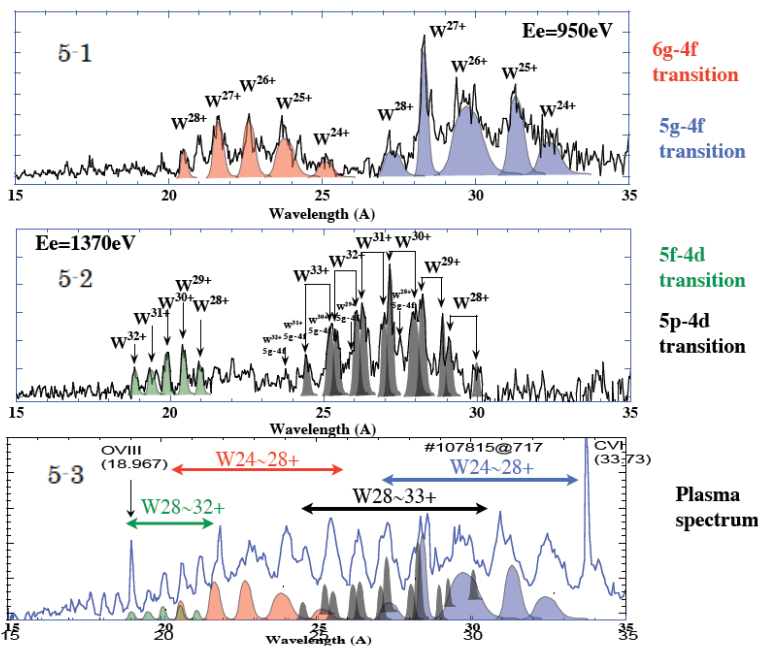


図5 5-1, 5-2それぞれ $E_e=950, 1370$ eV の CoBIT の EUV スペクトル
5-3 LHD における EUV スペクトル($E_e \sim 1000$ eV)。

[1]K.Motohashi et al., NIM B 283 59-62 (2012)

[2]N.Nakamura et al., Rev. Sci. Instrum. 79, 063104 (2008)