

小型電子ビームイオントラップを用いたタングステン多価イオンの分光計測

坂上 裕之

原子は、中心部分に正の電荷を持った原子核とそれを取り巻く複数の電子から成っていて、その一つの電子を取り去るとイオンになります。これらを一価のイオンと呼びます。Na⁺やK⁺など健康飲料等でおなじみのイオンがそうです。一つの電子ではなく複数の電子を取り去ることも可能で、そのようなイオンを多価イオンと呼び、取り去られた電子の数がq個のときq価の多価イオン(図1)と呼びます。

核融合プラズマのような高温プラズマの中では、原子はプラズマ内の高エネルギー電子と衝突を繰り返し、次々と電子を剥ぎ取られ

多価イオンになってしまいます。特に重たい原子、例えば核融合装置の壁(プラズマ対向壁)に使われるタングステン(W)という熱に強い金属の原子1個あたりには74個もの電子が取り巻いています。そのようなタングステン原子が、粒子衝撃により壁から叩き出され、ひとたび不純物としてプラズマ内部に混入すると、どんどん電子が剥ぎ取られ(イオン化)40価、50価のタングステン多価イオン(W⁴⁰⁺、W⁵⁰⁺)がプラズマ中に存在することもありえるのです。このような多価イオンはエネルギーを光として外に放出してしまうというやっかいな現象を引き起こしてしまいます。せっかくプラズマを温めているのに、混入した不純物多価イオンが冷やしてしまうわけです。従って核融合を研究する上でプラズマ中でのタングステン多価イオンの発光や挙動を知ることが非常に重要となってくるのです。そこで我々は、独自に多価イオン源Compact Electron Beam Ion Trap(CoBIT)を開発し、タングステン多価イオンをイオン源内部で制御して生成することで、核融合プラズマ中に存在するであろうタングステン多価イオンの生成過程や発光過程の基礎研究を進めています。

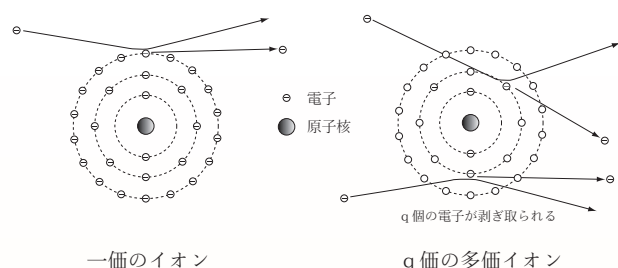


図1 多価イオンのイメージ図です。

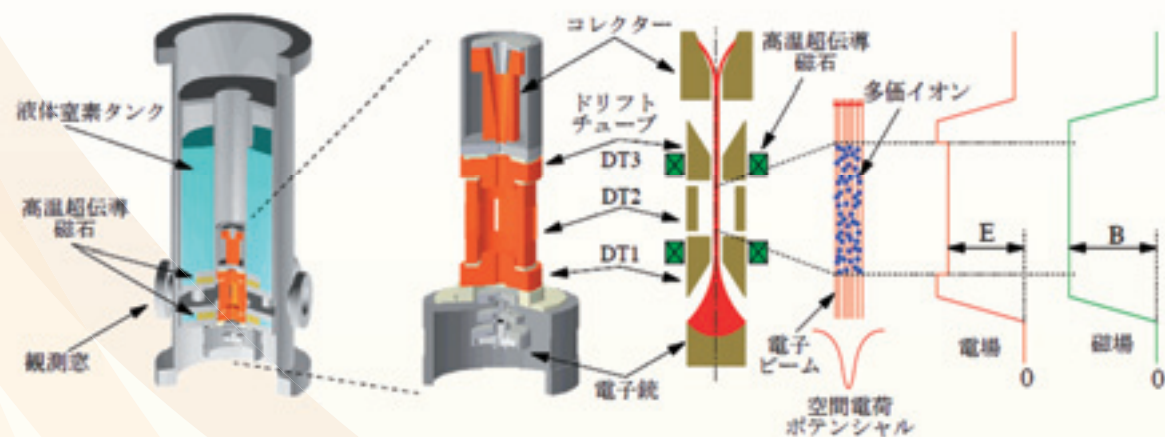


図2 CoBIT(小型電子ビームイオントラップ)の概略図です。

CoBITは電子ビームイオントラップと呼ばれる多価イオン源の一種で、図2にその概略図を示します。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、閉じ込め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ます。CoBITはイオンを閉じ込める装置とそれを貫く高エネルギー電子ビームから成り、その主な構成部品は、電子銃、ドリフトチューブ(DT1~3)、電子コレクター、超伝導磁石です。ドリフトチューブは三つに分割された円筒型電極から成り、そこに井戸型の電場Eを印加することによって井戸の部分にイオンを閉じ込めます。電子ビームの径方向には、超伝導磁石による軸方向の強磁場Bと高密度に圧縮された電子ビームのマイナスの空間電荷ポテンシャルによって(プラス)イオンを閉じ込めます。このように三次元的に閉じ込められたイオンは、高エネルギー電子によって一価が二価、二価が三価というように次から次へと電子を剥ぎ取られ多価イオンになっていきます。閉じ込められた多価イオンからの光は、観測窓から分光器に導かれ、波長に分けて観測されます。今回、我々は、このイオン源専用の分光器も独自に開発し、非常に弱い光までも観測できるようになりました。CoBITの電子ビームは、種々のプラズマ光源のような広がったエネルギーを持つ電子とは異なり、エネルギーをある決まった値にすることが可能で、多価イオンの価数を制御しやすく、従って発光線の解析も非常にシンプルになり、研究がしやすいという非常に大きな利点があります。この利点を利用し、核融合プラズマで発光するタングステン多価イオンの複雑なスペクトル(光を波長で分けたもの)をCoBITで観測した比較的シンプルなスペクトルと比較することで、その発光線群がどのような価数のイオンから光っているのかなどを解析することが可能になりました。

図3(a),(b)は、それぞれ2つの異なる電子エネルギーでの、CoBITで観測された、極端紫外(EUV)と呼ばれる波長領域のタングステン多価イオンの発光線スペクトルです。電子エネルギーの違いにより、強く発光している、つまりCoBITの中に存在する割合の大きなタ

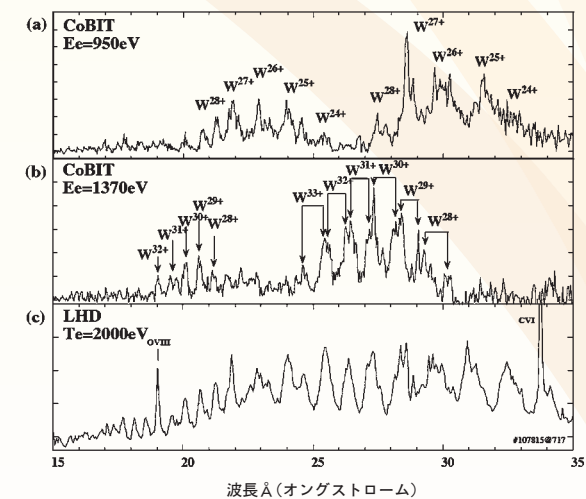


図3 (a),(b): タングステン多価イオンの価数を同定したCoBITのタングステン発光スペクトルです。それぞれ電子ビームエネルギーEe=950eV,1370eVです。エネルギーが高いと、より価数の高い多価のイオンが生成されていることが分かります。(c): LHDにタングステンペレットを入射したときの発光スペクトルです。プラズマ中心部での電子温度がおよそ3千4百万度(Te=2000eV)のときに観測されたものです。CoBITで同定した発光線群に対応したピークが表れているのが分かります。横軸の波長λ(オングストローム)の1Åは一億分の1センチメートルです。また図中、O VIIIは7価の酸素イオン、C VIIは5価の炭素イオンからの発光線をそれぞれ示しています。

ングステン多価イオンの価数が違うことがわかります。図3(c)は、大型ヘリカル装置(LHD)へタングステンのペレット(固体粒)を入射した時に観測されたEUV領域での典型的な発光線スペクトルです。これらを比較するとCoBITで現れる発光線のピークがLHDのスペクトルに表れるピークにそれぞれ対応していることが分かります。このようなプラズマからの発光線の詳細な同定は、CoBITによって初めて可能となりました。

このようにプラズマ中の多価イオンの解析に非常に有効なツールであるCoBITは、電気通信大学との共同研究により独自に開発された実験装置です。我々は本装置によって、低エネルギー領域では世界に先駆けて重元素多価イオンからの発光線スペクトルの研究を始めました。今後もより精度の高い、体系的な多価イオンデータを提供していく予定です。

(核融合システム研究系 助教)