

# 低速タングステニオン-気体衝突における電荷移行断面積に関する研究

(環境計測) 黒 裕二

## 1. はじめに

電荷移行とは、イオンと原子・分子の衝突において、電子が一方から他方に移行する反応である。電荷移行は原子物理学の観点だけでなく、核融合制御においても重要な衝突過程のひとつである。核融合炉においては炉壁から放出された不純物イオンが、プラズマ中の水素やヘリウムと電荷移行衝突を起こし、プラズマを冷却するなどの影響を与える。したがって、不純物イオンの電荷移行断面積に対する知見は、核融合プラズマの診断や制御等、核融合炉設計のための基本となる[1]。近年、プラズマ対向壁であるダイバータの材料として高融点金属のタングステンが検討されている。一方、タングステニオンと水素やヘリウムとの電荷移行断面積測定データは現状ではほとんど存在しない。

本研究は、タングステニオンと気体衝突における電荷移行断面積を測定するための装置を開発し、断面積の絶対値測定を行うことを目的としている。特に、不純物の含まないタングステニオンの生成、標的气体（水素、ヘリウム）の精度のよい圧力測定、そして電荷移行で生成した中性タングステンとタングステニオンの十分な分離と検出、に留意して装置を開発した。

## 2. 実験装置の開発

### 2.1 タングステニオンの生成

金属イオンを生成するイオン源として代表的なものはスパッタ型、蒸発型、レーザー型等がある。今回扱う金属が融点の高いタングステンであること、そしてイオン源の仕組みが容易であることからスパッタ型イオン源を製作した。

実験装置の全体図を図1に示す。20 keV-Ar<sup>+</sup>イオンでタングステン板を衝撃し、スパッタされたイオンを目的の加速電圧で引き出す。45° 偏向用分析電磁石と2台の1×1 mm<sup>2</sup>幅のスリットを用いて、引き出したイオンからタングステニオンを選択し、イオンビームを生成する。

目的のタングステニオンが生成されているか確かめるため、上記の分析磁石を用いて質量分析を行った。その結果を図2に示す。横軸

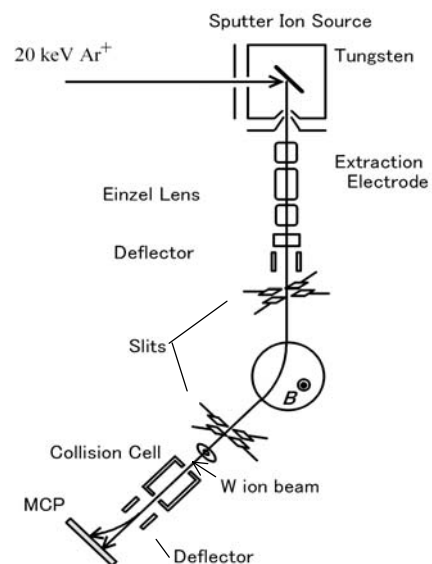


図1 実験装置概略図

は(質量数/電荷数)<sup>1/2</sup>で、縦軸は検出されたイオン数を表している。また比較として、タンタルイオンの質量分析を行った。結果を破線で示す。図に見られるように、1価のタングステンイオン及びその酸化物イオン、さらにそれらのクラスターイオンが分離されていることが分かる。一方、タンタルイオンのピークに対してタングステンイオンのピークが広がっている。これは、タングステンに同位体 (<sup>182</sup>W:26.5%、<sup>183</sup>W:14.3%、<sup>184</sup>W:30.6%、<sup>186</sup>W:28.4%)

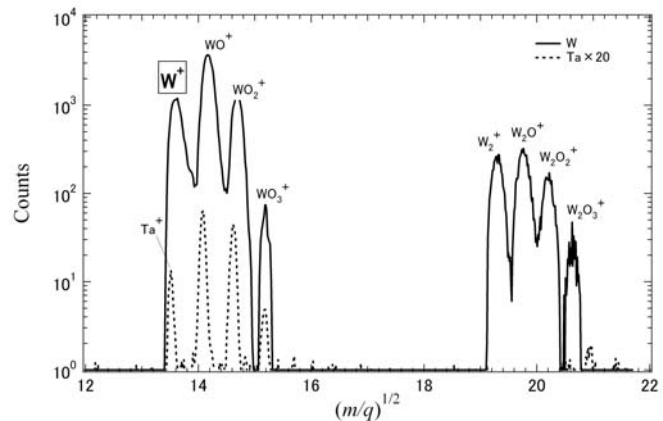


図2 タングステン (実線) 及びタンタル (破線) の質量分析スペクトル。加速電圧は1 kVである。タンタルの収量は実際の1/20で表している。

が存在し、タンタル (<sup>181</sup>Ta:100%) には同位体が存在しないためである。

タンタルピークの半値幅  $\Delta m$  から見積もった質量分解能  $m/\Delta m$  は74である。よって、本装置ではタングステン同位体同士の分離はできない。だが、同位体の違いによる電荷移行断面積に対する影響は、タングステンのような質量の非常に高いイオンにおいては無視できる[2]。

## 2. 2 衝突ガスセル

気体標的はガスセル法を用いて準備し、この標的にタングステンビームを衝突させた。ガスセルのサイズは長さ40 mm、ビーム入口孔1 mm  $\phi$ 、出口孔3.5 mm  $\phi$ である。出口孔の方が大きいのは、気体衝突によるビームの散乱広がりを考慮したためである。入口、出口孔からガスは真空槽内に漏れ出てしまうが、超高真空用微量流量調整バルブを用いてセル内にガスを一定に流し続け、測定中にガス圧が変動しないよう調整する。

このとき断面積の絶対値を決めるには精度のよいセル内のガス圧測定が重要である。そこで、絶対真空度測定が可能な容量型マノメータ (MKS-Baratron、以下バラトロン) を用いた。バラトロンの測定誤差は周囲の温度に依存し、 $2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}/^\circ\text{C}$ である。測定する際のガス圧は  $10^{-2} \text{ Pa}$  台なので、この誤差は無視できない。そこで、バラトロン周囲の温度変化を熱電対で測定し、バラトロンの出力と熱電対の出力をリアルタイムにコンピュータに記録することで、データ解析時にガス圧の測定値を補正できるようにした。

## 2. 3 中性粒子とイオンの分離及び検出

電荷移行で中性化された粒子とイオンを静電デフレクタの電場で分離し、2次元位置検出用MCP(Micro Channel Plate) [3]で検出した。静電デフレクタからMCPまでの距離は35 mmで、MCPの有効寸法は縦13 mm  $\times$  横45 mmである。この方法では、中性粒子とイオンが検出器上で十分離れた位置で検出できるかどうか、またそれらを識別できるだけの位置分解能を検出器が持つかが問題となる。

例として、実際に加速エネルギー1 keVのH<sup>+</sup>を入射ビームとし、H<sub>2</sub>を標的として測定した場

合 ( $H^+ + H_2$ ) の位置スペクトルを 3(a) に示す。横軸と縦軸はそれぞれ検出器の水平と垂直方向を表している。白くなっている部分ほど、より多くの収量があることを示す。これを 1 次元に射影したスペクトルが図 3 (b) である。横軸は下の図と対応しており、縦軸は収量を表している。実線がセル内に  $H_2$  ガスを導入した場合、破線がバックグラウンド真空度の場合のスペクトルである。ガスを流すことで  $H^+$  ピークに対する  $H$  ピークの収量が増えていることが分かる。ガスを流した場合、MCP 上での  $H^+$  ピークの半値幅は 1.8 mm で、 $H$  ピークの半値幅は 2.2 mm である。検出面の水平方向の長さは 45 mm であり、図を見ると分かるように 2 つのピークが十分に分離していることを確認できる。

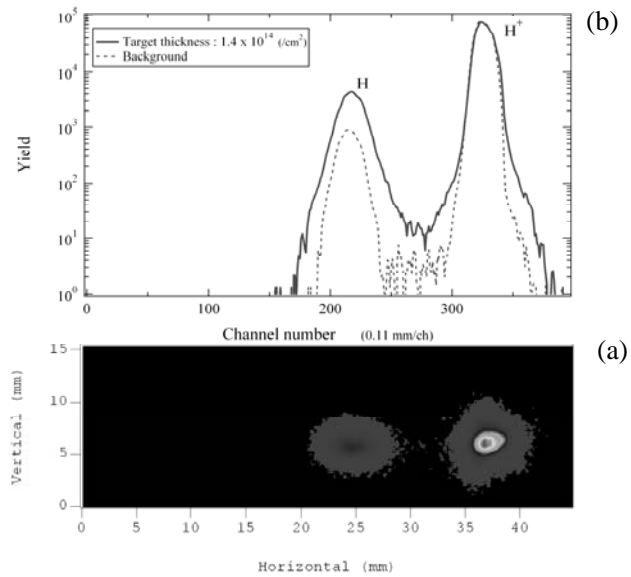


図 3  $H^+$  と  $H$  の 2 次元位置スペクトル  
及び 1 次元射影スペクトル

### 3. 測定

$W^+ + H_2$  の電荷移行断面積測定実験を行った。

#### 3. 1 データ解析

断面積の算出には生成率法を用いた。1 価から 0 価の電荷移行断面積を  $\sigma_{10}$ 、0 価から 1 価の電荷移行断面積を  $\sigma_{01}$  とし、この 2 状態のみを考慮した生成率方程式は

$$F_0 = \frac{\sigma_{10}}{(\sigma_{10} + \sigma_{01})} \{1 - \exp[-(\sigma_{10} + \sigma_{01})\pi]\}$$

である。ただし、 $F_0 = Y_0 / (Y_0 + Y_1)$  で、 $F_0$  (以下、中性フラクシオン) は中性粒子の生成率、 $Y_0$ 、 $Y_1$  はそれぞれ 0、1 価粒子の収量を表している。 $\pi$  は衝突ガスセル内の気体標的厚さ (ガス圧力  $\times$  セル長) を表している。単回衝突の条件なら

$$F_0 \approx \sigma_{10}\pi$$

と表すことができる。このような条件のもとで、複数点の気体標的厚さに対する中性フラクシオンを測定すると、その傾きが断面積  $\sigma_{10}$  となる。

3 keV の  $W^+$  を  $H_2$  に衝突させた際の結果を図 4 に示す。横軸は気体標的厚さ、縦軸は中性フラクシオンである。黒丸が測定データ点である。図から明らかなように、中性フラクシオンは標的厚さに対してリニアで、単回衝突の条件を満たしている。各データに示している横軸方向と縦軸方向の誤差棒はそれぞれ気体標的厚さ測定の誤差と中性フラクシオン測定の誤差を示す。

断面積の測定誤差の要因を以下に列挙する。

まず、気体標的厚さの決定においてはセル内のガス圧の変動、温度変化によるバラトロンを読み

取り誤差、そして、セルのビーム出入口孔からビームライン上に噴き出すガスによりガスセル実効長が長くなるといった誤差がある。これらから生じる気体標的厚さ測定の誤差を 13%以下に抑えた。

次にフラクション測定においては中性粒子とイオンのピーク分離から生じる誤差やカウンティングの統計誤差がある。これらは入射イオンビームのエネルギー、強度や断面積の大小に依存する。

最終的に、上記の誤差を持つそれぞれの測定データに対して、図 4 に示すように 1 次関数を最小二乗法でフィッティングすることで、電荷移行断面積と誤差を求めた。

### 3.2 結果

実験は 3 keV と 3.9 keV で行った。3 keV に関しては再現性を確認するために測定を 2 回行った。誤差の範囲で断面積が一致していたことから、2 回の平均を 3 keV の断面積とした。得られた断面積は 3 keV で  $(1.50 \pm 0.15) \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 、3.9 keV で  $(2.29 \pm 0.20) \times 10^{-18} \text{cm}^2$  であった。それぞれの誤差は、10%と 8.8%である。

今回の測定結果を図 5 に黒丸で示す。横軸は加速エネルギー、縦軸は断面積を表している。エネルギー依存を調べるために今井らの 10 keV のタングステンデータ[4]を白丸で図 5 に示す。今回の測定値と今井らの測定値は同じオーダーの値であり、エネルギーが低くなるにつれて断面積の値も減衰していることが分かる。参考までに今井らの鉄とニッケルのデータを破線付きの三角と四角で図中に示す。鉄とニッケルのデータを比較すると、ほぼ同じようなエネルギー傾向を示していることが分かる。

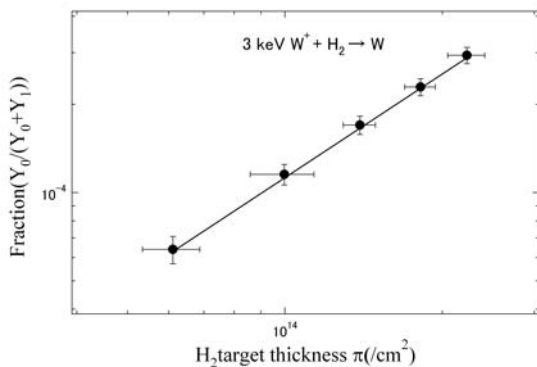


図 4 3 keV  $W^+ + H_2$  の生成率曲線

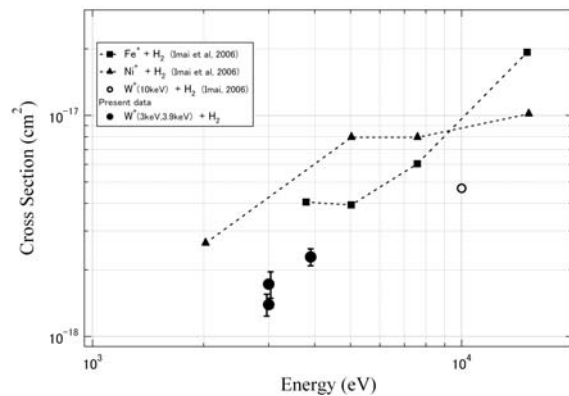


図 5  $H_2$  衝突のエネルギー依存

### 参考文献

- [1] 季村峯生, プラズマ・核融合学会誌, 第 74 巻第 6 号, 542 (1998).
- [2] 高柳和夫, 電子・原子・分子の衝突 (改訂版), 培風館, 137 (1996).
- [3] 太田哲郎, 低速小型多価イオンビーム発生装置の設計と開発 ~イオンビーム偏向器及びビームプロファイルモニター~, 京都府立大学卒業論文, (2003).
- [4] M. Imai, T. Shirai, M. Saito, Y. Haruyama *et al*, J. Plasma Fusion. Res. SERIES, 7, 323 (2006).