

# 多価イオン照射装置の立ち上げ

中村信行研究室 岡田凌

## 1 序論

### 1.1 多価イオン

多価イオンとは、2 価以上の正または負イオンのことであり、原子物理学では多くの電子がはぎ取られた原子イオンのことを指す場合が多い。原子を電離させるためには、その束縛エネルギーに等しいエネルギーを与える必要があり、多くの電子が取り除かれた多価イオンは大きなポテンシャルエネルギーを持つ。加えて、電離が進むに連れて大きくなる正の電荷に打ち勝って電子を剥ぎ取る必要があるため、価数が大きくなるほど多価イオンの持つポテンシャルエネルギーも大きくなる。

### 1.2 多価イオン-固体表面の相互作用

多価イオンは価数とともに増大する大きな内部エネルギーをもつため、固体表面に低速で照射した場合、1 個の多価イオンにより数百個の 2 次電子が発生したり、照射した表面領域が構造変化するなど [1]、中性原子や 1 価イオンとは異なった振る舞いが見られる。この振る舞いの要因として、多電子移行過程とポテンシャルスパッタリングが挙げられる。多電子移行過程とは、大きなポテンシャルエネルギーを持つ多価イオンが固体表面へ近づくことで、固体表面—多価イオン間のポテンシャル障壁が低くなり、標的表面から多くの電子が多価イオンへ移行する現象である。ポテンシャルスパッタリングは、多電子移行過程で大量の電子を放出したことで固体表面が正に帯電し、クーロン力によって互いに反発した結果、二次イオンとして空間中に放出される現象である。

### 1.3 多価イオン源

多価イオンを生成する装置の一つに、電子ビームイオン源 (Electron Beam Ion Source : EBIS) がある。EBIS は、イオントラップとそれを貫く電子ビーム、及びコレクター部から構成されている。イオントラップでは、3 つ以上の円筒電極 (ドリフトチューブ:DT) による井戸型ポテンシャルと、超伝導コイルにより圧縮された電子ビームの空間電荷により三次元的にイオンをトラップしている。トラップしたイオンに電子ビームを照射することで、原子から電子を一つずつはぎ取っていく逐次電離という電離法により、多価イオンが生成される。

### 1.4 背景と目的

多価イオンを固体表面へ照射し、その二次粒子を検出することで、多価イオン照射による固体表面への影響を調べることが可能であり、それは核融合実験炉内壁の照射損傷についての評価につながると考えられる。また、多価イオンが固体表面の構造に及ぼす影響を利用して、カーボンナノチューブなどのナノカーボン材料の欠陥導入に応用できる可能性があると考えられる。そのための実験装置として、現在電気通信大学には EBIS 型多価イオン源である Kobe-EBIS を用いた多価イオン照射装置が設置されている。この装置は元々神戸大学で運転されていた装置であるが、2021 年 1 月に電気通信大学に移設された。移設に伴い装置内の環境や運転条件が変化したことで、各設定値が以前とは異なるものになってしまい、満足に運転が行えていないのが現状である。従って、装置に調整を施すことで現在の環境で以前と同様の運転が可能となるよう改善することが本研究の目的である。

## 2 実験

### 2.1 実験装置

実験装置として、以下の図1に示す通りの多価イオン照射装置を用いた。この多価イオン照射装置は多価イオンを生成する Kobe-EBIS、生成した多価イオンビームの収束及び価数の調整を行いながら照射室まで輸送するビームライン、そして多価イオンの固体への照射とその測定が行われる照射室から構成されている。

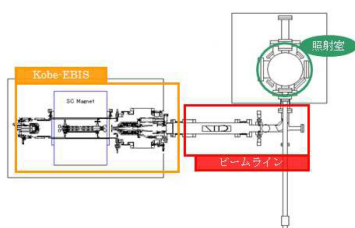


図1 多価イオン照射装置 [2]

#### 2.1.1 Kobe EBIS

Kobe-EBIS は電子ビームを放出する電子銃、イオンをトラップして多価イオンを生成する DT 部、電子ビームの回収と多価イオンの引き出しを行うコレクター部から構成される。電子銃は熱電子放出型であり、電子ビームを放出する際はアノード・スノート・フォーカスにかかる電圧を調整する。

#### 2.1.2 ビームライン

ビームラインは、生成された多価イオンを収束してビームとして引き出し、イオンの価数選別を行いながら照射室まで輸送する役割をもつ。多価イオンの収束にはアインツェルレンズが用いられ、価数選別は偏向電磁石の磁場を操作することで行われる。入射スリットを通り偏向磁石の磁界に入射したイオンは、ローレンツ力により円弧状に進行していく。このとき、イオンにかかる遠心力とローレンツ力のつり合い、加速電圧  $V$  と運動エネルギーの関係から (1) 式が導出される。

$$\frac{M}{q} = \frac{(rB)^2}{2V} \quad (1)$$

ここで  $r$  は円弧の曲率半径、 $q$  はイオンの価数、 $M$  は質量、 $B$  は磁場の大きさである。この式において  $V$  は一定であり、偏向電磁石を固定すれば  $r$  も一定になるため、偏向電磁石の磁場を操作することで特定の質量電荷比のイオンのみを出射スリットへ引き出すことが可能である。また、磁場の操作は偏向電磁石に流す電流を操作することで行う。

#### 2.1.3 照射室

照射室では試料に対し多価イオンビームの減速と固体への照射、測定が行われる。減速は減速レンズにより行われており、減速レンズを通過した多価イオンビームは、試料台に設置された固体試料に照射され、試料台の後ろに設置されたファラデーカップ (FC) もしくはマイクロチャンネルプレートによって、それぞれビーム強度と形状が計測される。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 真空度の改善

引き出される不純物イオンの量を減らすため、多価イオンを引き出す際は装置内部を高い真空度で保つ必要がある。真空度改善のため、ベーキング及びヘリウムリークテストを行った。ベーキングとは、装置外壁にヒーターを巻き付けてチャンバー全体を加熱することで、装置内壁に付着した不純物をガスとして放出することを指し、真空ポンプでそれらの不純物ガスを排気することで真空度を改善することができる。ヘリウムリークテストは、装置外部からヘリウムガスを順次吹き付けていき、質量分析計などで装置内へ漏れ出したヘリウムガスを検出するというもので、漏れが検知された部位のネジを増し締めすることで真空度を改善することができる。

#### 2.2.2 アルゴン多価イオンの価数分布測定

多価イオン照射装置に気体試料としてアルゴンガスを導入することで、アルゴン多価イオンの生成及び引き出しを行った。このとき、偏向電磁石の磁場を電流によって走査することで、引き出される多価イオンの質量電荷比を徐々に変化させ、イオン電流値を照射室に設置された FC で計測した。これにより多価イオンビームの価数分布を測定した。また、その際バックグラウンドとしてガス導入無しの場合の価数分布も測定した。

### 3 結果及び考察

#### 3.1 真空度の改善

ベーキング及びヘリウムリークテストにより、リークチェックで漏れが検知された部分の増し締めを行った。結果として Kobe EBIS 内の真空度は  $3.4 \times 10^{-7}$  Pa から  $1.1 \times 10^{-8}$  Pa まで上がり、運転可能な目安まで改善された。

#### 3.2 電子ビームの引き出し

真空度の改善後、電子ビームの引き出しを行った。引き出した当初は Kobe-EBIS とビームラインの芯ずれにより電子ビームが装置の内壁や電極に当たり、アノード電圧を大きくすると装置の自動制御が発動して電子ビームが落ちてしまう状態であったが、水平器を用いて位置関係を調整した結果、電子ビームが安定して引き出せるようになった。表 1 に、電子ビームの典型的なパラメータを示す。

表 1 電子ビームの各パラメータ

エネルギー (keV)	電流値 (mA)/	磁場 (T)
13	70	3

#### 3.3 アルゴン多価イオンの価数分布測定

電子ビームが安定して引き出せるようになった後、2.2.2 項で述べた方法によりアルゴン多価イオンの価数分布測定を直流運転モードで行った。このときアルゴンガスの導入量は  $6.0 \times 10^{-8}$  Pa であり、運転条件は表 2 の通りである。

表 2 価数分布測定 (1 回目) の運転条件

電子エネルギー (keV)	電子電流 (mA)	磁場 (T)	$E_i$ (keV)
13	50	3	$3q$

ここで、 $E_i$  はイオン加速エネルギーを表す。結果は図 2 の通りとなった。イオン電流値のピークにおいて、アルゴンガス導入有りの値がアルゴンガス導入無しの値を上回っている部分が多いうえ、ピークの数も多いことからアルゴン多価イオンは引き出せていると考えられる。アルゴンガス導入無しの場合のピークについては、測定範囲のアルゴン多価イ

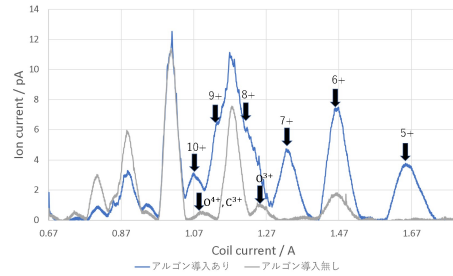


図 2 価数分布測定 (1 回目)

オンの質量電荷比に近い値を持つ炭素・窒素・酸素などの不純物イオンであると考えられる。各ピークの価数に関しては不純物イオンとアルゴンイオンの質量電荷比の大小関係から決定した。例として、8 価のアルゴンイオンの質量電荷比は 5、3 価の酸素イオンの質量電荷比は約 5.3、そして 7 価のアルゴンイオンの質量電荷比は約 5.7 である。従って、ガス導入なしの場合の偏向電磁石の電流値が 1.27A 付近のピークは 3 価の酸素イオンによるものであり、その両隣に位置するガス導入ありのピークがアルゴンの 7 価と 8 価であると考えられる。図 3 に、移設前の価数分布測定の結果を示す。

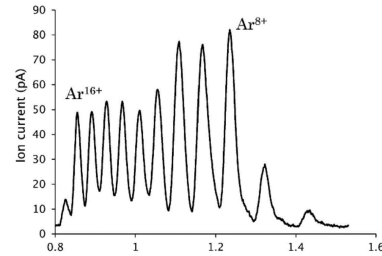


図 3 価数分布測定結果 (移設前) [2]

この移設前の測定における運転条件は電子電流値のみ表 2 と異なり、100mA である。また、運転モードはパルス運転モードである。今回の結果を移設前の結果と比較すると、イオン電流値は全体的に小さく、高価数のアルゴン多価イオンが出ていない。そこで、アルゴンガスの導入量を  $1.2 \times 10^{-7}$  Pa に増やし、運転モードをパルス運転モードに変更して再び価数分布測定を行った。その際、電子ビーム・イオンビームに関する各パラメータは電子電流値のみ表 2 から変更し、70mA とした。図 4 にその結果を

示す。

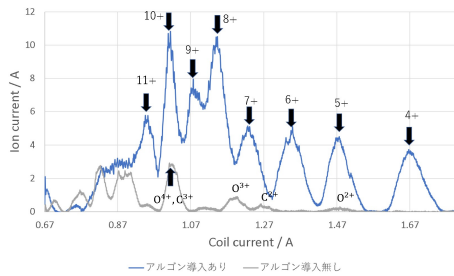


図4 価数分布測定 (2回目)

1回目の測定結果に比べ、アルゴンガス導入無しの場合のイオン電流値が全体的に低くなったため、不純物イオンの量は減少したと考えられる。また、11価のアルゴン多価イオンが新たに観測できたものの、まだ移設前に比べ高価数イオンが引き出せておらず、各ピークのイオン電流値は依然低いままである。そこで、アルゴン多価イオンを引き出した状態で、FCにつながれた電流計でそのイオン電流値を見ながら Kobe- EBIS とビームラインの位置関係を調節することで、電流値が最大となるような位置に変更した。そしてその後価数分布測定を行った結果、図5のような結果になった。

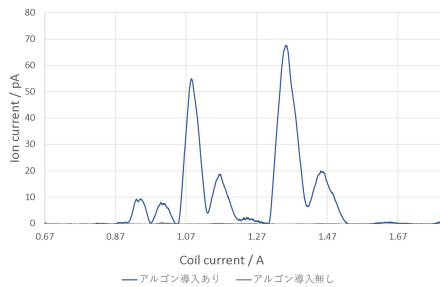


図5 価数分布測定結果 (3回目)

運転条件は前回の測定と同様である。2回目に比べ、イオン電流値が7倍程度大きくなったものの、ピーク数は大幅少なくなった。また、ガス導入無しの場合のイオン電流値が非常に小さく、ガス導入ありの場合のピーク数も考慮すると、アルゴン多価イオンが正確に引き出せていない可能性がある。そこで、アルゴンガス導入部分を見直し、質量分析計で装置内でのアルゴンガスの検知を確認した。さら

に、引きだされるイオンの質量電荷比の範囲を変更するため、偏向電磁石の位置調整を行った。その後、アルゴン多価イオンの価数分布測定を行った結果を以下の図6に示す。

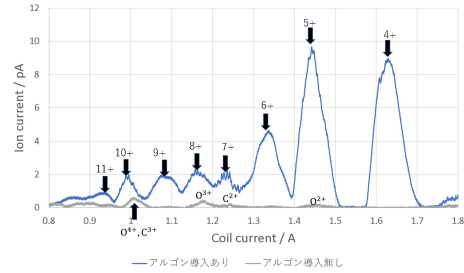


図6 価数分布測定結果 (4回目)

運転条件は前回の測定と同様である。ピーク数、イオン電流値は2回目までの測定結果と同等に戻ったが、高価数のイオン電流値のピークが小さくなり、低価数のイオン電流値のピークが大きい状態となってしまった。これは低価数のアルゴン多価イオンを引き出しやすい位置に偏向電磁石を移動してしまっただけであると考えられるため、高価数のイオン電流値が大きくなるような偏向電磁石の位置を調べる必要があると考えられる。

## 4 結論

移設前と同様の運転を可能にするために多価イオン照射装置の立ち上げを行い、多価イオンを照射室へ引き出すことまで可能になった。しかし、引き出すことができた多価イオンの価数は、移設前に観測されていたものよりも低く、ピークのイオン電流値も大幅に小さいものとなった。従って、今後の展望としては、移設前に観測されていた価数までのアルゴン多価イオンを、より大きなイオン電流値で安定して引き出せるよう、さらに調整していくことが望ましいと考えられる。

## 参考文献

- [1] 櫻井誠・大谷俊介・坂上裕之 第52回真空に関する連合講演会プロシーディングス
- [2] 西田尚史 修士論文 神戸大学 (2017)