

小型多価イオン源用ビームラインの開発

量子・物質工学科 山田研究室 谷中 佑樹

1. 背景・目的

多価イオンは太陽コロナや核融合炉などの高温プラズマ中に存在するため、その原子データはプラズマ中で起きている現象の解析に不可欠である。また、多価イオンは膨大な内部エネルギーを持つために反応性が高く、さまざまな分野においての応用が期待されている。例えば、固体表面との反応で多数の電子を奪い、表面にナノサイズの構造変化をもたらす特徴を持つことから、表面微細加工技術への応用が望まれている。

我々の研究グループでは、電子ビームイオントラップ(EBIT; Electron Beam Ion Trap)と呼ばれる大型イオン源(通称Tokyo-EBIT)によって生成される多価イオンを用いて様々な研究を行ってきた。しかし、Tokyo-EBITは高度に電離された重元素多価イオンを用いた研究には適しているが、低価数あるいは中程度の価数を持ったイオンの生成には過剰性能である側面がある。そこで最近、より小型で簡便なEBITが製作され、中程度の価数を持った多価イオンの分光研究が効率的に行われている。

本研究の目的は、小型EBITでの分光以外の研究の幅を広げるために、生成された多価イオンを取り出し、衝突実験を可能とすることである。そのためにイオン取り出しビームラインの設計およびシミュレーションを行った。

2. 原理と装置

2.1 EBIT

Electron Beam Ion Trap(EBIT)の原理を図1に示す。EBITは大きく分けて電子銃(e-gun)、3つのドリフトチューブ(DT)、電子コレクター(e-collector)で構成されている。さらにDTの周りには超伝導コイル(SCM)を配置し、ビーム軸方向に強磁場を形成する。電子銃から出射した電子ビームは図のような電位配置によって加速され、磁力線に沿って径方向に圧縮されながらDTに入射する。ビームの軸方向にはDTに加える井戸型ポテンシャル、径方向には電子ビームの空間電荷ポテンシャルによってイオンをトラップする。DT内部に閉じ込められたイオンに電子ビームを照射して電子衝突により逐次電離を行い、多価イオンを生成する。

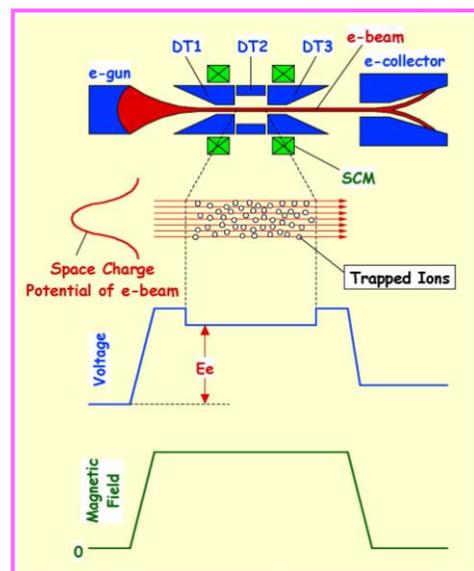


図1. EBITの原理。

2.2 アインツェルレンズ

ビームラインの製作にあたり、イオンビームを集束させるための静電レンズと、様々な価数を持ったイオンを分ける価数分析器が必要となる。本研究では静電レンズにはアインツェルレンズを、価数分析器にはウィーンフィルターを用いた。ここではアインツェルレンズの原理について説明する。

図2のようにアインツェルレンズは3つの円筒電極で構成されており、中心の電極2を高電位に、両端の電極1,3をグラウンド電位にすることで、レンズ通過前後でのエネルギーを変化させることなくビームの集束を行うことが可能である。

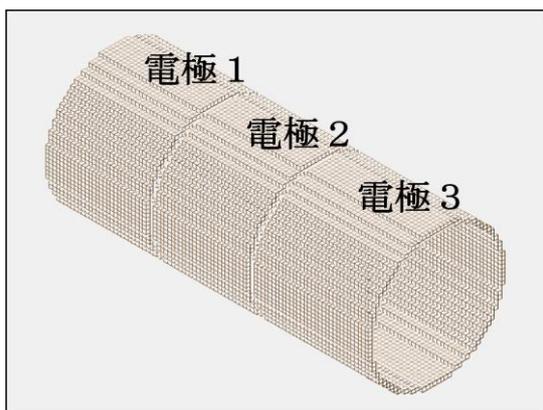


図2. アインツェルレンズの概観

2.3 ウィーンフィルター

ウィーンフィルターは図3のように磁極と電極が互いに垂直に配置され、直交電磁場を形成する。この直交電磁場中において電場、磁場の各々よりイオンが受ける2つの力が釣り合う時に、イオンは直進する。力の釣り合う条件が質量/価数比および速度に依存することを利用して価数を分別する。

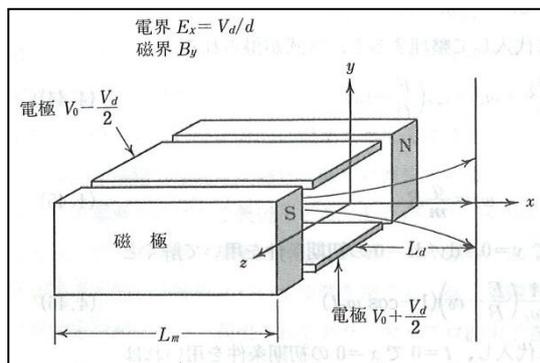


図3. ウィーンフィルター

2.4 SIMION

アインツェルレンズおよびウィーンフィルターのサイズ・形状については、軌道計算ソフトSIMIONを用いてシミュレーションを行い決定した。SIMIONには次のような特徴がある。

- (1) 平面の若しくは円筒対称な個々の電極/磁極について描写できる。
 - (2) ポテンシャル、等電位線/磁力線、イオンの軌道が算出される。
 - (3) 各電極/磁極を詳細に決められるため、収差の全ての影響が考慮される。
- こにより、個々の電極/磁極について最適なデザインを決定することができる。

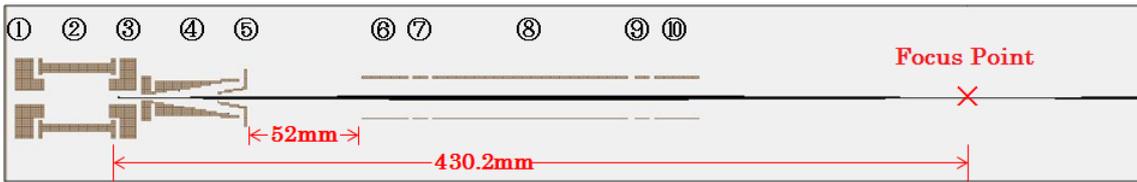
3. 結果

3.1 アインツェルレンズ

本研究では、より多くのビームを取り込むことができるように2段式のアインツェルレンズを採用した。SIMIONでのシミュレーションの結果から、アインツェルレンズのサイズおよび形状を図4(a)のように決定した。今回のシミュレーションにはXe²⁶⁺を用いた。図4(b)は、小型EBITに装着してビームの集束を行っている図である。



図 4(a). アイソツェルレンズの形状決定。黒い線がイオンビーム、赤い線が等電位線。



	名称	印加電圧[V]
①	DT1	500
②	DT2	470
③	DT3	500
④	電子コレクタ	-100
⑤	エクストラクタ	-500

	名称	印加電圧[V]
⑥	電極 1	0
⑦	電極 2	700
⑧	電極 3	0
⑨	電極 4	700
⑩	電極 5	0

図 4(b). ビームが集束している様子。左の表は小型 EBIT、右の表はアイソツェルレンズの各電極に印加する電圧。

実際には、中心の電極にイオンの軌道のずれを修正するためのディフレクターを設置する予定である。その全体図を図 5 に示す。

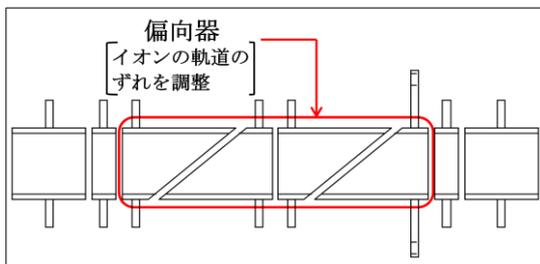


図 5. アイソツェルレンズの図面。

3.2 ウィーンフィルター

ウィーンフィルターについては実際に製作し、動作試験を行った。今回は強磁場磁石(中心磁場:1319Gauss)を用いて一定磁場をかけ、電極に印加する電圧を変えて実験を行った。図 6 に装置図を示す。イオン銃で発生したイオンビームの軌道がウィーンフィルターを通過することで変化し、価数が分別される。直進したイオンの電流を電流計で検知した。

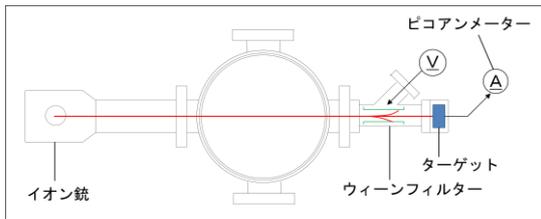


図 6. ウィーンフィルターの動作チェックのための装置。

今回は Ar、Kr、N のガスを用い、以下のような測定条件で動作試験を行った。

真空度	~ 10^{-7} Pa
中心磁場	1319 Gauss
イオンの加速電圧	5 kV

得られた結果を図 7 に示す。それぞれのピークについて、計算との比較から価数を同定した。

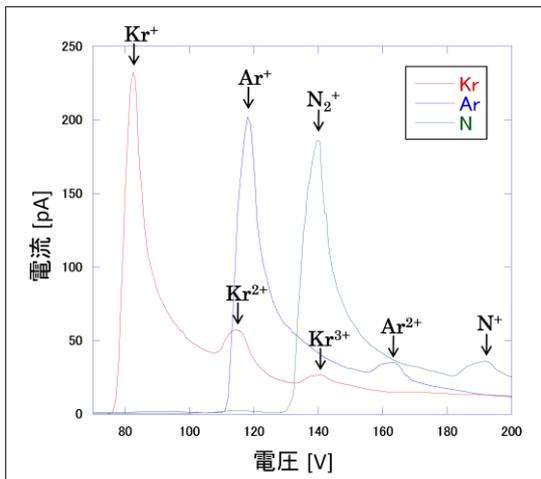


図 7. 各元素についての価数分析の結果。

4. まとめ

- ・ 小型多価イオン源用ビームラインの開発のために、静電レンズと価数分析器のシミュレーションおよび設計を行った。
- ・ SIMION でのシミュレーションから、静電レンズにはアインツェルレンズを、価数分析器にはウィーンフィルターを採用した。

- ・ ウィーンフィルターを実際に製作して動作実験を行った。
- ・ 得られた結果について、それぞれ価数の同定を行った。

5. 今後の展望

アインツェルレンズについてはまだサイズ・形状を決定した段階であるので、これも製作したのちにウィーンフィルター共々小型 EBIT に取り付け、多価イオンを引き出せるかどうかの最終チェックを行い、将来的には小型 EBIT でも衝突実験を可能にしたい。