

小型イオン源から引き出された多価イオンビームの評価

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 先進理工学専攻
応用物理工学コース 中村信行研究室 谷中 佑樹

1. 背景・目的

我々の研究室では Tokyo-EBIT と呼ばれる電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap; EBIT)型多価イオン源を用いて分光・衝突実験を行っている。Tokyo-EBIT は高エネルギー電子ビームにより高度に電離した重元素多価イオンを生成することができるが、低価数あるいは中程度の価数の多価イオンには過剰性能である。そのため研究室では、低価数多価イオン生成に適した低エネルギー仕様の小型 EBIT(Compact EBIT; CoBIT)を 2007 年に製作した[1]。これまで CoBIT では生成・トラップしたイオンの分光研究のみが行われてきたが、本研究では衝突実験を可能とするために、CoBIT で生成された多価イオンを高効率で引き出し、輸送するビームラインを製作し、その評価を行った。

2. 原理

2.1 電子ビームイオントラップ(EBIT)

電子ビームイオントラップ(EBIT)[2]は、多価イオンの分光測定を主な目的として開発されたイオン源である。図 2.1 に EBIT の多価イオン生成原理図を示す。この装置は大きく分けて電子銃、トラップ領域、電子コレクターの 3 つから成る。トラップ領域は 3 つのドリフトチューブ(Drift Tube; DT)電極と、DT の周りに軸方向強磁場を形成するヘルムホルツ型超伝導コイルから成り立っている。電子銃から出射した電子ビ

ームは図 2.1 のような電位配置によって加速され、磁力線に沿って動径方向に圧縮されながら DT に入射する。中央のドリフトチューブ電極(DT2)の電位を両極(DT1, 3)より低くすることにより井戸型ポテンシャルを形成し、生成されたイオンを電子ビームの軸方向に閉じ込める。また高密度電子ビームの空間電荷ポテンシャルによりイオンは径方向にも封じ込められる。こうして DT2 領域内部にトラップされた多価イオンがビーム電子との逐次衝突を受け、電離が進み多価イオンが生成される(これを逐次電離と呼ぶ)。DT を通過した電子は電子コレクターで発散し回収される。一般に電子ビームのエネルギーを高くするとより高価数のイオンを生成することができ、電子ビームの電流を高くするとより多くのイオンを生成することができる。

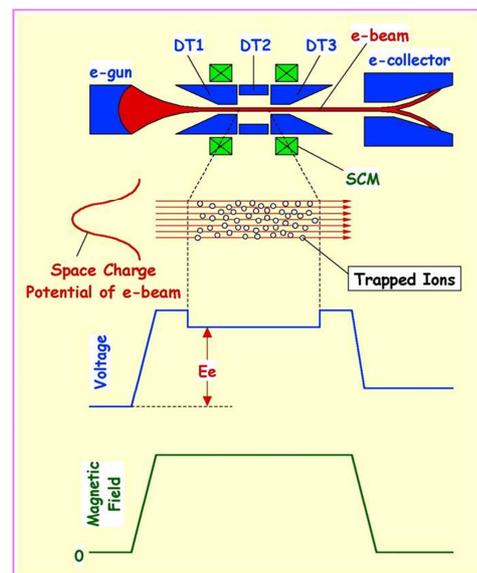


図 2.1 : EBIT の多価イオン生成原理図。

トラップされた多価イオンを引き出す場合は、図 2.2 に示したようなリークモードとパルスモードの 2 つのモードを用途別に用いる。リークモードでは、DT1 に印加する電圧を DT3 に印加する電圧より高くした状態を保つ。トラップ領域内の多価イオンは電子と衝突することにより加熱され、その結果、イオンが DT3 のポテンシャル障壁を乗り越えられるだけのエネルギーを得たとき、多価イオンはビームとして引き出される。一方パルスモードでは、DT2 の電圧を DT1, 3 より低くすることにより目的の多価イオンを生成するまでの間トラップした後、DT2 の電圧を DT3 の電圧と等しいかそれ以上の値まで上げることにより、トラップ領域内で生成された多価イオンを強制的に引き出す。DT1 の電圧を DT3 の電圧より高くすることでイオンが電子銃方向に行くことを防ぐ。

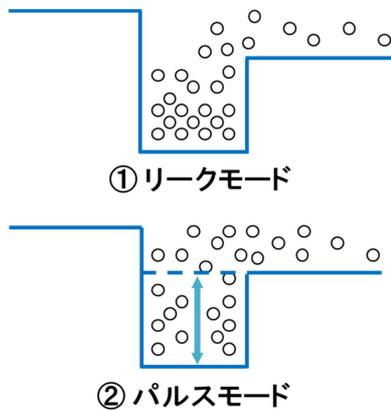


図 2.2: 引き出しモード(DT は左から順に DT1, 2, 3). ①リークモード, ②パルスモード.

2.2 アインツェルレンズ

3 つの円筒電極で構成され、両極の電極電位が等しい静電レンズである。レンズ通過前後でビームエネルギーを変化させることなく集束させることができる。図 2.3 に 3

極の円筒電極から構成されたアインツェルレンズの(a)形状と(b)内側の電極に電圧を印加した際の等電位線を示す。内電極に正・負どちらの電圧を印加しても集束作用はあるが、加速電圧に対して極性が逆の電圧を印加した場合は色収差が小さくなるものの、印加電圧の絶対値が非常に大きくなってしまふ。

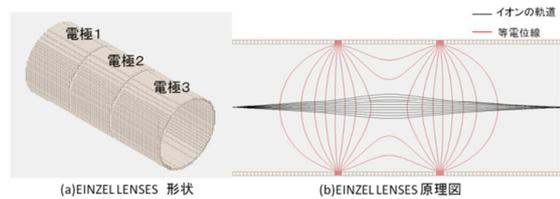


図 2.3 : アインツェルレンズの(a)形状および(b)ビームが集束している様子.

2.3 ウィーンフィルター

ウィーンフィルターは図 2.4 に示す通り、電場 E と磁場 B が垂直でかつ各々がイオンビームにも垂直になるように配置したものである。イオンはウィーンフィルター内においてクーロン力 $q\vec{E}$ とローレンツ力 $q\vec{v} \times \vec{B}$ を受けるが、 $v = E/B$ の速度を持つ多価イオンに対しては両者が釣り合うため直進する。ウィーンフィルターは速度分析器として動作するが、イオン源から一定電圧で引き出された多価イオンの速度は価数質量比に依存するため、価数分析器として用いることができる。

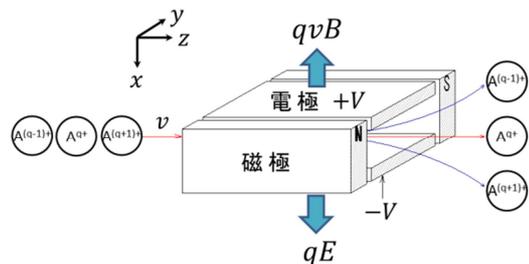


図 2.4 : ウィーンフィルターの模式図.

3. 多価イオン引き出し系の製作

3.1 静電レンズ

図 3.1 に製作した静電レンズを示す。イオンの輸送と集束のため、2つのアインツェルレンズを CoBIT の液体窒素容器中央の空間に配置した。内径 46mm の円筒状の空間に図のような形状の電極を組み込むため、レンズ内径は 20mm とした。その内径で最適な条件を求めるために SIMION と呼ばれるシミュレーションソフトを用いて軌道計算を行った。その結果、電極間距離 2mm, 外電極の長さ 24mm, 内電極の長さ 8mm と決定した。また図 3.1 に示すように、アインツェルレンズの間にディフレクターを設置した。ディフレクターは長さ 49mm, 内径 20mm の円筒を 50 度の角度で切り分けたような形状をしており、ビームの軌道を微小角変える役割を持つ。各ディフレクターは互いに向きが 90 度異なっており、それぞれ一方向に多価イオンビームを偏向させる。

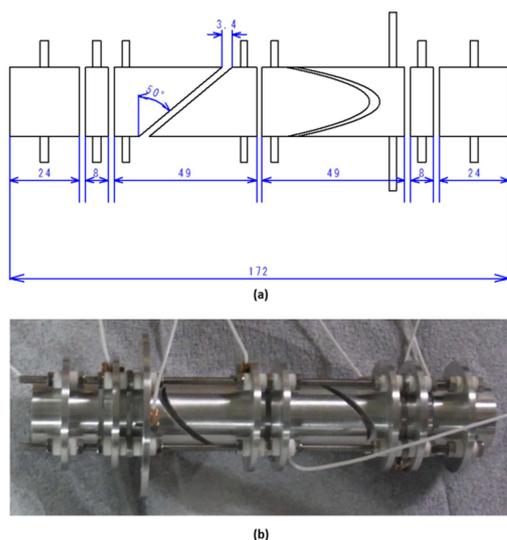


図 3.1 : 静電レンズ系. (a)模式図. (b)写真.

3.2 ウィーンフィルター

本実験で用いたウィーンフィルターの模式図を図 3.2 に示す。磁石は長さ 90mm, 幅 15mm, 厚さ 3mm のネオジウム磁石で、間隔は 10mm, 中心磁場 1300Gauss である。電極は長さ 90mm, 幅 14mm, 厚さ 15mm のアルミニウムを用いており、間隔は 5mm である。スリット幅は 0mm から 2mm まで可変となっている。また、電極および磁極の周りを軟鉄で囲むことにより、入射多価イオンに対する漏れ電場と漏れ磁場の影響を極力抑えている。

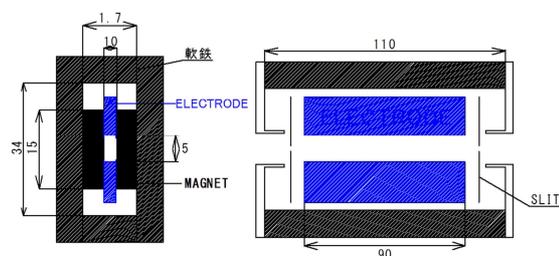


図 3.2 : ウィーンフィルターの模式図.

4. 評価

4.1 全イオン数の測定

ウィーンフィルターで価数選別を行う前に、CoBIT から引き出された価数非選別のイオン数を測定した。実験系の模式図と実験条件を図 4.1 に示す。CoBIT 内に Kr ガスを導入し、生成された多価イオンをリークモードで引き出したのち、入口直径 10mm のファラデーカップで計測したところ、2.6pA であった。平均価数を 10 価とするとイオン数は 10^6 counts/s に相当する。

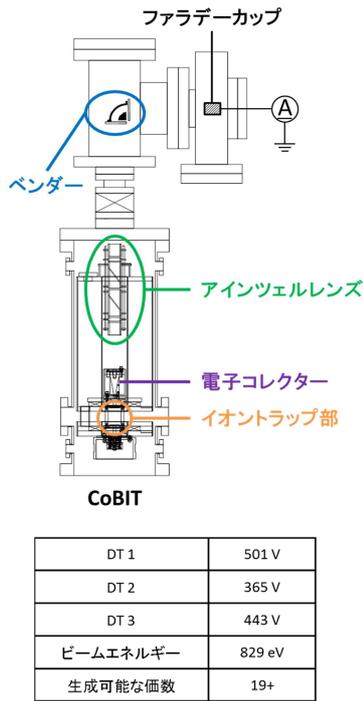


図 4.1: 全イオン数測定のための実験系と実験条件.

4.2 リークモードによる引き出し

次にウィーンフィルターを CoBIT に取り付け、価数分析を行った. 実験系の概要図を図 4.2 に示す. CoBIT に Kr を導入し、ウィーンフィルターのスリット幅 0.2mm, DT1=488V, DT2=436, DT3=450V のリー

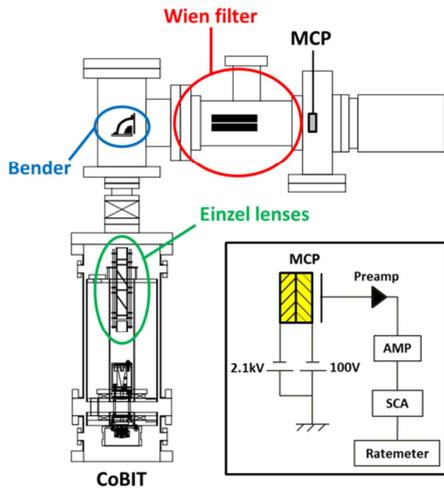


図 4.2 : CoBIT での評価実験の装置図.

クモードとし、電子ビームエネルギーを Kr²⁵⁺まで生成可能な 1.18keV としたときの引き出し結果を図 4.3 に示す. 25 価までの Kr イオンが理論上生成可能であるが、高価数のイオンの存在は確認できなかった.

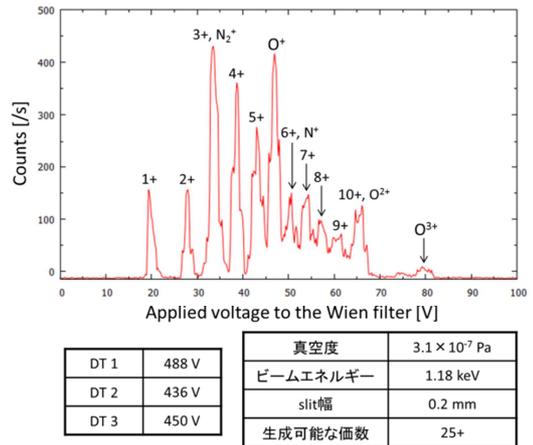


図 4.3 : リークモードでの Kr 多価イオン引き出しの結果.

4.3 パルスモードによる引き出し

パルスモードで Kr イオンを引き出した結果を図 4.4 に示す. リークモードのときより高価数のイオンを引き出すことができ、かつイオン計測数も増加した. しかしながら再現性に乏しく、1 価イオンすら検出できなかったり、パルスモードでも高価数イオンが引き出せなかったり等、掲載したものの以外のデータでは全く違う結果になってしまうことが多々あった. 理由としてはイオンが輸送されている途中で電荷交換してしまっていること、ウィーンフィルター内外での電磁場の遮蔽が不十分であること等が考えられる.

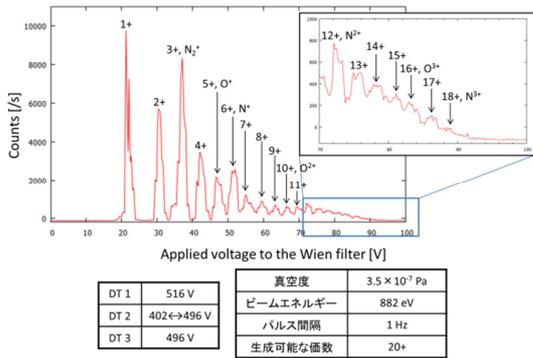


図 4.4: パルスモードでの Kr 多価イオン引き出しの結果.

4.4 エミッタンスの測定

4.3 では高価数イオンを引き出し、価数選別することに成功したが、4.1 で得たイオン総数に比べ価数選別されたイオンの数が少ないことが分かった。そこでその原因を探るために、エミッタンスの測定を行った。エミッタンスはビームの広がりや指向性などに関連する性質を表すのに用いられる物理量で、エミッタンスの値が小さいほど広がりの少ない質のいいビームであると言える。測定原理を図 4.5 に示す。測定対象のビームをスリットで区切り、適当な距離において到達ビームを検出する。スリットのビーム軸からの距離 r 、検出面での軸からの距離 h 、スリットから検出面までの距離 L より、ビームの発散角 α は近似的に $\alpha \approx (h - r)/L$ と表される。スリットの位置 r を変えて測定を繰り返し、得られる結果を横軸 r 、縦軸 α にとった位相図上にプロットすると、図 4.6 のような閉曲線が得られる。このような図をエミッタンス図と呼び、この閉曲線の面積を π で割った値がエミッタンスとなる。

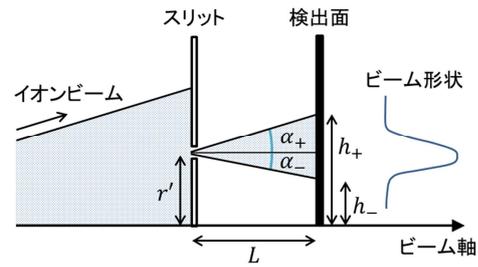


図 4.5: エミッタンスの測定方法.

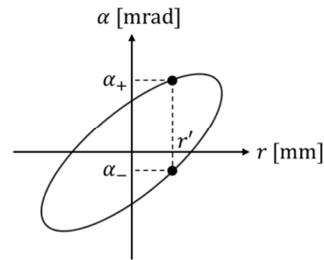


図 4.6: エミッタンス図.

実験装置の模式図を図 4.7 に示す。CoBIT から引き出した Kr を幅 0.25mm のスリットに通し、位置有感型検出器で検出した。また、スリットから検出器までの距離は 160mm とした。図のようにスリットを動かして、ビーム軸からのスリットの距離 r を変化させてビームの発散角 α を得た。スリットを通り抜けたイオンビームの検出器上でのイメージから得たエミッタンス図を図 4.8 に示す。これより、CoBIT から引き出した多価イオンビームのエミッタンスは約 5 [mm mrad] であることが分かった。また、ビーム径は約 18mm であった。

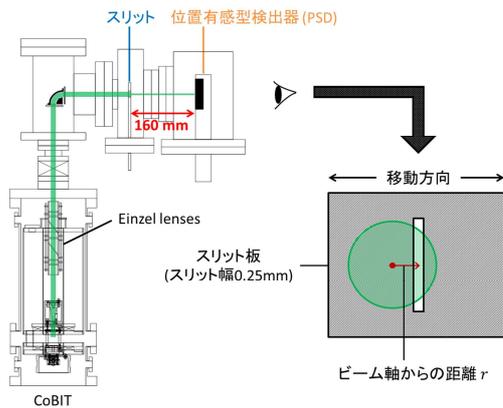


図 4.7 : エミッタンス測定のための実験系.

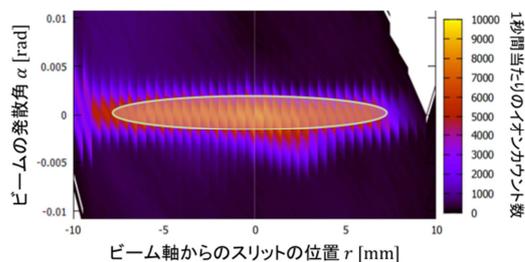


図 4.8 : エミッタンス図.

6. まとめと今後の展望

本研究では、CoBIT で生成された多価イオンを引き出して衝突実験を可能にするためのビームラインを製作した。多価イオンビームを集束させるためのアインツェルレンズ、軌道を微小角偏向させるディフレクター、電子ビーム回収の際に発生する軟 X 線とイオンを分ける静電偏向器を製作し、価数分析器としてウィーンフィルターを用いてこれらの性能評価を行った。

アインツェルレンズは軌道シミュレーションソフト SIMION を使用して設計した。図 4.4 から、今回使用したウィーンフィルターには高価数のイオンを分別させるだけの十分な性能があることが分かった。しかし、引き出し効率が安定しない、引き出し

効率が小さすぎるなどの問題が見つかった。この原因を探るためにエミッタンスを測定したところ、値としては十分であるが、ビームサイズが大きく、アインツェルレンズ一組だけではビームを集束し切れていない可能性が判明した。

今後の予定としては、多種多様な元素の多価イオンで試験して必要なデータを蓄積していくことと、再現性がない原因を特定し、それを改善することである。また、ビームを十分に集束するため、静電偏向器の直後にももう一組アインツェルレンズを設置する必要がある。更に、イオンの引き出しと同時にトラップ領域の様子を分光測定により明らかにすることも重要である。トラップ内で多価イオンが生成されているにも関わらず引き出せない場合は、ウィーンフィルター内外における電場や磁場の遮蔽、静電偏向器、スリット等をもう一度検討すべきであると考えられる。加えて、ウィーンフィルターの電磁極の形状や長さ、電磁場の遮蔽方法などについても最適な条件を再検討して改良することで CoBIT のビームラインの性能向上を図りたい。

参考文献 :

- [1] N. Nakamura, H. Kikuchi, H. A. Sakaue and T. Watanabe, Rev. Sci. Instrum. 79, 063104 (1988)
- [2] M. A. Levine, R. E. Marrs, J. R. Henderson, D. A. Knapp and M. B. Schneider, Physica Scripta T22, 157 (1988)