

小型多価イオン源用ビームラインの製作

電気通信大学院 情報理工学研究科
先進理工学専攻 中村信行研究室 八鈕 純治

1. 目的

我々の研究室では電子ビームイオントラップ(EBIT)型多価イオン源である Tokyo-EBIT、CoBIT を用いて研究を行っている。Tokyo-EBIT で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し、発光測定や多価イオンビームを用いて固体表面との相互作用の研究やプラズマ中での原子過程の一つである二電子性再結合(Dielectronic Recombination: DR)の測定などが行われている。しかし、Tokyo-EBIT は低価数のイオンの生成には過剰性能である。一方 CoBIT は低価数イオン生成に適した低エネルギー仕様の小型 EBIT で、分光測定のみが行われてきた。そこで、本研究では CoBIT で生成された多価イオンを高効率で引き出し、多価イオンビームを用いた研究を可能とするためのビームラインを製作することを目的とした。

2. 原理

2.1 Electron Beam Ion Trap (EBIT)

構成要素は大きく分けて①電子銃、②トラップ領域、③電子コレクターの3つから成る(図 2.1(a))。トラップ領域は3つのドリフトチューブ(Drift Tube: DT)とDTの周りに超伝導コイルが配置されており、ビーム軸上に図 2.1(c)のような強磁場を形成する。トラップ粒子と電子の衝突エネルギーは電子銃と中央のドリフトチューブ(DT2)との電位差によって決定され、電子

ビームはカソードとドリフトチューブとの間で加速され、磁場によって高密度に圧縮された状態でイオン化領域(トラップ領域)を通過し、電子コレクターで回収される。電子銃から出射した電子ビームは図 2.1 (b)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ドリフトチューブに入射する。中央の電極(DT2)と両端の電極(DT1、DT3)で井戸型ポテンシャルを形成し、生成されたイオンを軸方向に封じ込める。また、高密度電子ビームの空間電荷によりイオンは径方向にも閉じ込められる。こうしてDT2内部に閉じ込められたイオンが電子の逐次衝突を受け、電離が進み多価イオンが生成される。DTを通過した電子ビームは電子コレクター領域で発散し回収される。

CoBITの最大電子エネルギーは 2.5 keV、最大電子ビーム電流は 20 mA であり、鉄であれば最高24価の多価イオンが理論上生成可能である。低エネルギー、低磁場仕様のため全長約 50 cm と、装置全体の大幅な小型化が可能となった。またコイルには高温超伝導体を用いているので液体窒素のみでの運転が可能で、液体ヘリウムを必要とするTokyo-EBITに比べて運転コストが安価である。

トラップされたイオンを引き出す場合は、図 2.2 に示したような Leaky モードと Dumping モードの2つのモードを用途別

に用いる。Leaky モードでは DT3 にかかる電圧を DT1 にかかる電圧より低くすることで多価イオンを引き出す。電子とのクーロン衝突により加熱されたトラップ内の多価イオンが 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時、トラップから漏れ出す。Dumping モードでは、望みの価数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 の電圧より高くすることにより、トラップ内で生成された多価イオンを強制的に引き出す。

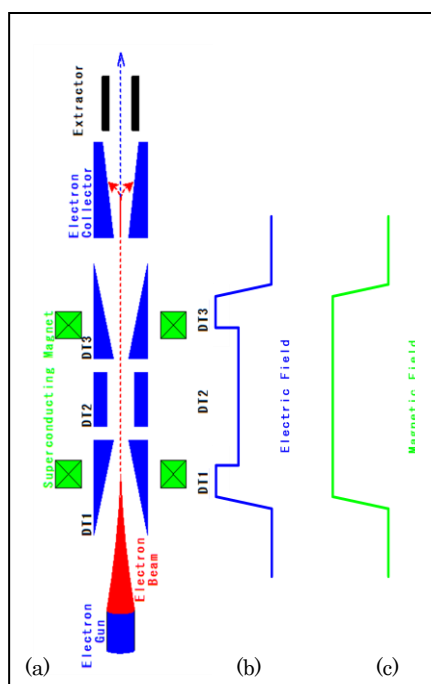


図 2.1 EBIT 概略図

(a)電極配置, (b)中心軸上の電場, (c)磁場

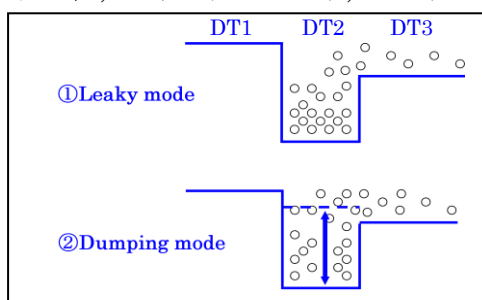


図 2.2 引き出しモード

①Leaky モード, ②Pulse モード

2.2 アインツェルレンズ

3 つの電極で構成され、外側の電極電位が等しい静電レンズで、レンズの通過前後でビームのエネルギーを変化させることなく収束させることができる。代表的な形状は円筒電極または開孔のある平行平板を対向させたものである。内電極に正・負の電圧どちらかを印加しても収束作用はあるが、イオン源における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、非常に大きな印加電圧が必要となる。

図 2.3 は 3 極の円筒電極から構成されたアインツェルレンズの形状で、図 2.4 は内側の電極に電圧を印加した際の等電位線とアインツェルレンズ内を通過するイオンの軌道を示す。

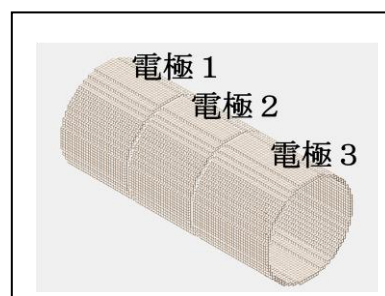


図 2.3 円筒型アインツェルレンズの形状

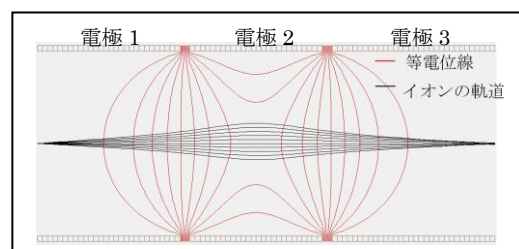


図 2.4 アインツェルレンズ内部のイオンビーム軌道

2.3 ウィーンフィルター

ウィーンフィルターは図 2.5 に示すような電極による電界 E と磁石による磁界 B が垂直で、且つ各々がビームにも垂直となる

ように配置された価数分析器である。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選別器として動作するが、イオン源から電圧 V_0 で引き出された多価イオンの運動エネルギーは、素電荷 e 、質量 m 、価数 q 、速度 v_0 を用いて

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = qeV_0 \quad (2.1)$$

で表され、引き出されたイオンの速度は電荷質量比(q/m)に依るため、価数分析器として用いることができる。

スリットを設けることで価数が異なるイオンは遮断されて、特定価数のイオンのみを取り出すことができる。また、永久磁石を用いることができるため、小型・軽量に作る事ができる。

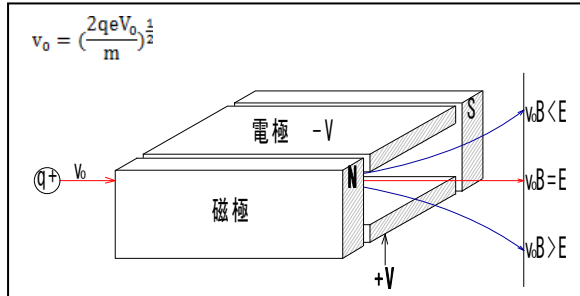


図 2.5 ウィーンフィルター模式図

3. ビームライン製作

3.1 静電レンズ系

図 3.1 に製作した静電レンズ系を示す。イオンビームの輸送と収束のため、2つのアイントゥエルレンズを配置した。CoBIT 引き出し直後の内径 46 mm 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 20 mm とし、最適な条件を求めるために市販ソフト SIMION を利用して軌道計算を行い、電極間隔 2 mm、外電極

の長さ 24 mm、内電極の長さ 8 mm と決定した。またアイントゥエルレンズの間には静電偏向器を配置した。偏向器は長さ 49 mm 内径 20 mm の円筒を 50 度の角度で切り分けた様な形状をしており、ビームの軌道を少角変える役割を持つ。図 3.1 に示したように各偏向器は互いに向きが 90 度異なっており、それぞれ一方方向に多価イオンビームを偏向させる。このような円筒形の形状は、平行平板を用いた偏向器と比べてイオンビームが通過する際に縁からの影響、つまり漏れ電場の影響を受けにくくなることや、アクセプタンスを大きくすることが可能であるなどの利点がある。

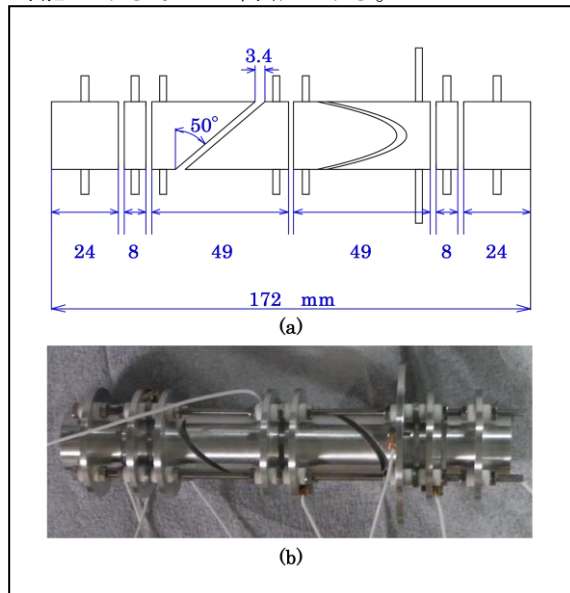


図 3.1 静電レンズ系 : (a)模式図, (b)写真

3.2 ウィーンフィルター

図 3.2 のように x 、 y 、 z 軸を定義し、 $\vec{E} = (E, 0, 0)$ 、 $\vec{B} = (0, B, 0)$ としたとき各軸方向の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} = qe(E - Bz) \quad (3.1)$$

$$m\ddot{y} = 0 \quad (3.2)$$

$$m\ddot{z} = qe\dot{x}B \quad (3.3)$$

ここで、 m はイオンの質量、 q はイオンの

価数、 e は素電荷である。

初期条件が $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ 、
 $(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0) = (v_0 \sin\theta, 0, v_0 \cos\theta)$ の場合、
 時刻 t における位置 $x(t)$ 、 $z(t)$ は次式のよう
 になる。

$$x(t) = \frac{m}{qeB} \left[\left(v_0 \cos\theta - \frac{E}{B} \right) \left(\cos \frac{qeB}{m} t - 1 \right) + v_0 \sin\theta \sin \frac{qeB}{m} t \right] \quad (3.4)$$

$$z(t) = \frac{m}{qeB} \left(v_0 \cos\theta - \frac{E}{B} \right) \sin \left(\frac{qeB}{m} t \right) + \frac{E}{B} t + \frac{m}{qeB} v_0 \sin\theta \left(1 - \cos \frac{qeB}{m} t \right) + \frac{E}{B} t \quad (3.5)$$

CoBIT からの引き出しの電圧を 400 V、ウ
 ーンフィルター内の一様磁場 1300 G、電
 極間隔 10 mm、印加電圧 85 V として xz 平
 面内において角度 θ で 9 価と 10 価の Ar が
 ウーンフィルターに入射してきた際の軌
 道を図 3.3 に示す。9 価イオン、10 価イ
 オンいずれも 140 mm 付近で集束してい
 ることから、この条件下では電極・磁極
 の長さを 140 mm にすれば 9 価と 10 価
 を高分解能で分離することが可能である。

計算と SIMION での軌道シミュレーシ
 ョンの結果を基に製作したウーンフィルタ
 ー試作器を図 3.4 に示す。用いた磁石はネ
 オジウム磁石(表面磁束密度約 2000 G)で、
 長さ 140 mm、幅 12 mm、厚み 5 mm、磁
 石間隔は 18 mm とした。このとき磁極中
 心の磁束密度は約 1300 G となる。磁石は取
 り外しが簡単になるように、図 3.4(b)の
 ように真空内ではなく真空外に取り付け
 た。電極には長さ 140 mm、幅 10 mm、厚
 み 1 mm のアルミニウムを用いており、電
 極間隔 10 mm、スリット幅は 0 mm から
 2 mm

まで可変とした。

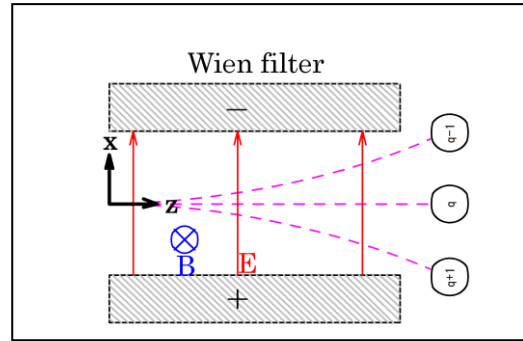


図 3.2 Wien filter 動作図

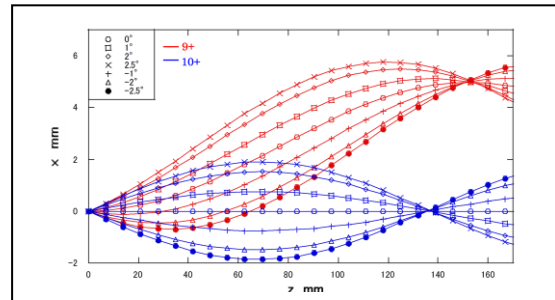


図 3.3 Wien filter 内の Ar^{9+} と Ar^{10+} の軌道

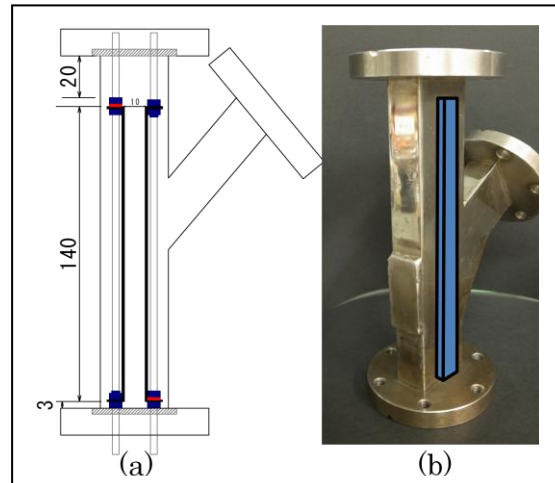


図 3.4 Wien filter 試作器

(a) 模式図, (b) 外観図

4. 評価

4.1 静電レンズ系の評価

CoBIT 内に Ar または N ガスを導入し、
 生成された多価イオンを引き出してその数
 を Micro Channel Plate (MCP) で計測した。
 装置概略図を図 4.1 に示す。MCP は CoBIT
 内部で発生する X 線を検知してしまうので、

引き出した多価イオンビームの軌道をベンダーで90度曲げた後にMCPに入射するようにした。ベンダーには内外の電極に大きさの等しい正負の電圧をそれぞれ印加した。ベンダーに印加した電圧を変化させたときのベンダーの直後(①)とディフレクター(磁石を取り外したウィーンフィルター)直後(②)にMCPを配置したときの多価イオンの計測数を図4.2に示す。レンズ系に電圧を印加していないときの計測数が100 cps以下であったのに対して、どちらの結果も25000 cps以上となっていることから、レンズ系は適切に作用していると言える。

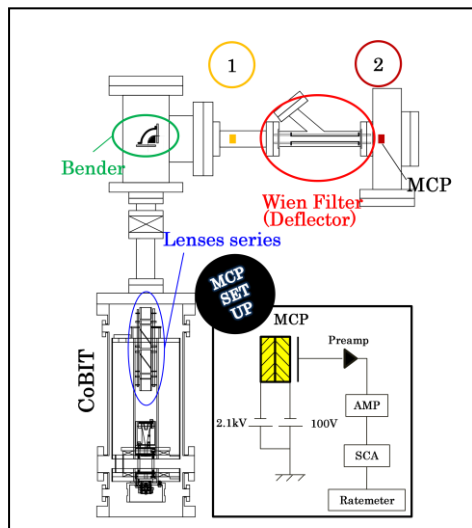


図 4.1 実験装置の概略図

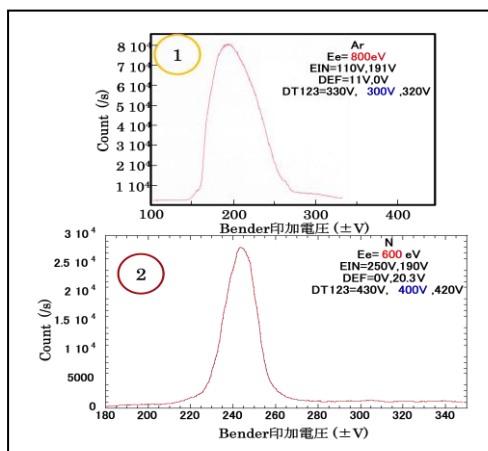


図 4.2 各位置でのイオン計測数

4.2 ウィーンフィルターの評価

イオン銃と CoBIT を用いてウィーンフィルターの性能評価を行った。イオン銃を用いた実験では、生成したイオンを 3 kV または 5 kV で加速させてウィーンフィルターに入射した。様々なガスやスリット幅など様々な条件下で実験を行い、スリット幅を 0.25 mm として、窒素を導入し 3 kV で加速した結果で分解能(ピークの座標 M と半値全幅 δM を用いて、 $M/\delta M$) 40 程度を得た。この結果はウィーンフィルターが CoBIT で生成される多価イオンの価数分析器として十分な分解能を有していることを示していたため、実際に CoBIT に接続して実験を行った。実験の概略図は図 4.1 と同じで、スリット幅 2 mm とした。図 4.3 は引き出し電圧 400V、電子ビームエネルギーは 11 価までを生成可能な 600 eV での Ar の Leaky モードでの結果である。ピークはいずれもガスの圧力を大きくすることでカウントも増加するため Ar のものであると予想できるが、様々な電子ビームエネルギーでトラップの状況を変化させた場合でも高価数イオンの存在は確認できなかった。また、現れたピークも計算値とはズレており、詳しく同定することはできなかった。

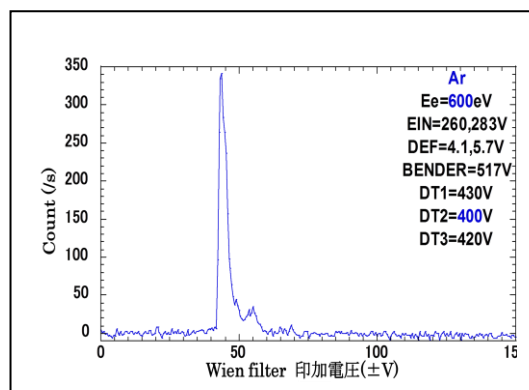


図 4.3 Leaky モードでの Ar の結果

Dumping モードでは DT2 の電圧を上げる方法と DT3 の電圧を下げる方法の 2 つの方法で実験を行った。どちらもカソード電圧は 500 V、Dumping の間隔は 2 Hz で、導入ガスは Ar を用いた。DT1 = 430 V、DT3 = 420 V として DT2 の電圧を 400 V から 450 V に上げる方法でウィーンフィルターの電極電圧を掃引した結果を図 4.4 に示す。DT2 を制御して行った実験では Leaky モードや DT3 を制御して行った結果とは異なり、3 価以上のイオンと思われるピークを観測した。しかしながら再現性が悪く、磁石の取り付け精度に敏感なことから、ウィーンフィルター内外において電磁場の遮蔽が不十分であることなどが考えられる。

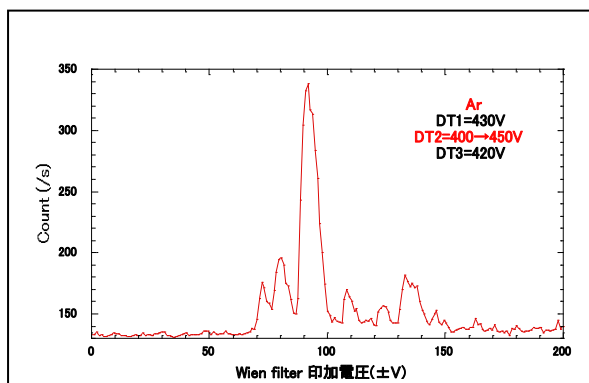


図 4.4 DT2 制御 Dumping モードの結果

5. まとめ

本研究では CoBIT で生成された多価イオンを引き出し、衝突実験を可能にするための専用ビームラインを製作した。多価イオンビームを収束させるためのアインツェルレンズ、軌道を小角偏向させる偏向器、イオンを 90 度偏向させるための静電ベンダー、価数分析器としてウィーンフィルターを製作し、これらの性能評価を行った。アインツェルレンズは SIMION を用いてビ

ーム軌道シミュレーションを行った結果を基に、その形状を決定した。ウィーンフィルターは計算に基づいて形状を、SIMION の結果から磁場強度を決定し、試作器を製作した。イオン銃を用いたウィーンフィルターの評価実験から、入射スリット幅 0.25 mm のとき、 $M/\delta M = 40$ 程度の分解能があることがわかった。一方、試作器を CoBIT ビームラインに取り付けたときの性能評価実験では、不明な点が多いため、今後追加実験により明らかにすることが必要である。

今後の予定としては、トラップの深さや引き出しエネルギーに対する依存性などを、多種多様な元素の多価イオンで試験して、様々な結果を蓄積していくことと再現性が無い原因を特定し、それを改善することである。また、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。例えば Ar であれば、2p-3s 遷移(波長 4.87 nm)を観測することで、8 価の存在を確認することができる。トラップ内で多価イオンが生成されているにもかかわらずウィーンフィルター後方で検知できない場合は、ベンダーやウィーンフィルターの電磁極の形状や長さ、電磁場の遮蔽方法を再検討し改良することで、CoBIT ビームラインの性能向上を図る。