

修士論文

ECR イオン源からの
イオンビーム引き出し効率の評価

Evaluation of extract efficiency of ion beam from ECR ion source

平成 15 年 2 月

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻知能機械システムコース

野尻・百田研究室

齊原光和子

目次

第1章 序論	3
第2章 ECR イオン源の動作原理	
2.1 イオン化	5
2.2 ビーム化	9
2.3 イオンビーム電流量の予測値	11
第3章 装置	
3.1 イオン生成	15
3.2 引き出し系	17
第4章 測定原理	
4.1 ファラデーカップによる測定	18
第5章 測定結果	
5.1 測定方法	20
5.2 測定結果	21
第6章 解析	
6.1 イオンビーム引き出し効率の評価	22
第7章 結論	28
第8章 付録	
8.1 測定値、測定条件	29
8.2 ビーム輸送	32
8.3 ビーム選別	34
参考文献	36
謝辞	37

第 1 章 序論

イオンビームとは中性粒子から電子を剥ぎ取り正に帯電させたイオンを、電場によって方向と速度を揃えてビーム化したものである。

イオンビームは以下のような分野で応用されている。

1、工学

- ・ 半導体素子の生成 - 半導体へのイオン注入
- ・ 高温超電導物質 - イオン注入による高温超電導体の生成
- ・ 宇宙環境効果 - イオン照射による材料の特性(材料強度等)の変化

2、生物、医学

- ・ 品種改良、DNA 損傷 - イオン照射による遺伝子の操作
- ・ ゲノム解析 - 放射性原子核による遺伝子の標識化
- ・ マルチトレーサー - 放射性原子核による化学物質の標識化
- ・ がん治療 - がん細胞への選択的なイオン照射

3、加速器技術

- ・ 慣性核融合 - プラズマの生成

4、物理学

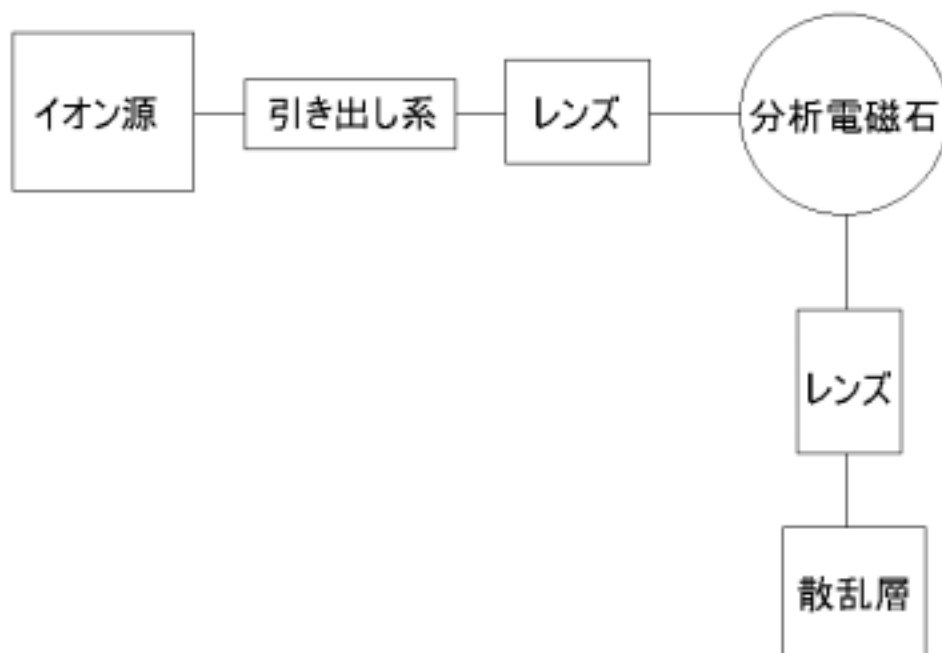
- ・ 原子、原子核の構造解明 - 原子衝突、原子核反応の実験的研究
- ・ ビッグバンや天体における元素生成 - 不安定核、低エネルギーにおける原子核反応
- ・ 結晶構造、不純物物性 - 不純物が物質内部で感じる場

未だ物理学の世界において解明されていない多価重イオンビームの振る舞い、多価重イオンビームと物質との衝突現象、多価重イオンビーム衝突後の物性の変化、ナノテクノロジー等の研究を行う為に多価重イオンビームを生成して選別し、ターゲットに照射する高電離重粒子線発生装置を構築した。

本論文ではこの高電離重粒子線発生装置の中でも多価重イオンを生成する装置である ECR イオン源の引き出し効率について評価する。

今回構築した ECR イオン源の特色は多価重イオンビームの生成が可能な点である。多価重イオンとはイオン化させる対象が重イオンと呼ばれる原子番号 3(Li ; リチウム)以上の元素のイオンで、そこから電子を 2 個以上剥ぎ取ったものである。この多価重イオンの内部構造や物質との相互作用も未だに解明されるべき研究対象である。さらに、この多価重イオンビームを様々な標的に当てることによってその衝突現象や衝突による物性の変化を研究することができる。

この高電離重粒子線発生装置は図 1 のように大きく分けると中性粒子から電子を剥ぎ取りイオンを生成するイオン源、それを電場によって引き出す引き出し系、生成された多価重イオンビームをレンズによって集束させる輸送系、磁場によってイオンビームを曲げ、必要なイオンを選別する分析電磁石などからなるが、今回評価するのはイオン源及び引き出し系とした。



< 図 1 高電離重粒子線発生装置全体図 >

製作したイオン源の性能を評価する為にイオン源からのイオンビーム引き出し電極電圧に対するイオンビーム電流値を測定する。測定された電流値は引き出し電極によるイオンビームの引き出し効率を反映する物理量である。引き出し電極に印加する電圧の関数としてビームの電流値を測定すれば、引き出し電極の電場が引き出し効率にどのように影響するかが議論でき、構築した装置の評価が可能となる。

第 2 章 ECR イオン源の動作原理

2.1 イオン化

イオンとは、中性原子または分子がいくつかの電子を失うか得るかして電荷を帯びた粒子である。電子を失った場合、正の電荷を帯びるため正イオンといい、2 個以上の電子を失ったときに多価イオンという。

中性粒子から正イオンを生成する過程は以下のように分類される。

高速粒子との衝突による電離

- ・ 電子との衝突
- ・ イオン・中性粒子との衝突
- ・ 電荷変換
- ・ 光電離

金属表面との相互作用による電離

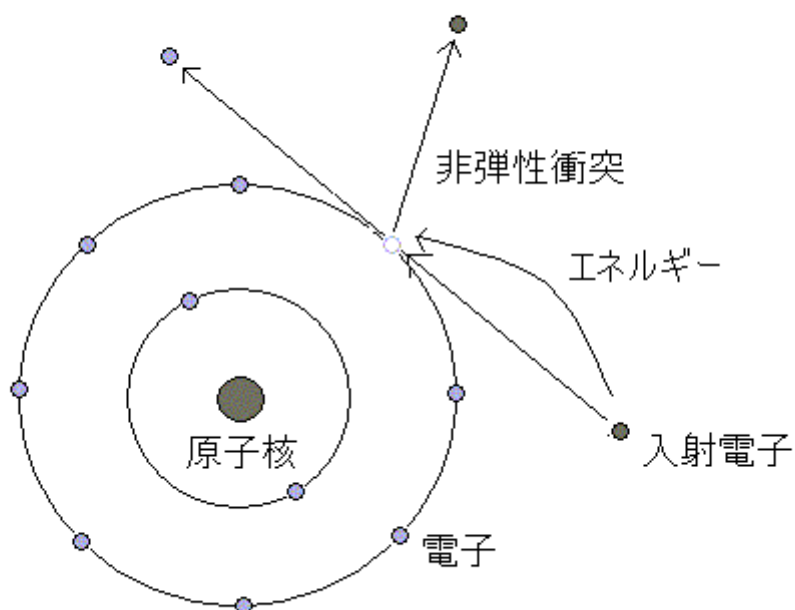
- ・ 表面電離
- ・ 電解電離
- ・ 2 次イオン放出

は中性粒子に電離電圧以上のエネルギーを持った高速粒子が非弾性衝突を起こし、中性粒子内の電子に十分なエネルギーを与えて電離する過程である。

は金属表面と中性粒子の間で電子のやり取りをすることによって電離する過程である。

このうち、今回構築した高電離重粒子線発生装置ではイオンの生成に ECR イオン源を採用している。ECR イオン源は の過程を利用している。

この ECR イオン源において電離は、図 2 のように中性粒子と電子との衝突によって行われる。電離させるために中性粒子に衝突させる電子のことを入射電子と呼ぶ。



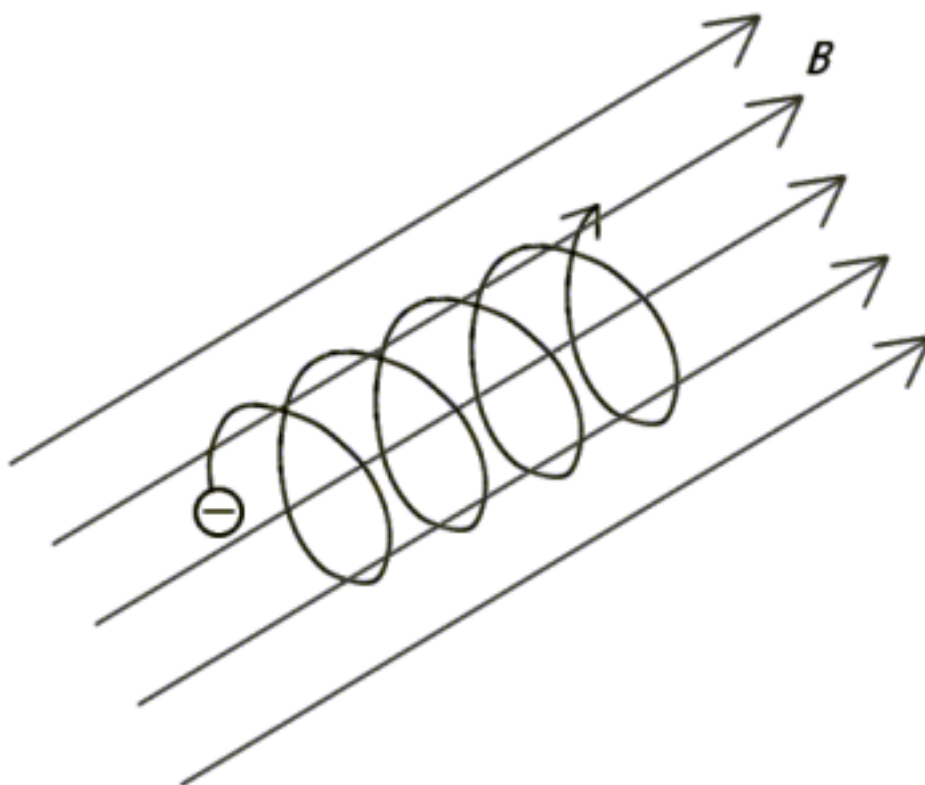
< 図 2 入射電子による中性粒子のイオン化 >

基底状態にある中性粒子から最外殻の 1 個の電子を無限遠まで引き離して正イオンと 1 個の自由電子とに解離させるのに要するエネルギーのことを電離電圧といい、[eV] (エレクトロンボルト、 $1[eV]=1.602\times 10^{-19}[J]$) の単位で表す。電離電圧以上の運動エネルギーを持った入射電子が原子や分子などの中性粒子に入射するとき、入射電子はその電界によって中性粒子の最外殻電子と相互作用をする。入射電子により最外殻電子は電離電圧以上のエネルギーを得て中性粒子から離れ、原子や分子は電離する。

原子をイオン化するために必要なイオン化エネルギーは内殻になるほど高い。よって、多価イオンを生成するためには高いイオン化エネルギーが必要となる。

ECR によってイオン化にあずかる電子の速度 v が増大すると、運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ が増大する。(運動量 mv も増大する。) v^2 に比例してエネルギーが増大することにより効果的に入射電子のエネルギーを高くすることが出来るので、多価のイオンを生成出来る。

入射電子の v を大きくするためには、サイクロトロン共鳴を利用する。磁束密度 B の磁場内で速度を持つ電子には、ローレンツ力が働く。これにより、 B が一様ならば粒子は、 B に垂直な面内の等速円運動と B 方向の等速度運動とを組み合わせたらせん運動を行う。これをサイクロトロン運動という。サイクロトロン振動数に等しい電磁波を印加するとそれを共鳴的に吸収するので、電子の運動エネルギーを増大させることができる。



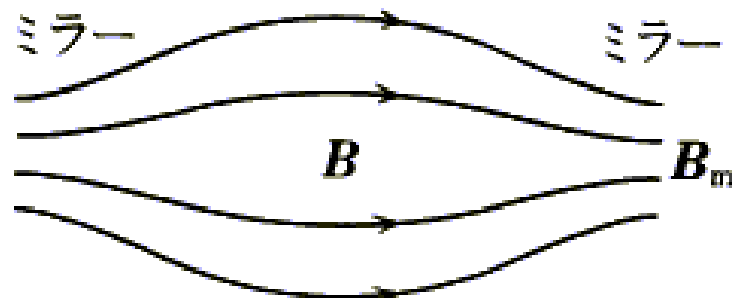
< 図 3 サイクロトロン運動 >

こうしてプラズマ生成室内には中性粒子と入射電子、電離したイオンと電子が混在するプラズマが生成される。その限られた空間でイオンが生成室の壁面と衝突すると、壁面から電子を受け取って再結合し、中性化される。また、負の電荷を持つ電子が正の電荷を持つイオンからクーロン力によって引力を受け、ビームとして引き出されるイオンとともにプラズマ生成室から引き出される。これを防ぐためにプラズマを生成室内で閉じ込める必要がある。

プラズマの閉じ込めは、プラズマ拡散が持つ次のような性質を利用している。

電子はイオンより質量が極めて小さいので、プラズマ中での熱運動の速度はイオンに比べて圧倒的に大きい。このため電子がまず先に拡散しようとする。しかし、そうすると荷電分離が起こってプラズマの中性状態が崩れるが、同時に電子集団とイオン集団の間に互いに引き合うクーロン力が働くので、電子拡散が抑えられるとともにイオン拡散の方は加速される。こうして、結局、プラズマは中性を保ちながら、電子はイオンと同一速度で拡散することになる。したがって、電子を閉じ込めれば、プラズマを閉じ込めることが出来る。

ミラー磁場は図4に示すように両端で磁場を強くした紡錘形の磁場配位で、ミラー効果によって中にプラズマを閉じ込めるものである。

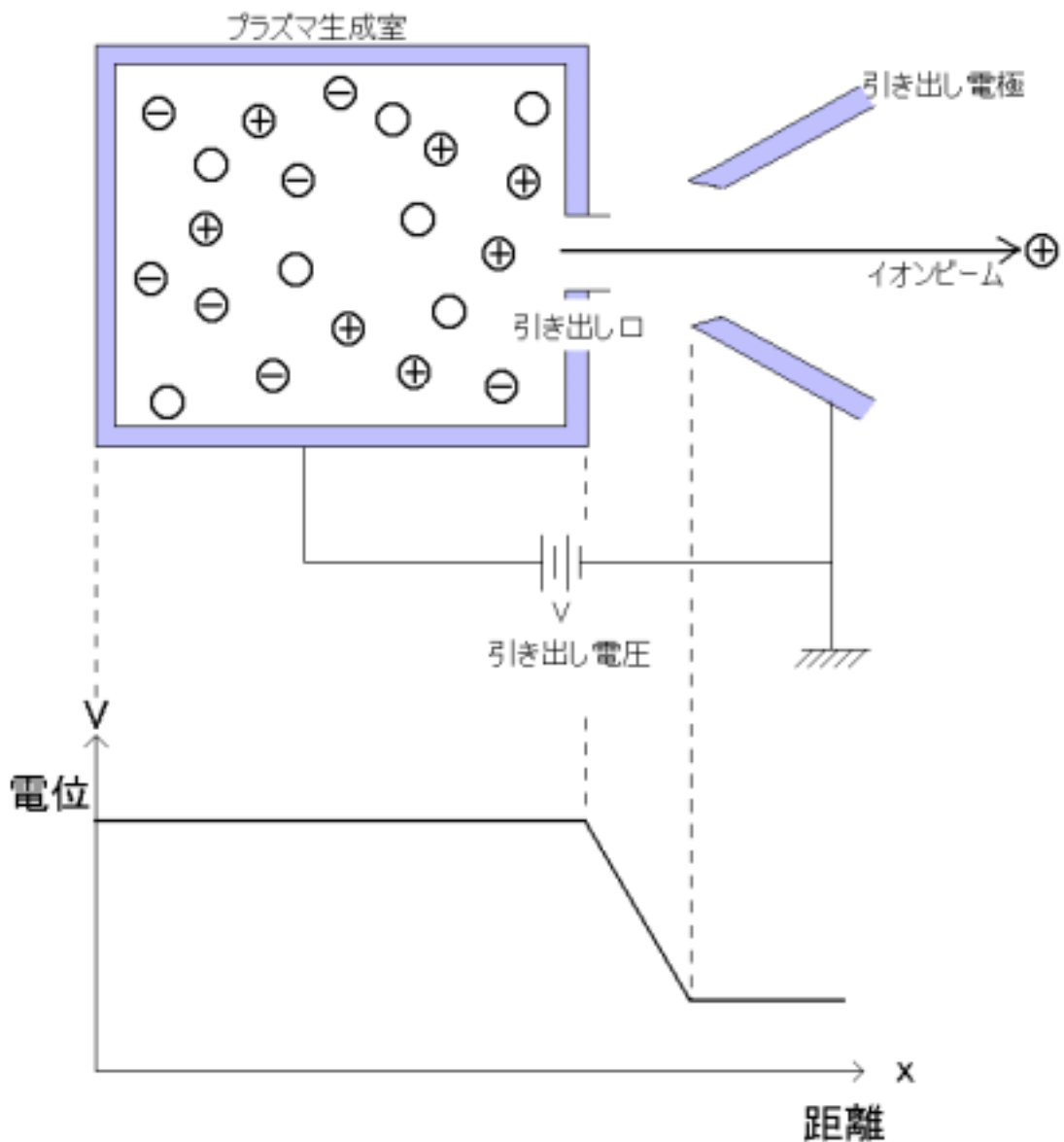


< 図4 ミラー磁場 >

磁力線が漏斗状に収束している領域をミラーといい、磁場はここで強くなる。荷電粒子がミラーに近づくと、らせん運動のピッチ角が増し、 90° に達するとミラーから遠ざかる。このように荷電粒子がミラーで斥力をうける現象をミラー効果という。

2.2 ビーム化

プラズマ生成室で生成されたプラズマ中には、中性粒子、電子、正イオンが混沌とした状態で存在している。イオンビームを生成する為には、ガスの状態でプラズマ生成室に閉じ込められているイオンのみを取り出し、その方向とエネルギーを揃えてビーム化しなければならない。中性粒子、電子、イオンが閉じ込められ電気的には中性のプラズマ生成室からイオンのみを引き出す為には引き出し電極を利用する。



< 図 5 プラズマ生成室と引き出し電極の形状と電位 >

引き出し電極とプラズマ生成室は図 5 のように電源につながっている。

引き出し電極には電圧がかけられ、引き出し電極がプラズマ生成室より低い電位に保たれている。正の電荷を持つイオンは電場方向、つまり電位の低い方へ加速される。こうしてプラズマ生成室から引き出されるイオンの加速は一方向に揃っているのでビーム化される。

加速された電子の運動エネルギーは、速度 v 、エネルギーに相当する電圧 V 、電子温度 T_e などで表現される。上記三者の間には以下のような関係がある。

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = eV = kT_e \quad (k = \text{ボルツマン定数}; 1.380658 \times 10^{-23} [J \cdot K^{-1}]) \quad (2 - 1)$$

(2 - 1)式から、イオン温度が一定ならプラズマ生成室中のイオンの運動エネルギーも一定だといえる。一定の運動エネルギーを持つイオンは引き出し電極の電場によって加速されるが、この電場は一定の強度を持っているので、引き出された後もイオンは揃ったエネルギーと方向を持つビームとなる。

2.3 イオンビーム電流量の予測値

高電離重粒子線発生装置の性能を評価する為にイオン源からのイオンビーム引き出し電極電圧値に対する電流量を予測する。

引き出し電極によってプラズマ生成室から引き出されたイオンビーム電流量を計算する為には空間電荷効果を考慮しなければならない。同じ種類の荷電粒子が接近すると、クーロン斥力によって互いに反発しあう。イオンビームは正イオンが 1 個ではなく粒子群の状態で固まっている。このような荷電粒子群では 1 つ 1 つの粒子が周りのあらゆる方向に対して、同種の電荷を持つ荷電粒子を反発する電場を生じる。すなわち、荷電粒子ビームにおいて、粒子の進む方向にはその電場が荷電粒子ビーム電流量を制限する形で現れ、粒子の進行方向に対して直交する方向にはビーム幅や径を発散させる形で現れる。これを空間電荷効果という。

イオン引き出し口から引き出される電流は、イオン自らが持つ正の空間電荷により電場が変化し、引き出し得るイオン電流は、次式で示されるように空間電荷に制限された電流量となる。

$$I_{si} \cong 4.3 \times 10^{-8} \left(\frac{2a}{d}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot V^{\frac{3}{2}} \quad (2-2)$$

I_{si} : 空間電荷制限電流[A]

a : 引き出し口半径[cm] (図 6 参照)

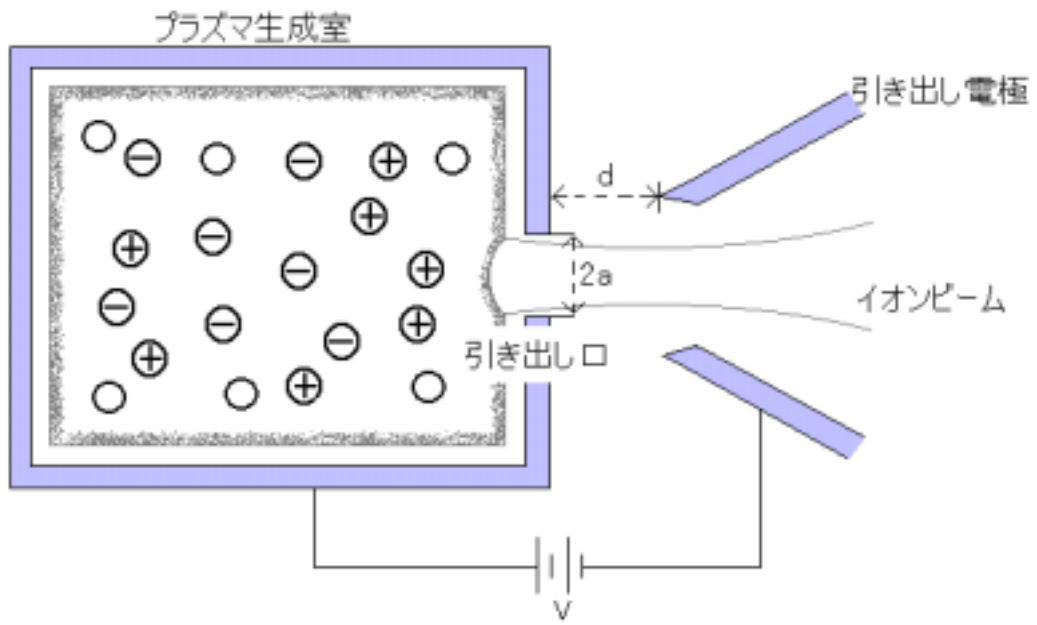
d : 引き出し電極間隔[cm] (図 6 参照)

M : 引き出すイオンの質量数

V : 引き出し電圧[V]

式(2-2)より、イオンに対する空間電荷制限電流は、イオンの質量が重い分、すなわち質量の $\frac{1}{2}$ 乗に反比例して空間電荷効果が大きく効いて電流が小さくなり、 $V^{\frac{3}{2}}$ に比例して電流が大きくなる事が分かる。

*式(2-2)の参考文献 - 石川順三著 ; 『イオン源工学』、 p.2

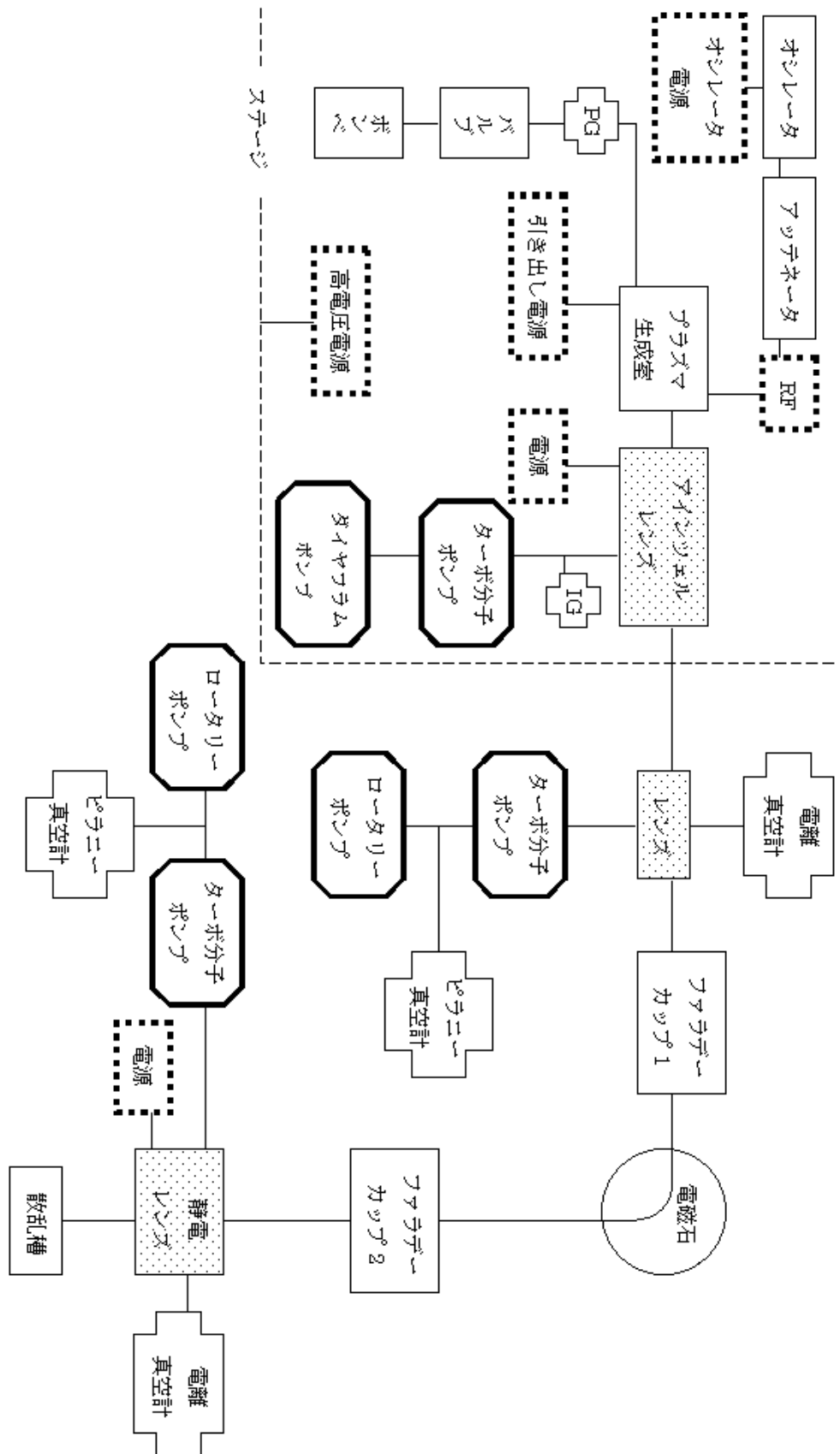


< 図 6 引き出し電極と引き出し口 >

第3章 装置

高電離重粒子線発生装置は大きく以下のように分けられる。(図7参照)

- ・ガス導入系 - プラズマ生成室にガス状にしたイオン化物質を送るポンペ
- ・プラズマ生成系 - プラズマ生成室に高周波電磁波を導入する高周波電源、中性粒子をイオン化するイオン源(プラズマ生成室)
- ・引き出し系 - イオンを引き出しビーム化する引き出し電極
- ・輸送系 - ビームを集束するアインツェルレンズ
- ・分析系 - ビームを分析・選択する分析電磁石、選択されたビームを再び集束する静電レンズ



＜図 1 ビームライン＞

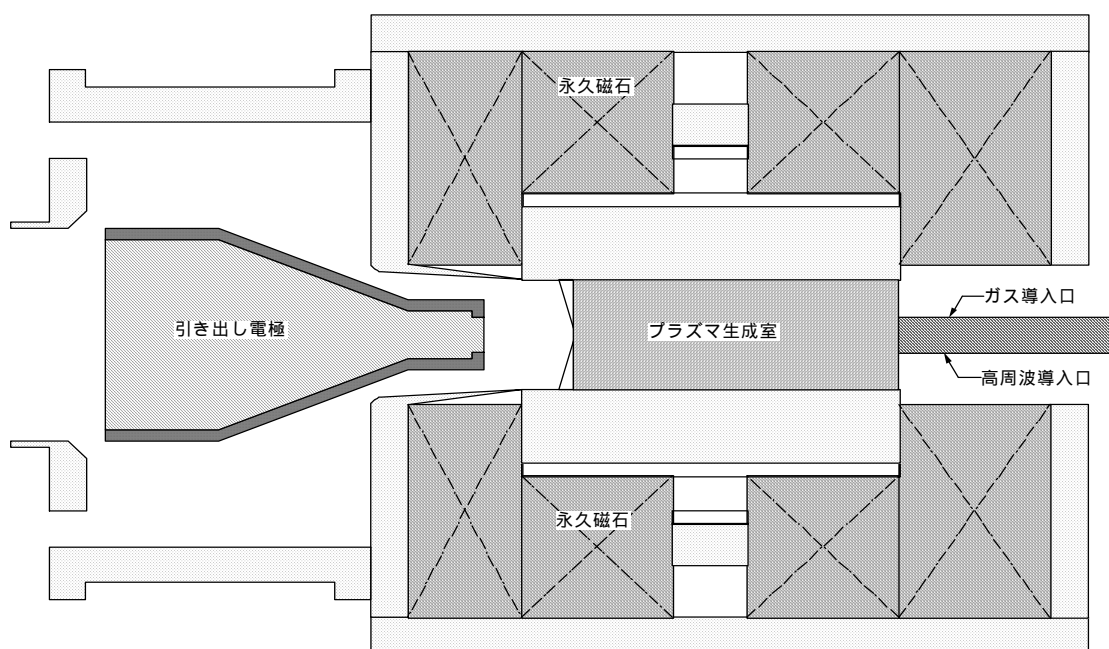
3.1 イオン生成

今回中性粒子をイオン化させるのに使用したイオン源は PANTECHNIK 社製 MANOGAN ION SOURCE である。このイオン源は ECR(Electron Cyclotron Resonance) イオン源と呼ばれる多価重イオン源である。

ECR イオン源はミラー磁場中に閉じ込められたプラズマに、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 条件を満たす周波数の高周波電磁波を導入することによってプラズマ中の電子を加熱し、その結果イオンの電離効率を高めて主に多価イオンを生成させることを目的としたイオン源である。

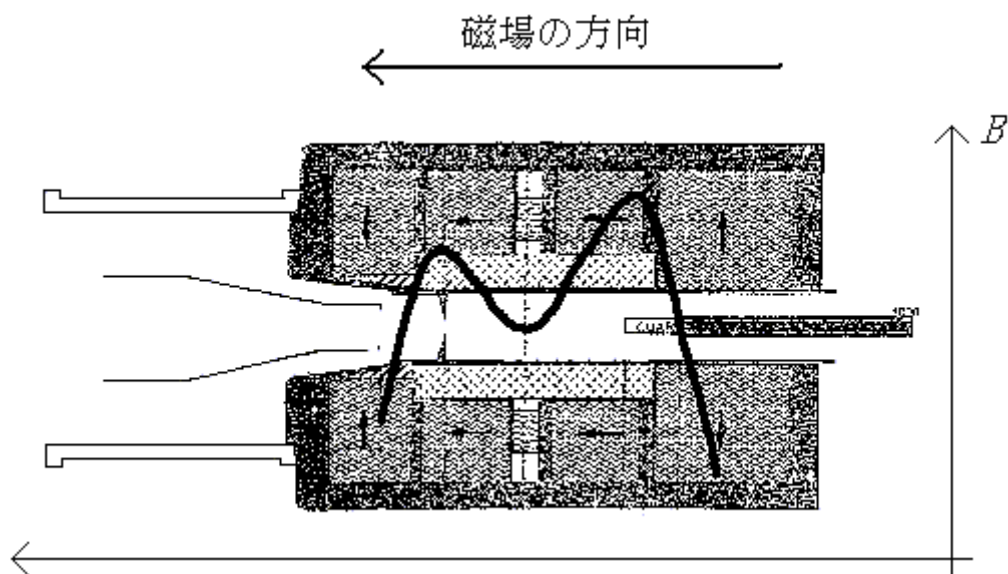
生成されたイオンはプラズマ生成室内にミラー磁場によって閉じ込められる。

図 8 は ECR イオン源の断面図である。図 8 でプラズマ生成室を取り囲むようにして配置されている磁石が ECR に必要な磁場を作り出し、かつミラー磁場を形成しプラズマを閉じ込める。



< 図 8 ECR イオン源断面図 >

また、実際に使用した PANTECHNIK 社製 MANOGAN ION SOURCE でのプラズマ生成室内の磁場強度は図 9 のようになっている。

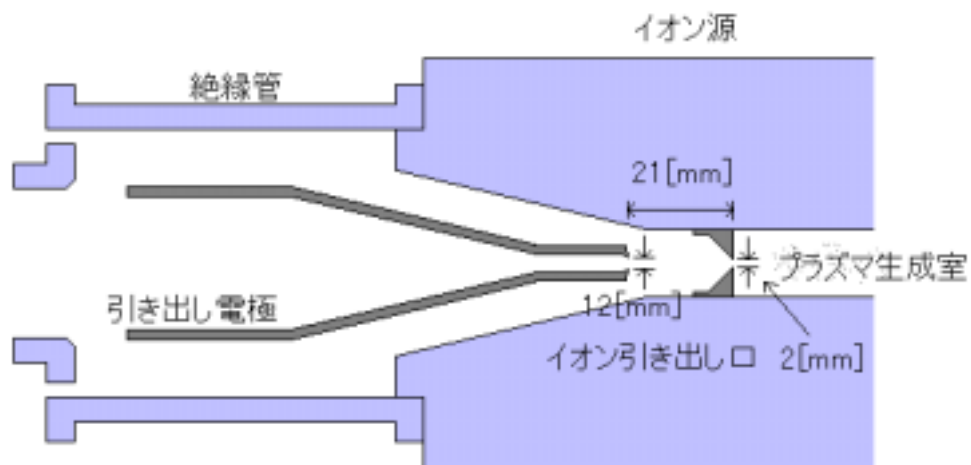


< 図 9 実際のプラズマ生成室内の磁場強度 >

3.2 引き出し系

プラズマ生成室で生成されたイオンは引き出し電極によって引き出され、初めて速度とエネルギーのそろったビームになる。

この引き出し電極は引き出し電圧 V_{ext} をかけることによってプラズマ生成室と電位差を作り、イオンをプラズマ生成室から引き出す。実際の引き出し電極の寸法は図 10 に示す通りである。



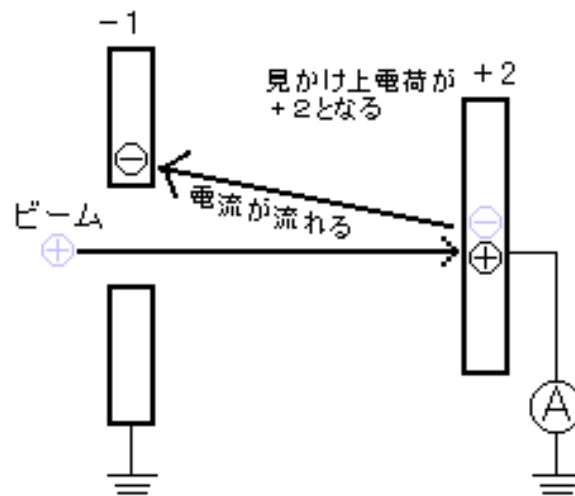
< 図 10 引き出し電極寸法 >

第 4 章 ファラデーカップによる測定

4.1 測定原理

イオン源で生成されたイオンビームはファラデーカップで電流値を測定する。

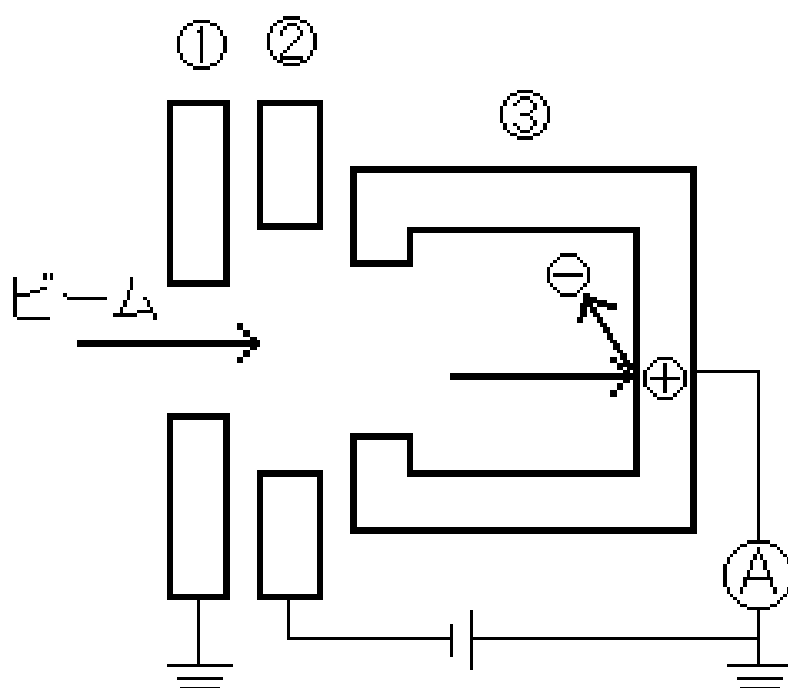
高エネルギーイオンが固体表面に衝突すると、イオンの電子と固体構成原子の電子との相互作用によって 2 次電子が放出される。イオン集極からイオンビームの衝突によって弾き出された 2 次電子は図 11 のように電極に拾われ、その結果イオン集極に電流が流れたことになり、見かけ上打ち込まれたイオンの数が多く見える。イオンビームの正確な電流値を測定するためには、2 次電子の影響が無いような工夫が必要である。その為にはイオン集極から 2 次電子ができるだけ外部に出ない構造にすることが第 1 である。その構造はカップ型の構造であり、この形の電流測定装置をファラデーカップという。



< 図 11 ファラデーカップの問題点 >

図 12 のように、2 次電子ができるだけ外部に出ないようにビームを打ち込むイオン集極(電極)をカップ構造にする。また、イオン集極の上流に電極(2 次電子抑制電極)を設置し、イオン集極に対し負の電位の電圧を印加して電場を発生させる。その電場によるクーロン力によって、イオン集極から発生した 2 次電子をカップの中に抑える。

電極は測定するイオンビーム径を制限し、2 次電子抑制電極にあたらないようにする。2 次電子抑制電極にあると 2 次電子が生成され、カップに捕捉されてビーム電流が見かけ上少なくなってしまうからである。



< 図 12 ファラデーカップ断面図 >

第5章 測定結果

5.1 測定方法

Ar ガスをプラズマ生成室に導入し、引き出したイオンビーム電流の引き出し電圧依存性を以下の初期条件で測定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{rf} = 8[\text{W}] \\ P_{ref} = 1[\text{W}] \\ \text{Attenuator} = 7.6[\text{dB}] \\ V_{lens} = 8.3[\text{kV}] \\ I_{lens} = 0.04[\text{mA}] \\ \text{IG} = 2.0 \times 10^{-4} [\text{Pa}] \\ \text{PG} = \text{ur-2}[\text{Pa}] \text{ (ピラニーゲージの測定可能範囲外のため数値なし)} \end{array} \right.$$

但し、

- ・ P_{rf} : RF 強度
- ・ P_{ref} : RF 反射
- ・ Attenuator : 減衰比
- ・ V_{lens} : アインツェルレンズの電圧値
- ・ I_{lens} : アインツェルレンズの電流値
- ・ IG : イオンゲージの真空度
- ・ PG : ピラニーゲージの真空度

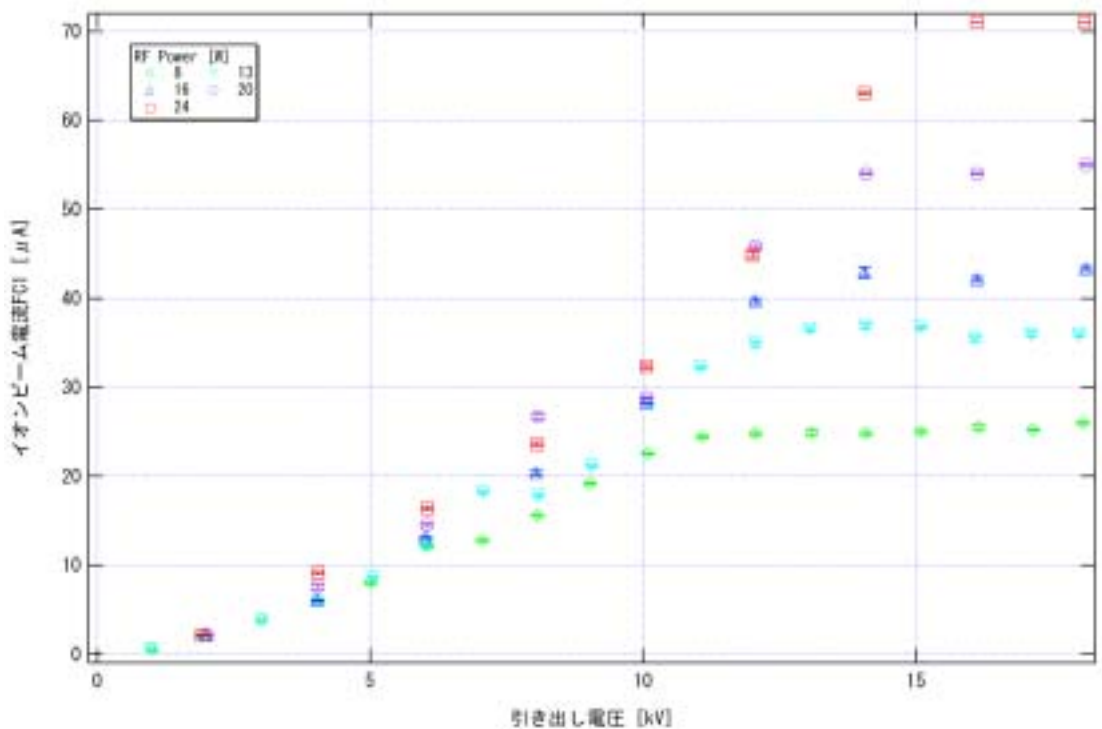
である。

P_{rf} を 8,13,16,20,24[W]と変えてイオンビーム電流量(I_{FC-1})の引き出し電圧(V_{ext})依存性を測定した。なお、イオンビーム電流量は分析電磁石で分析する前のファラデーカップ 1(FC-1)で測定した。(図7参照)

また、条件を変えるとき、常に I_{FC-1} が最大になるように V_{lens} を調整した。これによって常に FC-1 にビームを集束させた。

5.2 測定結果

異なる P_{rf} 条件における、引き出し電圧(V_{ext})のイオンビーム電流量(I_{FC-1})依存性をグラフ 1 に示す。



<グラフ 1 イオンビーム電流値の引き出し電圧依存性測定値>

グラフ 1 は RF 強度(P_{rf})を変えたときの引き出し電圧に対するイオンビーム電流値のグラフである。一番下からは 8[W]、は 13[W]、は 16[W]、は 20[W]、は 24[W]と RF 強度が大きくなっている。また、このイオンビーム電流値は分析電磁石で選別前のファラデーカップ 1 で測定しているので、様々な種類や価数のイオンが混ざっている。

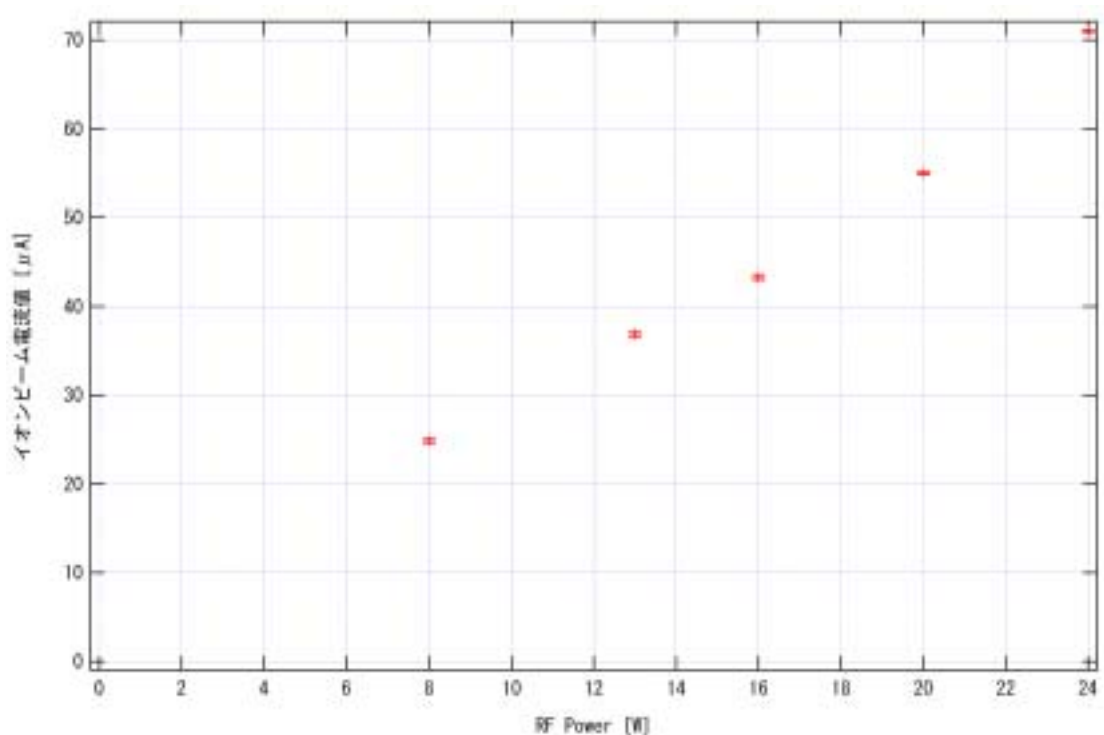
測定値、測定条件の詳細は第 8 章(p.29-)参照。

第 6 章 解析

6.1 イオンビーム引き出し効率の評価

第 5 章の測定結果から、以下のことが分かった。

まず、2.3 で述べたように、引き出し電圧と共にビーム量が増加し、ある電圧以上ではビーム量は飽和してそれ以上増加しなくなる。



< グラフ 2 RF 強度を変えたときのイオンビーム飽和電流値 >

また、グラフ 2 は RF 強度に対する測定したイオンビームの飽和電流値を示したグラフである。

RF 強度を大きくすると、飽和電流値が大きくなり飽和点に達する引き出し電圧値も共に大きくなっている。これは RF 強度を大きくするとプラズマ生成室内のイオン化効率が良くなり、イオン密度が増すことによって引き出し可能なイオン量が大きくなることによる。

2.3 で算出した空間電荷制限電流値と実測値を比較する。

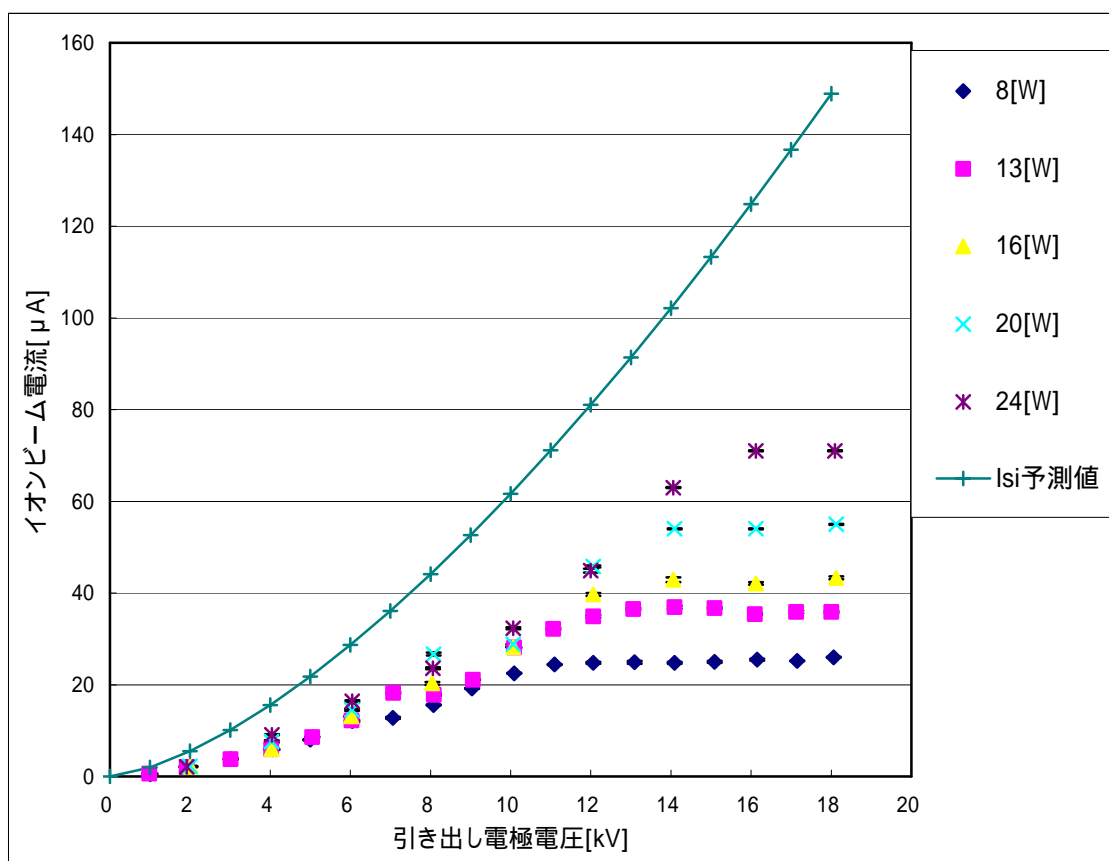
今回の測定では、以下の数値をそれぞれ代入する。

M=40(Ar)

a=0.1[cm]

d=2.1[cm]

a、d、M の値を式 2 - 2 に入れると各引き出し電圧におけるイオンビーム電流量を計算できる。グラフ 3 は引き出し電圧値に対するイオンビーム電流値の予測値と実測値の比較のグラフである。



< グラフ 3 イオンビーム電流の予測値と実測値の比較 >

この結果から、電流飽和前までのイオンビーム電流実測値が予測値よりも平均約 2.28 倍小さいことが分かった。

実測値が予測値よりも小さくなる要因としては、以下のようなことが考えられる。

- ・ 引き出し電極にイオンビームが衝突して、ファラデーカップに打ち込まれるイオンビーム量が減る。

但し、引き出し口径に比べて引き出し電極口径は 6 倍なので、面積にすると 36 倍大きい。更に引き出し口から引き出し電極までの距離は 21[mm]とごく短いので、その間に引き出し口から引き出されたイオンビームが拡散し、引き出し電極に衝突する確率は低いと思われる。従ってイオンビーム量が抑制される大きな原因になるとは考えにくいですが、可能性は捨てきれない。

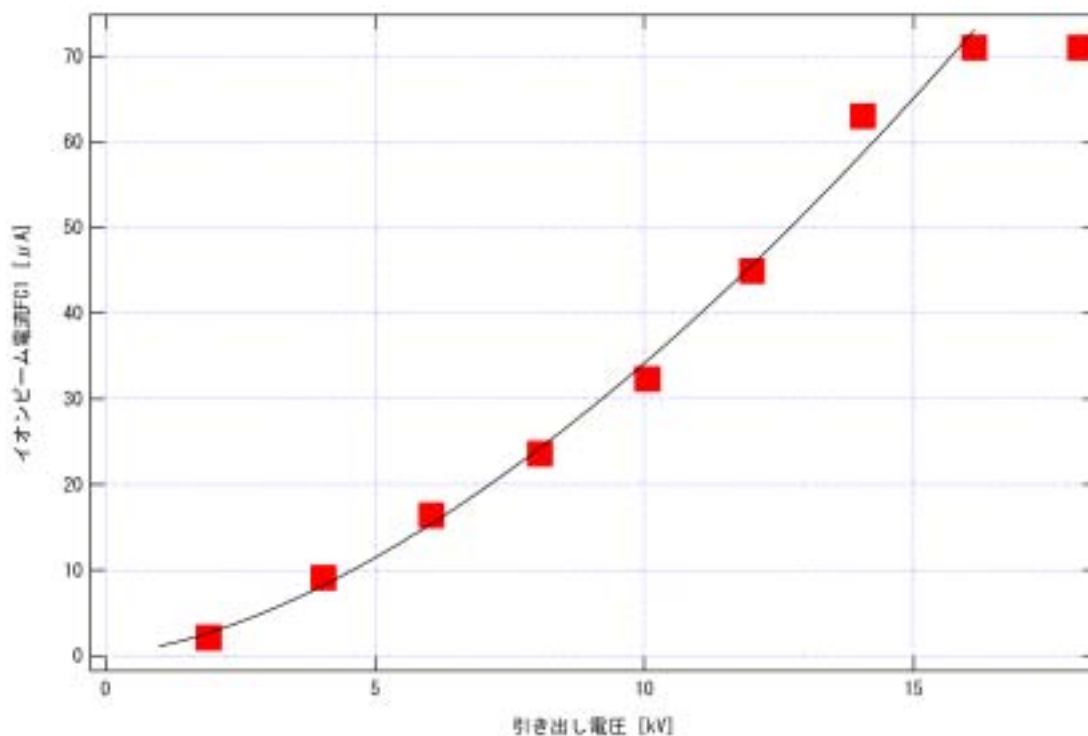
- ・ イオンビームを集束するアインツェルレンズの電極が歪みを生じており、イオンビームの進行方向の軸がずれてイオンビームの一部がファラデーカップに入らない。

アインツェルレンズの詳しい説明は 8.2.2 の付録に記載している。歪んだアインツェルレンズの電極が作る電場によってイオンビームの軸がずれると真っ直ぐ進むことが出来ず、サブレッサーと呼ばれるファラデーカップの第 2 電極やファラデーカップの上流に設置されているスリットに衝突し、イオンビーム量が抑制される原因となる。

- ・ ファラデーカップの前に設置されているスリットにより、イオンビームが遮られ、ファラデーカップに打ち込まれる量が減る。

以上のような理由でイオンビーム電流実測値が予測値よりも小さくなったと考えられるが、それ以前に空間電荷制限電流を算出するための式 2 - 2 は理想的な状態で考えられている。そのため、測定結果と予測値の単純な比較は難しいが、オーダーはさほど違ってないことから引き出し電極に問題はないと判断できる。

また、測定値を Fitting することによって引き出し電極によるビーム化が正常に行われているかを評価する。



<グラフ 4 引き出し電極依存性の $V^{\frac{3}{2}}$ Fitting >

グラフ 4 は RF 強度が 24[W] のときのイオンビーム電流値の引き出し電極依存性グラフを $I = k_1 V^{k_2}$ で Fitting したものである。イオンビーム電流値が飽和する前までを対象とし、飽和して以降は Fitting の範囲に入っていない。

Fitting の結果、

$$k_1 = 0.9 \pm 0.2$$

$$k_2 = 1.6 \pm 0.1$$

となった。

但し、Fitting 誤差は標準偏差をとり算出した。

この結果より、 $P_{rf} = 24[W]$ のときのイオンビーム電流値の引き出し電圧依存性は

$$V^{1.427} \sim V^{1.773} \text{ となり、} V^{\frac{3}{2}} \text{ に合う。}$$

測定結果から考えると、その関数は $V^{\frac{3}{2}}$ に沿ったカーブと電流値が飽和したあとの直線からなっている。 $P_{rf}=8\sim 24[\text{W}]$ のそれぞれの場合について関数を出すと以下のようになった。

$P_{rf}=8[\text{W}]$ のとき、

$$I = \begin{cases} (0.9 \pm 0.3) V_{ext}^{1.4 \pm 0.1} & (0 < V < 10) \\ (22.7 \pm 0.7) + (0.2 \pm 0.1) V_{ext} & (11 < V < 18) \end{cases}$$

$P_{rf}=13[\text{W}]$ のとき、

$$I = \begin{cases} (0.7 \pm 0.3) V_{ext}^{1.6 \pm 0.2} & (0 < V < 11) \\ (35.9 \pm 2.3) + (0.01 \pm 0.15) V_{ext} & (12 < V < 18) \end{cases}$$

$P_{rf}=16[\text{W}]$ のとき、

$$I = \begin{cases} (1.0 \pm 0.3) V_{ext}^{1.4 \pm 0.1} & (0 < V < 12) \\ (34.6 \pm 4.0) + (0.5 \pm 0.3) V_{ext} & (14 < V < 18) \end{cases}$$

$P_{rf}=20[\text{W}]$ のとき、

$$I = \begin{cases} (10.0 \pm 0.3) V_{ext}^{1.5 \pm 0.1} & (0 < V < 12) \\ (50.3 \pm 2.3) + (0.2 \pm 0.1) V_{ext} & (14 < V < 18) \end{cases}$$

$P_{rf}=24[\text{W}]$ のとき、

$$I = \begin{cases} (0.9 \pm 0.2) V_{ext}^{1.6 \pm 0.1} & (0 < V < 16) \\ 71 + V_{ext} & (V=18) \end{cases}$$

今回の測定では、 V_{ext} を 18[kV]以上に上げることが出来なかった為、24[W]のときの直線は1点でのみしか取ることができなかった。

V_{ext} を上げられなかった理由は、それ以上に引き出し電圧をかけると、引き出し電圧を囲んでいる絶縁管の表面で放電が起こることによる。

今後の実験では、

- ・ イオン源の絶縁管のクリーニングをする
- ・ ガス圧を調整する

など、放電が起こらないよう工夫してデータを取っていく必要がある。

第7章 結論

ECR イオン源の引き出し電極が正常に稼動しているかを実証する為、ECR イオン源におけるイオンビーム電流値の引き出し電圧依存性を測定した。

測定結果から、以下のことが分かった。

1. 引き出し電圧の増加に伴い、ビーム量の増加、飽和の現象が見られる。
2. 飽和前のイオンビーム電流の実測値は I_{Si} 予測値の約 $\frac{1}{2.28}$ と小さい。
3. イオンビーム電流値の引き出し電圧依存性は $V^{1.427} \sim V^{1.773}$ となり、 $V^{\frac{3}{2}}$ の法則に合う。

まず 1 は、引き出し電圧を上げていくとイオンビーム量が増し、そのうち飽和する。また、RF 強度を上げると飽和電流値が大きくなることから、イオン化効率の RF 強度依存性の理に適合しており、引き出し電極が正常に機能していることが確認できた。

次に 2 については、実測値が予測値の約 $\frac{1}{2}$ となった。空間電荷制限電流を算出する為に使った式が理想的な条件で考えられていることや、以下に記述するような装置、測定が原因の誤差が多く、単純な比較はできない。しかしオーダーはさほど違っておらず、問題はないと判断できる。

引き出された電流が抑制される原因としては、イオンビームが引き出し電極やスリットに衝突することによってイオンビーム量が抑制されてしまうことが考えられる。これらの原因は今後、ビームラインの平行性やイオンビームの集束性を良好に保つ工夫をすることによって防ぐことが出来る。また、アインツェルレンズの電極の歪みであるが、今後分解して電極を組みなおし、歪みを矯正してビームの軸を真っ直ぐに直すことで改善される。

これらの考えられる原因を全て改善することによって、より実測値を予測値に近づけることが出来るであろう。

3 については、Fitting 誤差を考慮すると $V^{\frac{3}{2}}$ 法則に一致する。従って、イオン源の設計通り、引き出し電極によるビーム化が正常に行われていることが確認できた。

但し今回の測定ではファラデーカップのサプレッサーを使用していないことから、必ずしも正確な測定とは言えず、ファラデーカップに衝突したイオンによる 2 次電子が抑制されていないので多めに電流値が測定されていると思われる。今後、サプレッサーを使用し、より正確な条件でイオンビーム電流値を測定する必要がある。

第 8 章 付録

8.1 測定値、測定条件

第 5 章にて提示したイオンビーム電流量の引き出し電圧依存性グラフの測定値及び測定条件を以下に記載する。

Vext : 引き出し電圧

Ifc-1 : ファラデーカップ 1 で測定したイオンビーム電流量

Atten : アッテネータ

Vlens : アインツェルレンズの電圧

I lens : アインツェルレンズの電流

	Vext[kV]	Ifc-1[μ A]	誤差 \pm	IG[Pa]	PG[Pa]	Atten[dB]	Vlens[kV]	I lens[mA]
8[W]	1.00303	0.5	0.1	2.3E-04	ur-2	7.6	0.5	0.1
	1.909091	2.1	0.1	2.4E-04	ur-2	7.6	0.9	0.02
	3.015152	3.8	0.1	2.2E-04	ur-2	7.6	1.3	0.03
	4.048485	5.9	0.1	2.3E-04	ur-2	7.6	1.8	0.11
	5.00303	8	0.1	2.2E-04	ur-2	7.6	2.2	0.02
	6.045455	12.1	0.2	2.0E-04	ur-2	7.6	2.8	0.02
	7.057576	12.8	0.2	1.9E-04	ur-2	7.6	3.7	0.08
	8.072727	15.6	0.1	1.8E-04	ur-2	7.6	4.2	0.09
	9.030303	19.2	0.1	1.8E-04	ur-2	7.6	4.8	0.08
	10.09091	22.5	0.1	1.8E-04	ur-2	7.6	5.4	0.08
	11.09091	24.4	0.1	1.8E-04	ur-2	7.6	6	0.08
	12.06061	24.8	0.2	1.8E-04	ur-2	7.6	6.6	0.08
	13.09091	24.9	0.3	1.8E-04	ur-2	7.6	7.3	0.06
	14.09091	24.8	0.2	1.8E-04	ur-2	7.6	8.2	0.05
	15.09091	25	0.2	1.9E-04	ur-2	7.6	8.8	0.05
	16.15152	25.5	0.2	1.9E-04	ur-2	7.6	9.5	0.05
	17.15152	25.2	0.1	1.9E-04	ur-2	7.6	10.1	0.03
	18.06061	26	0.1	2.0E-04	ur-2	7.6	10.8	0.03

13[W]	0.984848	0.6	0	2.3E-04	ur-2	5.3	0.5	0.01
	1.915152	2	0.1	2.3E-04	ur-2	5.3	0.9	0.02
	3.015152	3.8	0.1	2.3E-04	ur-2	5.3	1.4	0.04
	4.027273	5.9	0.1	2.3E-04	ur-2	5.3	1.8	0.08
	5.045455	8.6	0.1	2.3E-04	ur-2	5.3	2.2	0.18
	6.033333	12.2	0.1	2.2E-04	ur-2	5.3	2.7	0.02
	7.066667	18.2	0.2	2.0E-04	ur-2	5.3	0.3	0.04
	8.081818	17.8	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	4.1	0.12
	9.060606	21.1	0.1	1.8E-04	ur-2	5.3	4.9	0.16
	10.09091	28.1	0.1	1.8E-04	ur-2	5.3	5.2	0.14
	11.06061	32.2	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	5.8	0.14
	12.06061	34.9	0.3	1.8E-04	ur-2	5.3	6.4	0.13
	13.06061	36.5	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	7.1	0.12
	14.09091	36.9	0.3	1.8E-04	ur-2	5.3	7.7	0.12
	15.09091	36.7	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	8.4	0.11
	16.09091	35.4	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	9.1	0.08
	17.12121	35.9	0.3	1.8E-04	ur-2	5.3	9.8	0.07
	18	35.9	0.2	1.8E-04	ur-2	5.3	10.4	0.08

16[W]	2.00303	2.1	0.1	2.3E-04	ur-2	4.3	1	0.02
	4.033333	6	0.1	2.3E-04	ur-2	4.3	2	0.11
	6.021212	13.1	0.1	2.2E-04	ur-2	4.3	2.7	0.11
	8.042424	20.3	0.3	2.0E-04	ur-2	4.3	3.8	0.11
	10.06061	28.2	0.1	1.9E-04	ur-2	4.3	5.2	0.19
	12.06061	39.7	0.3	1.8E-04	ur-2	4.3	6.4	0.18
	14.06061	42.9	0.5	1.8E-04	ur-2	4.3	7.6	0.14
	16.12121	42.1	0.3	1.8E-04	ur-2	4.3	8.8	0.12
	18.12121	43.3	0.3	1.8E-04	ur-2	4.3	10.4	0.16

20[W]	2	2.2	0.1	2.3E-04	ur-2	2.8	1	0.02
	4.033333	7.6	0.3	2.3E-04	ur-2	2.8	1.9	0.1
	6.039394	14.5	0.2	2.3E-04	ur-2	2.8	2.6	0.28
	8.075758	26.7	0.3	2.1E-04	ur-2	2.8	3.6	0.05
	10.06061	28.8	0.1	1.8E-04	ur-2	2.8	5.2	0.21
	12.06061	45.8	0.2	1.8E-04	ur-2	2.8	6.3	0.21
	14.09091	54	0.1	1.8E-04	ur-2	2.8	7.5	0.18
	16.12121	54	0.1	1.8E-04	ur-2	2.8	8.7	0.14
	18.12121	55	0.1	1.8E-04	ur-2	2.8	10.1	0.13

24[W]	1.915152	2.1	0.1	2.3E-04	ur-2	1.7	1	0.02
	4.042424	9.1	0.1	2.3E-04	ur-2	1.7	1.8	0.08
	6.045455	16.4	0.2	2.5E-04	ur-2	1.7	2.7	0.3
	8.060606	23.6	0.2	2.2E-04	ur-2	1.7	3.6	0.05
	10.06061	32.3	0.2	1.8E-04	ur-2	1.7	4.9	0.21
	12	44.9	0.4	1.8E-04	ur-2	1.7	6.1	0.26
	14.06061	63	0.1	1.8E-04	ur-2	1.7	7.3	0.21
	16.12121	71	0.1	1.8E-04	ur-2	1.7	8.7	0.21
	18.09091	71	0.1	1.8E-04	ur-2	1.7	10	0.18

8.2 輸送系、分析系

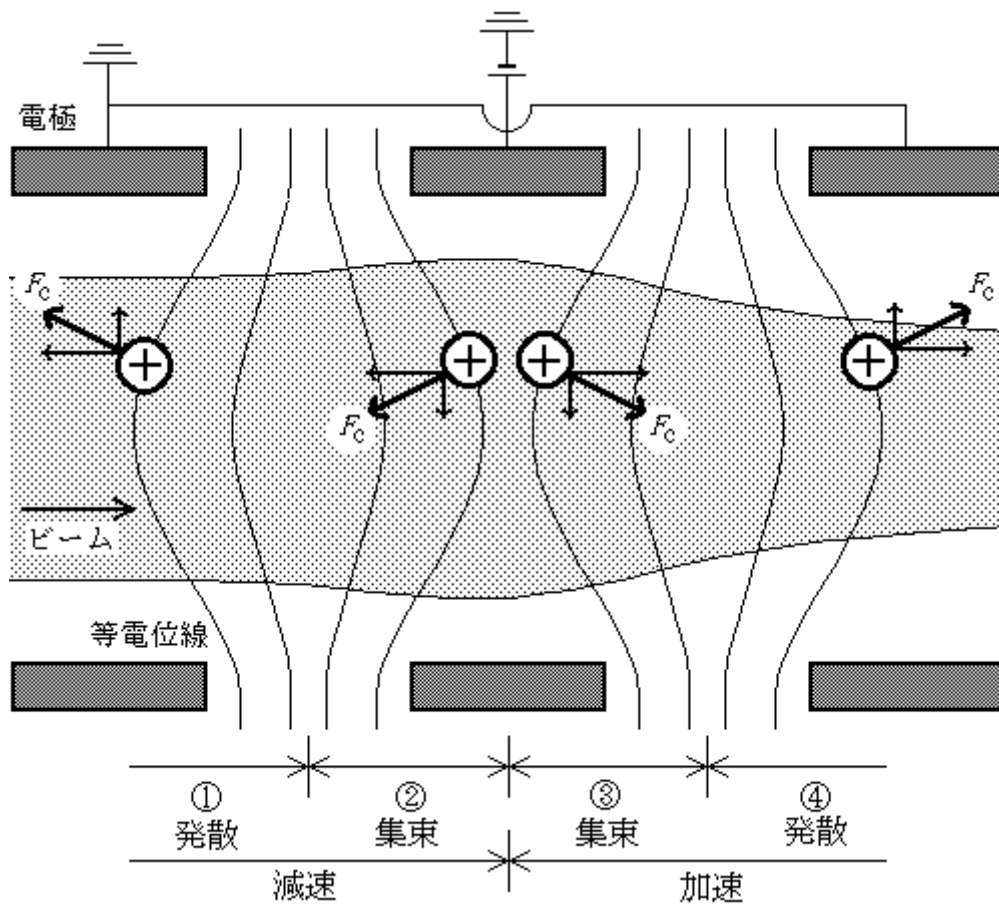
以下に、本文ではイオン源を主題として扱ったために割愛した高電離重粒子線発生装置のイオン源以外に関する原理を付録として記す。

8.2.1 ビーム輸送

イオン源から引き出されたイオンビームを、試料などに照射するには、ビームを効率よく運ぶための輸送系が必要である。

今回装置でイオンビームを集束するために使用したのはアインツェルレンズである。イオンビームはアインツェルレンズが3つの電極によって発生する電場によって集束される。

図 13 のようにビームが左から右に進むものとし、3枚の円筒状の電極を図のように配置する。外側の2電極を接地電位とし、中心電極に電圧を印加する。すると、図のように等電位面ができ、等電位線に対し垂直で中心電極とは反対方向にクーロン力を受ける。・の範囲では半径方向に発散し、・の範囲では半径方向に集束する。しかし、・の範囲では進行方向に減速し、・の範囲では進行方向に加速する。進行方向への速度分布を示すと図のようになる。ゆえに・の集束する部分では進行方向への速度が遅く、・の発散する部分では進行方向への速度が速い。ゆえに、発散の力を受ける時間より集束の力を受ける時間のほうが長いため、結果的に集束となる。



< 図 13 アイントセルレンズの断面図 >

また、進行方向への減速と加速の力を受ける時間は等しいので、進行方向への速度はレンズを通る前後で変わらない。

8.2.2 ビーム選別

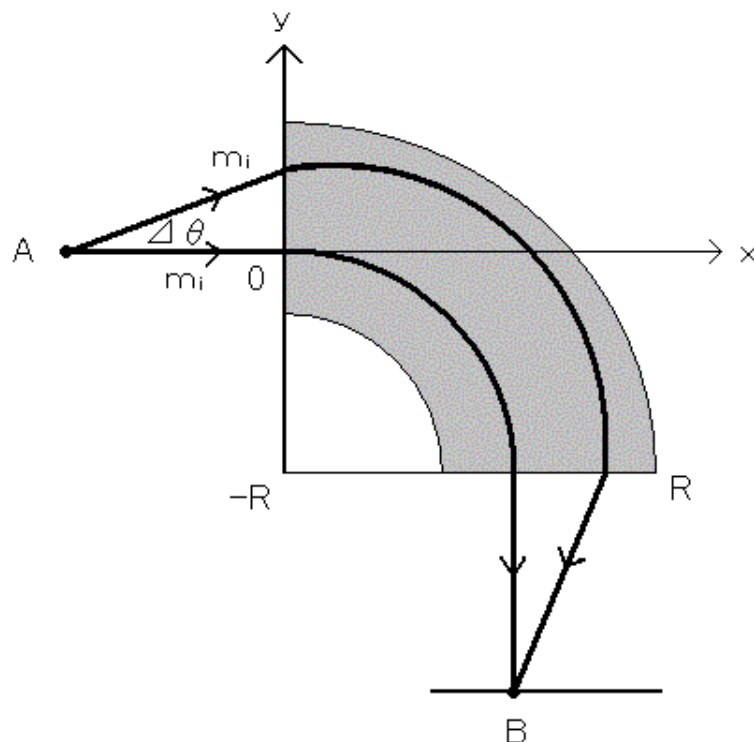
イオン源から引き出されたビームには導入した原子の様々な価数のイオンだけでなくプラズマ生成室に導入したイオン化物質以外の元素のイオンビームが混入している。不純物のイオンビームの原因となるのはプラズマ生成室内に残留している空気やプラズマ生成室壁面の汚れなどによるものである。

特定の価数のイオンビームを取り出すために分析電磁石を使用する。

加速エネルギーが同一の場合、質量によって差を生じるのは運動量または速度であるから、これらの違いによって質量分離を行うことができる。

分析電磁石はビームを選別するために運動しているイオンが磁場によって受けるローレンツ力を利用する。

図 14 のように多価重イオンビームの運動方向に対して垂直に分析電磁石の磁場を印加すると、イオンはクーロン力 F_1 を受ける。それによって多価重イオンビームを曲げる。



< 図 14 分析電磁石 >

n 個のイオンが磁場中を運動しているとき、ローレンツ力 $F_l = en(v_i \times B)$ と遠心力

$$F_c = \frac{m_i v_i^2}{r} \quad (3-1) \text{ がつり合っている。}$$

$$F_l = F_c \quad (3-2)$$

$$\frac{m_i v_i^2}{r} = en(v_i \times B) \quad (3-3)$$

$$\frac{n}{m_i} = \frac{v_i}{eBr} \quad (3-4)$$

となる。 v は加速電圧によって決まるので、 B を測定することによって、イオンは $\frac{n}{m_i}$ で選別することが出来る。

参考文献

- 1) 石川順三著；『イオン源工学』（アイオニクス株式会社、昭和 61 年）p.10
- 2) 高木俊宜著；『電子・イオンビーム工学』（電気学会、1995）p.17、18
- 3) Richard Geller; “Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas”
(Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia)

謝辞

この研究を行うにあたって、ご協力、助言をして頂いた次の方々に感謝します。

私の指導教官である、野尻洋一教授には問題に取り組む姿勢、物理研究の基本や面白さを教えて頂きました。また、同じく百田佐多生講師には、解析や研究活動に対する様々な助言を頂き、的確な指導で理解の助けになって頂きました。

関サイエンスラボの関氏には、装置に対する助言や測定のセッティングなど、大変お世話になりました。

最後に、この研究を共に行ってきた、坂本麻子さん、浜川恒圭君、浜口顕典君に感謝します。