

平成 14 年度
修士論文

ECR イオン源のイオン化効率の評価

Ionization efficiency of ECR ion source

高知工科大学大学院工学研究科
基盤工学専攻知能機械コース
坂本 麻子

目次

1	序論	1
2	ECR イオン源の原理	2
2 - 1	イオン化	2
2 - 1 - 1	電子の発生	3
2 - 1 - 2	ECR による電子の加速	3
2 - 1 - 3	ミラー磁場によるプラズマの閉じ込め	5
2 - 1 - 4	電子衝突によるイオン化の原理	6
2 - 2	ビーム生成	6
2 - 3	分析電磁石によるイオンビームの分析	7
3	実験方法と装置	8
3 - 1	イオン源の構造	8
3 - 2	ビームの分析系の構造	10
3 - 2 - 1	イオン分離の方法・装置	10
3 - 2 - 2	生成率の測定方法・装置	10
4	結果と考察	11
4 - 1	イオン化	11
4 - 2	生成率の RF 依存性	12
5	結論	16
6	付録	17
6 - 1	装置全体像	17
6 - 2	アインツェルレンズによるイオンビーム集束原理	17
6 - 3	結果	19
7	参考文献	23

1 序論

近年、多価イオンはその構造・性質、物質との相互作用、多価イオンを照射された物質の研究、ナノテクノロジーの基礎研究のために用いられている。

イオンビームとは、中性粒子が電子を失い正の電荷を帯びたかあるいは過剰に電子を得て負の電荷を帯び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広い分野に応用されている。

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)の制御

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

今回構築した高電離重粒子線発生装置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し引き出し、それを電場によってビームとして取り出すイオン源、生成された多価重イオンビームを電場を利用したレンズによって収束させる輸送系、磁場によってイオンビームを偏向角度で分離し、そのイオンビーム電流を測る分析系からなる。

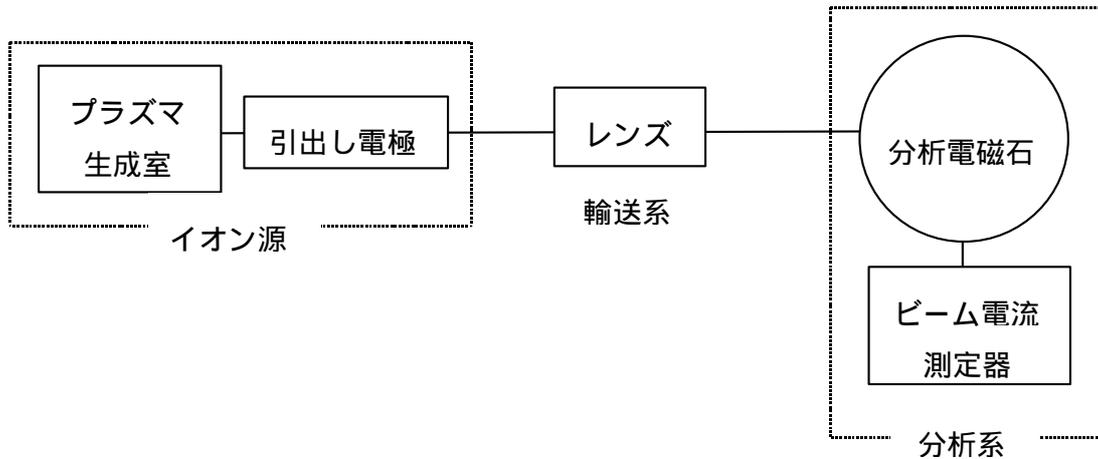


図1 高電離重粒子線発生装置

製作した高電離重粒子線発生装置の性能をイオン化効率について評価するために、イオン化にとって重要なパラメータであるRF強度に対するビームの電流を測定する。ビーム電流はイオン化効率を反映する物理量である。

2 ECR イオン源の原理

2-1 イオン化

イオンとは中性の原子または原子団が1個または数個の電子を失い正の電荷を帯びるか、あるいは過剰に電子を得て負の電荷を帯びた状態である。本論文では正の電荷を持った正イオンを取り扱う。また、多価イオンとは価数が2以上(失った電子が2個以上)のイオンで、重イオンとは原子番号 $Z \geq 3$ 以上のイオンである。

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[ref.1]される。

- | | | | |
|---|---------------------|---|-----------------------------------------------------------|
| A | 高速粒子との衝突によるイオン化過程 | { | A-1 電子との衝突
A-2 イオン・中性粒子との衝突
A- 3 電荷変換
B- A-4 光電離 |
| B | 金属表面との相互作用によるイオン化過程 | { | B-1 表面電離
B-2 電解電離
B- 3 2次イオン放出 |

Aは衝突により中性粒子の軌道電子を剥ぎ取ることによってイオンを生成する過程である。Bは金属表面のごく近傍に存在する原子と電子のやり取りでイオンを生成する過程である。

今回構築した高電離重粒子線発生装置では、A-1 をイオン化過程として利用している。入射電子の加速には電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance ; ECR) を採用した。入射電子の加速の原理には ECR を採用した理由は、入射電子のエネルギーを高くすることが可能なので多価重イオンを生成することが出来るからである。

気体中の基底状態にある原子または分子から 1 個の電子を無限遠に引き離して、正イオンと自由電子とに解離させることをイオン化と呼び、イオン化に要するエネルギーをイオン化エネルギーという。イオン化エネルギーは表 1 のように内殻になるほど大きい。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 は次のような過程によってイオン化を行う。

- 1 . 電子発生
- 2 . 電子の加速
- 3 . プラズマの閉じ込め
- 4 . 電子衝突によるイオン化

2 - 1 - 1 電子の発生

地球表面では宇宙から宇宙線と呼ばれる放射線が 10^{-1} [個/cm²・s・sr][ref.3]降り注いでいる。この宇宙線がプラズマ生成室の金属を通過し電離させて電子を放出する。この電子をイオン化にあずかる最初の入射電子として利用する。

2 - 1 - 2 ECR による電子の加速

磁束密度 B の磁場内で速度 v を持つ電子には、ローレンツ力が働く。これにより、電子は B に垂直な面内の円運動と B 方向の等速度運動とを組み合わせた図 2 のようならせん運動を行う。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 f_c はローレンツ力 F_l と向心力 F_c が釣り合うことから以下のように計算できる。

$$F_l = ev_{\perp} B \quad (\text{eq.1})$$

殻	価数	[eV]
L	1	15.760
	2	27.629
	3	40.74
	4	59.81
	5	75.02
	6	91.007
	7	124.319
	8	143.456
M	9	422.44
	10	478.68
	11	538.95
	12	618.24
	13	686.09
	14	755.73

$$1[\text{eV}] = 1.602 \times 10^{-19} [\text{J}]$$

表 1 ${}_{18}\text{Ar}$ のイオン化エネルギー [ref.2)

$$F_c = \frac{m_e v_{\perp}^2}{r} \quad (\text{eq.2})$$

m_e : 電子の質量

v_{\perp} : 磁場の向きに対し垂直方向の電子の速さ

r : サイクロトロン運動の回転半径

$$\text{周期: } T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{1}{f_c} \quad (\text{eq.3})$$

eq.1、eq.2、eq.3 よりサイクロトロン振動数は

$$f_c = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \frac{v_{\perp}}{r} = \frac{eB}{2\pi m_e} \quad (\text{eq.4})$$

となる。サイクロトロン運動をしている電子に周波数 f_c に等しい電磁波を印加すると、その電場によって電子はクーロン力を共鳴的に受け加速される。この現象を ECR という。

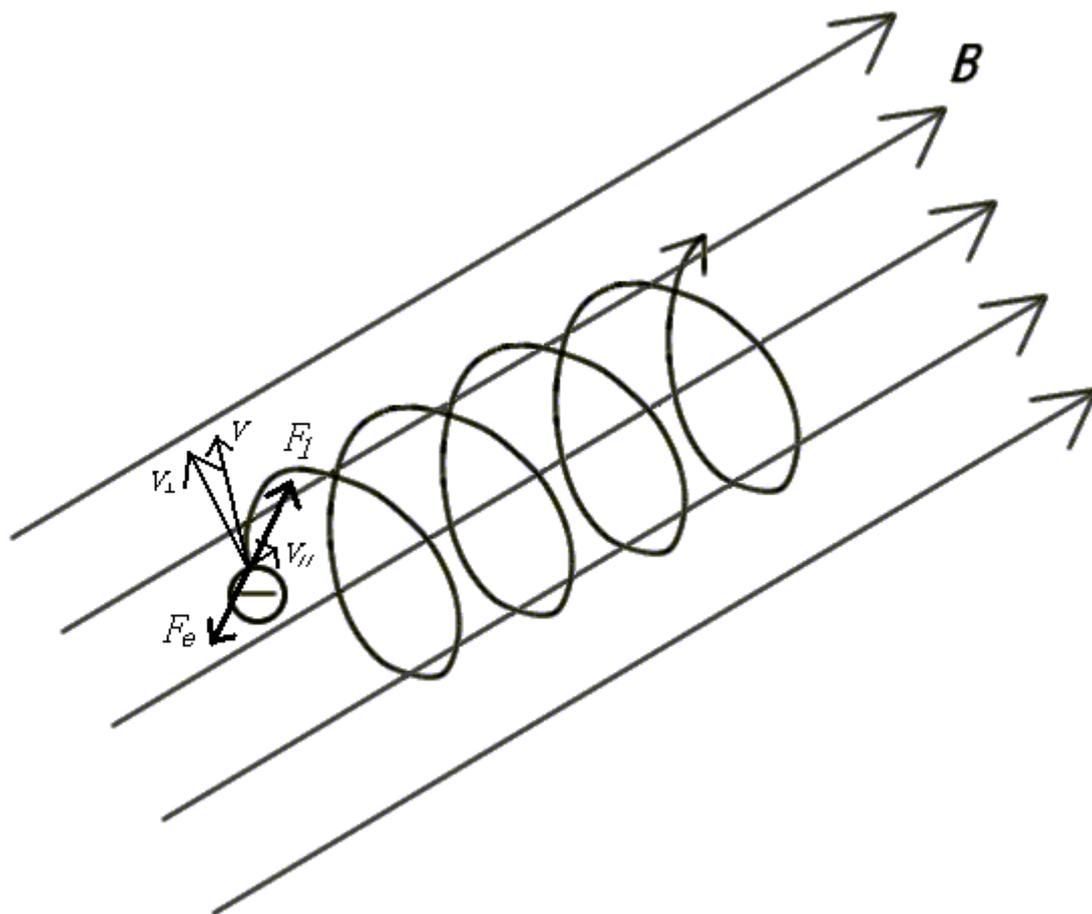


図2 サイクロトロン運動

ECR によって入射電子の速度 v が増大し、運動エネルギー $K_e = \frac{1}{2}mv^2$ が増大する。

プラズマ生成室内には図3に示すような両端で磁場を強くした紡錘形の磁場配位のミラー磁場が分布している。磁力線が漏斗状に収束する領域をミラーといい、磁場はここで強くなる。

プラズマ生成室には RF を一定の周波数 f_{RF} で導入している。また、eq.4 よりサイクロトロン周波数は磁場による。したがって、ECR は共鳴条件 $f_{RF} = f_c$ が満たされる場所

のみで起こる。ミラー磁場は z 軸方向には不均一だが、 r 方向に対し磁場は一様なので、図3のように磁場の向きに対し垂直な Resonance 面のみで ECR が起こる。

不均一磁場を採用した理由は、ミラー磁場によってプラズマを閉じ込めるためである。

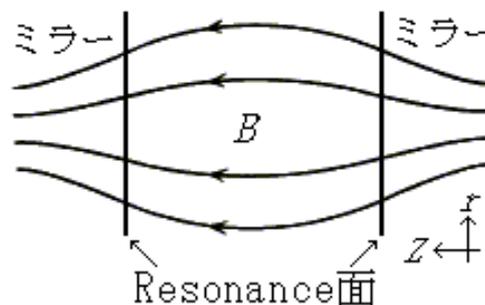


図3 ミラー磁場

2 - 1 - 3 ミラー磁場によるプラズマの閉じ込め

イオンが生成室の壁面と衝突すると、壁面から受け取った電子と再結合し、イオンが消滅する。また、負の電荷をもった電子が正の電荷を持った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。したがって、プラズマを回転軸方向、回転半径方向に閉じ込める必要がある。

電子を閉じ込めることによって、プラズマ拡散の持つ次のような性質を利用し、プラズマを閉じ込めることが出来る。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。

電子はミラー効果によって中に閉じ込める。電子は磁力線に巻きつきながららせん状に運動している。電子の速度方向と磁力線とのなす角をピッチ角という。荷電粒子の磁気モーメント $\mu \equiv \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$ と全運動エネルギー $\varepsilon \equiv \frac{mv_{\parallel}^2 + mv_{\perp}^2}{2}$ は保存されるとすると、電子がミラーに近づくと、磁場が強くなるので、垂直方向の運動エネルギーが大きくなり、平行方向の運動エネルギーは小さくなるため、らせん運動ピッチ角が増し、 90° に達するとミラーから遠ざかる。このように電子がミラーで斥力をうける現象をミラー効果という。

壁面への衝突が発生しないようにサイクロトロン運動の回転半径を小さくする。サイク

ロトロン運動の回転半径 r_c は eq.1 と eq.2 より $r_c = \frac{m_e r_{\perp}}{eB}$ となる。従って、磁場を強くすることによって、回転半径 r_c を小さくすることが出来る。だから、 r_c を小さくして半径方向に電子を閉じ込めるには磁場を強くする必要がある。

2 - 1 - 4 電子衝突によるイオン化の原理

図5のように、ECR イオン源では真空中で原子と ECR によって加速されたイオン化エネルギー以上のエネルギーをもった電子の非弾性衝突が起こる。この衝突の結果、入射電子のエネルギーを原子中の軌道電子に与え、原子内の軌道電子 1 個を剥ぎ取りイオン化が起こる。これを何度も繰り返し正の電荷をもつ多価イオンを生成する。

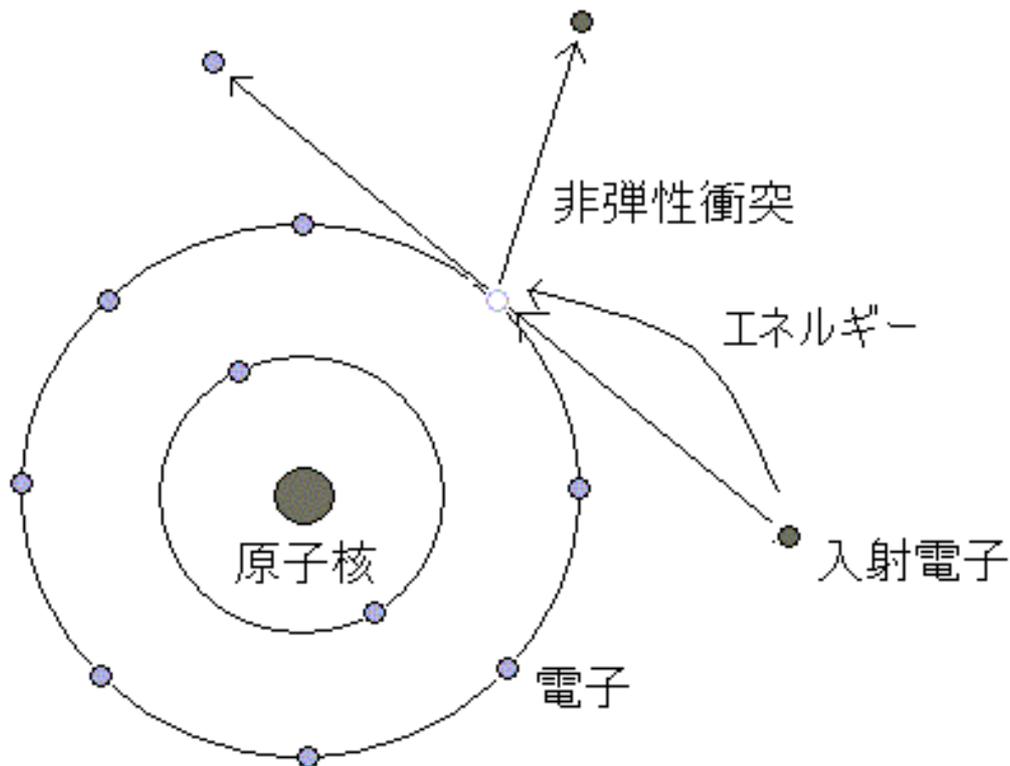


図4 電子と原子の弾性衝突

2 - 2 ビーム生成

ビームを生成するためにイオンを電場で引き出す。

プラズマ生成室にはガスの状態で中性粒子、電子、正イオンが混沌とした状態で閉じ込められており、全体では電気的には中性である。イオンビームを生成する為には、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。

ビーム引き出しのために、プラズマ生成室には電圧を印加して引き出し電極がプラズマ生成室より低い電位に保ち、引き出し電極の向きの電場を生成する。電極に穴が空いているため電場はプラズマ生成室内にしみこみ、生成室内の正の電荷を持つイオンを引き出して、イオンは電場方向へ加速される。プラズマ生成室から引き出されるイオンの加速は電場の向きに揃っているため、方向の揃ったビームを生成する。

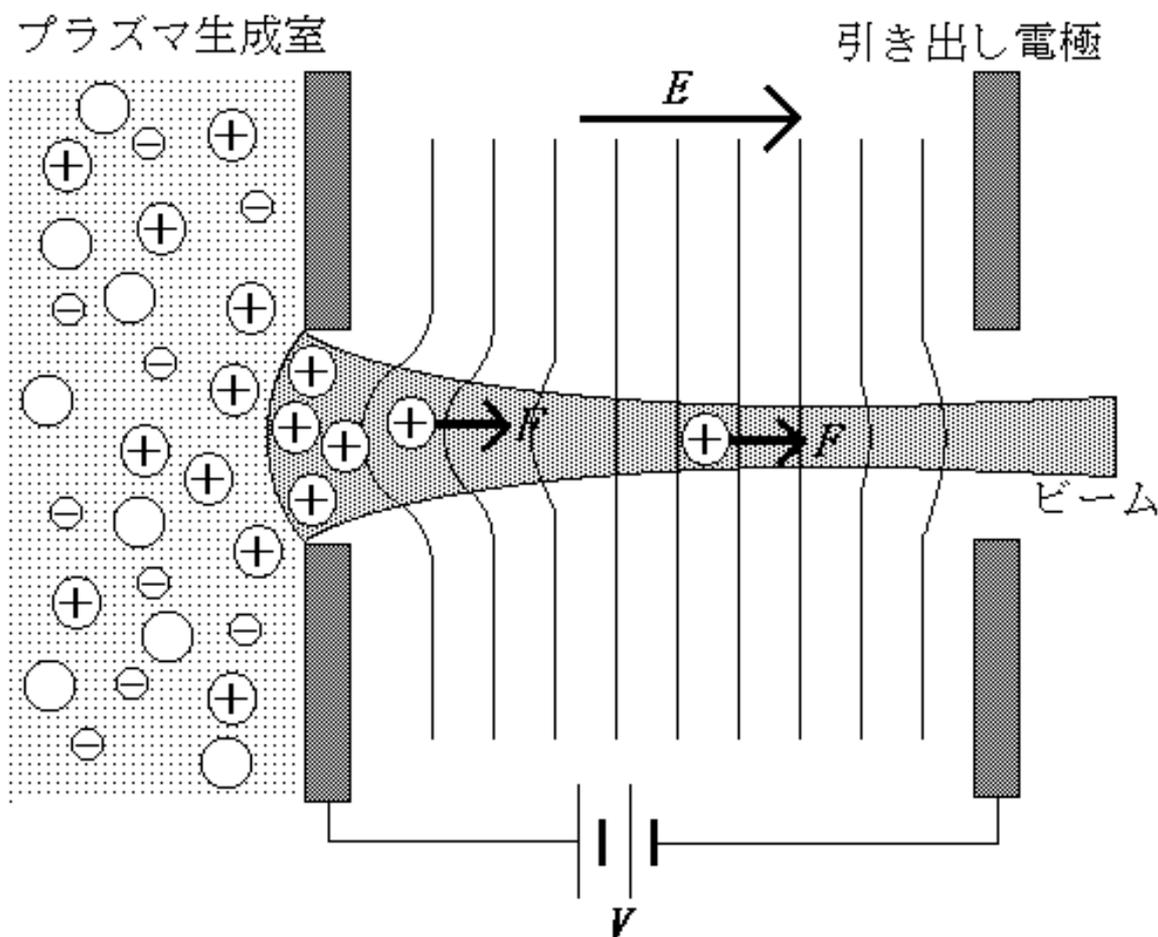


図5 電場によるビーム生成

2 - 3 分析電磁石によるイオンビームの分析

引き出したビーム中にはプラズマ生成室に導入したすべての元素、生成されたすべての価数のイオンが含まれているので、分離する必要がある。磁場中での正イオンの回転半径 r によってビームを分析する。

図7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一様磁場を印加すると、イオンはクーロン力 F_l を受ける。 n 価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 と遠心力 F_c は

$$F_l = en(v_i \times B) \quad (\text{eq.5})$$

$$F_c = \frac{m_i v_i^2}{r} \quad (\text{eq.6})$$

と書ける。 $F_l = F_c$ だから、

$$\frac{m_i}{n} = \frac{eBr}{v_i} \quad (\text{eq.7})$$

となる。 v は加速電圧によって決まるので、 $\frac{m_i}{n}$ によって偏向角度が異なる。したがってイオンは $\frac{m_i}{n}$ で空間的に分離することが出来る。

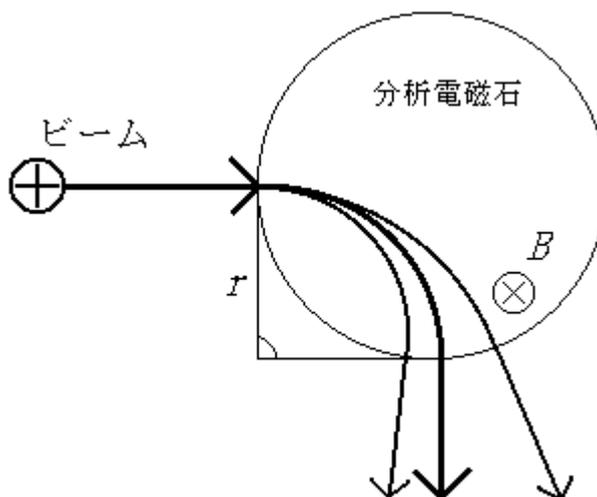


図6 分析電磁石

3 実験方法と装置

3 - 1 ECR イオン源の構造

今回の実験で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 イオン源と呼ばれる多価重イオン源は、大きく次の3つの部分から構成されている。

1. ガス導入系
2. プラズマ生成系
3. ビーム引き出し系

図8に ECR イオン源の断面図を示す。

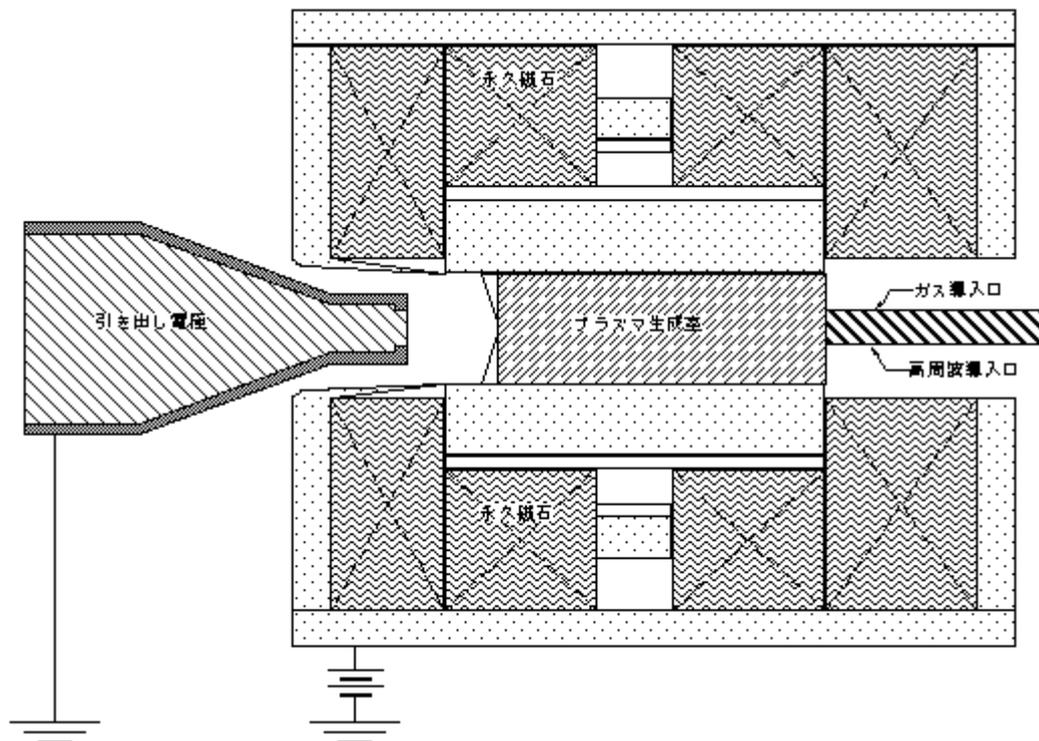


図7 ECR イオン源の断面図

1. ガス導入系

ガス導入口：ここからプラズマ生成室内にガス状のイオン化物質を導入する。ガス流量は付録6 - 1の図11に示すバルブで調節し、PG(ピラニーゲージ)とIG(イオンゲージ)で測定する。

2. プラズマ生成系

プラズマ生成室：ガス状のイオン化物質をここに導入する。永久磁石が作る磁場と印加された高周波によって ECR を起こし入射電子を加速し多価重イオンを生成する。生成室の引き出し口の径は 2[mm]、引き出し距離 21[mm]である。

永久磁石：ミラー磁場を生成する。その磁場によって ECR を起こし、かつ電子の加速を閉じ込めプラズマを閉じ込めるといふ、2つの役割を持つ。

高周波導入口：ECRに必要な高周波電場をここから導入する。使用した高周波電源は Xicom Technology 製 XTRD-100H である。

3. ビーム引き出し系

引き出し電極：この電極の電位をプラズマ生成室より低くすることによって、多価重イオンを加速してビームを形成する。電源は GLASSMAN 製 PS / EH30P03.0-10 である。

3 - 2 ビームの分析系の構造

引き出したビームは分析磁石によって電荷と質量数の比によって分離し、イオン電流を測定して、生成率を導く。

3 - 2 - 1 イオン分離装置

分析電磁石を使用する。電磁石 2 個を、図 9 のようにビームに対し配置し磁場を生成する。曲げ角度は 90° 、曲率半径 r は $0.25[\text{m}]$ 、電源は日本スタビライザー社製である。

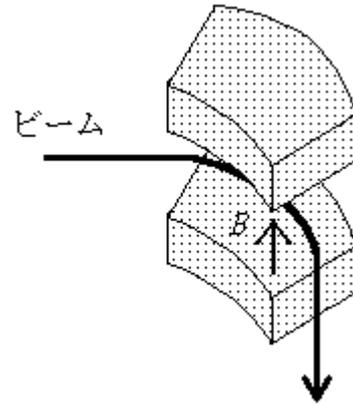


図 8 分析電磁石

3 - 2 - 2 生成率の測定装置

生成率 I とは単位時間当たりの粒子数と定義する。ビーム電流を電荷（素電荷 \times 価数）で割ったものである。ファラデーカップによってビーム電流を測定する。

多価重イオンが電極に入射することによって放出される 2 次電子を計測系で捕らえるようにする。2 次電子が計測系以外に捕らえられると、計測系からその他へ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。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をカップ構造（図 10：電極）にする。また、イオン集極の上流にイオン集極に対し負の電位の電極（2 次電子抑制電極、図 10：電極）を設置し、生成された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。

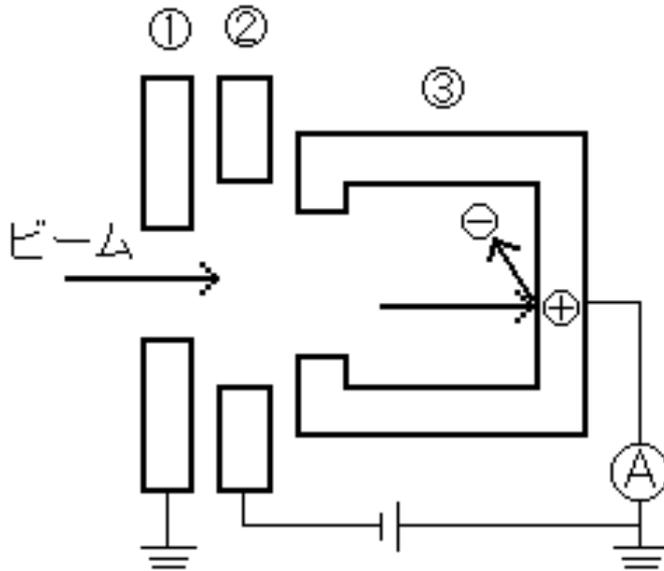


図 9 ファラデーカップの原理図

第 1 電極（図 10：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。ビームが 2 次電子抑制電極にあたると生成され、2 次電子による

ビーム電流が見かけ上少なくなるのを避けるためである。

ただし、実際の測定には 2 次電子抑制電極には電圧をかけていない。イオン集極と 2 次

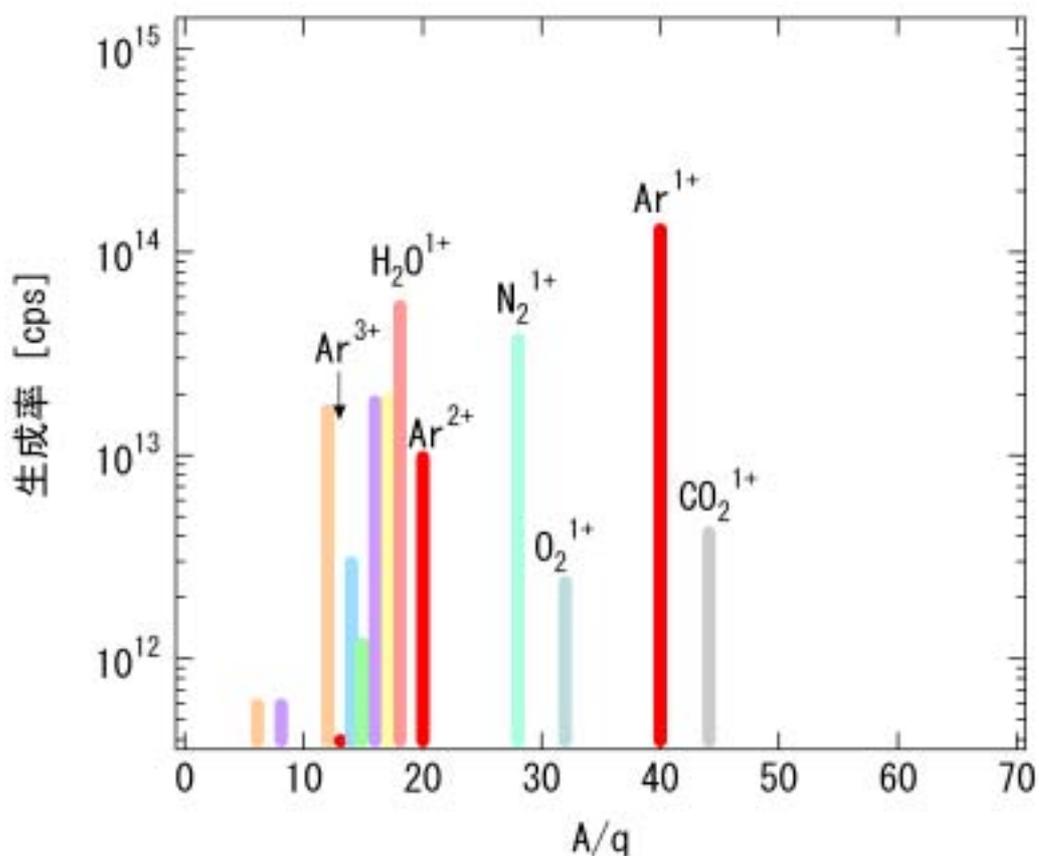
電子抑制電極に入射した2次電子はイオンビーム電流の1部として測定しているが、その他の2次電子は放出している。

4 結果と考察

4 - 1 イオン化

生成したイオンビームを分析するとグラフ1のような結果となった。実験条件は表に示す。

$A/q=40$ のイオンは $A=40$ 、 $q=1$ の Ar^{1+} であると同定できる。 Ar^{2+} と Ar^{3+} は $A/q=$



グラフ1 RF強度 24[W]のときの質量スペクトル

$20, \frac{40}{3}$ に生成されていることが分かる。Ar 以外にも、単原子イオンは C^{+1} 、 C^{2+} 、 N^{+1} 、 O^{+1} 、原子団イオンは N_2^{+1} 、 O_2^{+1} 、 CO_2^{+1} 、 H_2O^{+1} 、 NH^{+1} 、 NO^{+1} 、 OH^{+1} が生成されている。これは、Ar 以外にも、空気 (N_2 、 O_2 、 $CO_2 \cdots$)、水 (H_2O)、リークチェックのため使用したエタノール (C_2H_5OH) を起源をしていると考えられる。また、Ar を特に導入

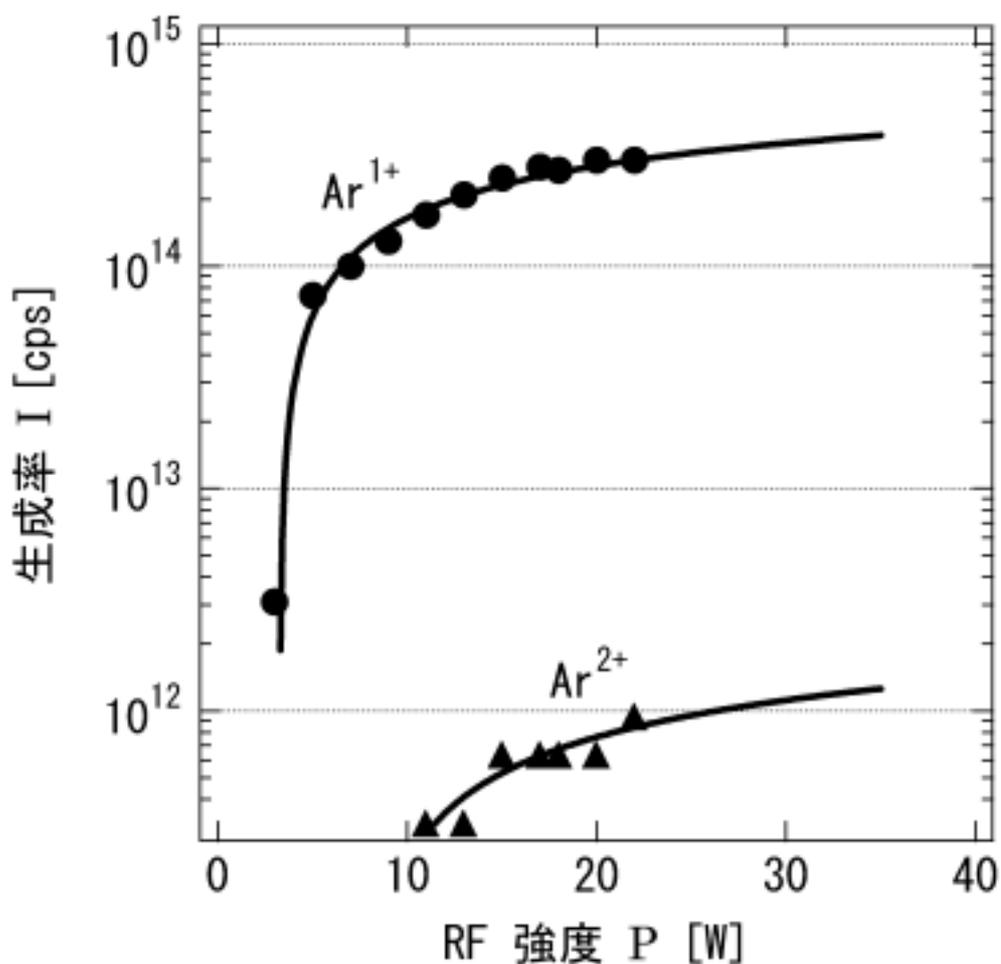
グラフ		1	2	3
ガス圧	PG [Pa]	3.8×10	6.2×10	3.8×10
	IG [Pa]	<10	<10	<10
引き出し電圧 [kV]		15	15	15
アインツェルレンズ印加電圧 [Kv]		8.3	7.9	8.3
RF強度 [W]		24		

したため Ar が多く生成されている。これらのことより、プラズマ生成室に導入した元素が全てイオン化されているといえる。

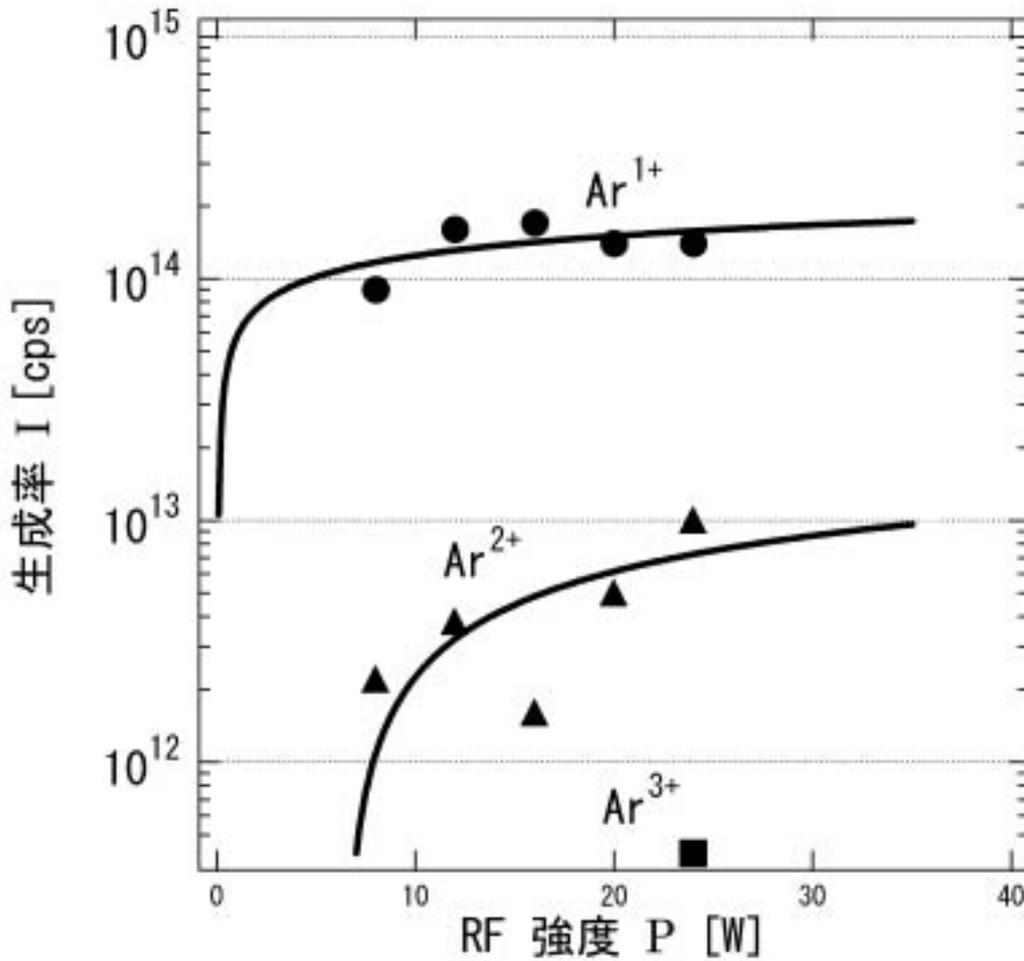
表2 実験条件

4 - 2 生成率の RF 依存性

ガス圧を変化させて測定したイオンビームの Ar の生成率の RF 強度依存性をグラフ 2 と 3 に示す。これらの実験条件は表 2 にまとめる。



グラフ 2 RF 強度依存性 (6.2×10^{-4} [Pa])



グラフ 3 RF 強度依存性 (ガス圧 PG : 3.8×10^{-4} [Pa])

Ar^{1+} 、 Ar^{2+} の生成率は RF 強度の増加にともない増加している。ガスが薄いグラフ 3 では、RF 強度が 24[W]のときに Ar^{3+} が初めて生成されている。

$I = k_1 P^{k_2} + k_3$ という関数でフィッティングを行った。その結果を表 3 に示す。グラフ 2 の

Ar^{1+} の結果よりその他の k_2 は 0.16 で固定してフィッティングを行った。

	グラフ 2		グラフ 3	
	Ar^{1+}	Ar^{2+}	Ar^{1+}	Ar^{2+}
k_1	$6.39 \times 10^{14} \pm 7.9 \times 10^{13}$	$3.27 \times 10^{12} \pm 6.79 \times 10^{11}$	$1.52 \times 10^{14} \pm 1.44 \times 10^{14}$	$2.30 \times 10^{13} \pm 1.25 \times 10^{13}$
k_2	$0.16 \pm 1.23 \times 10^{29}$	0.16 (固定)	0.16 (固定)	0.16 (固定)
k_3	$-8.37 \times 10^{14} \pm 5.11 \times 10^{13}$	$-4.52 \times 10^{12} \pm 1.06 \times 10^{12}$	$-9.39 \times 10^{13} \pm 2.22 \times 10^{14}$	$-3.10 \times 10^{13} \pm 1.93 \times 10^{13}$

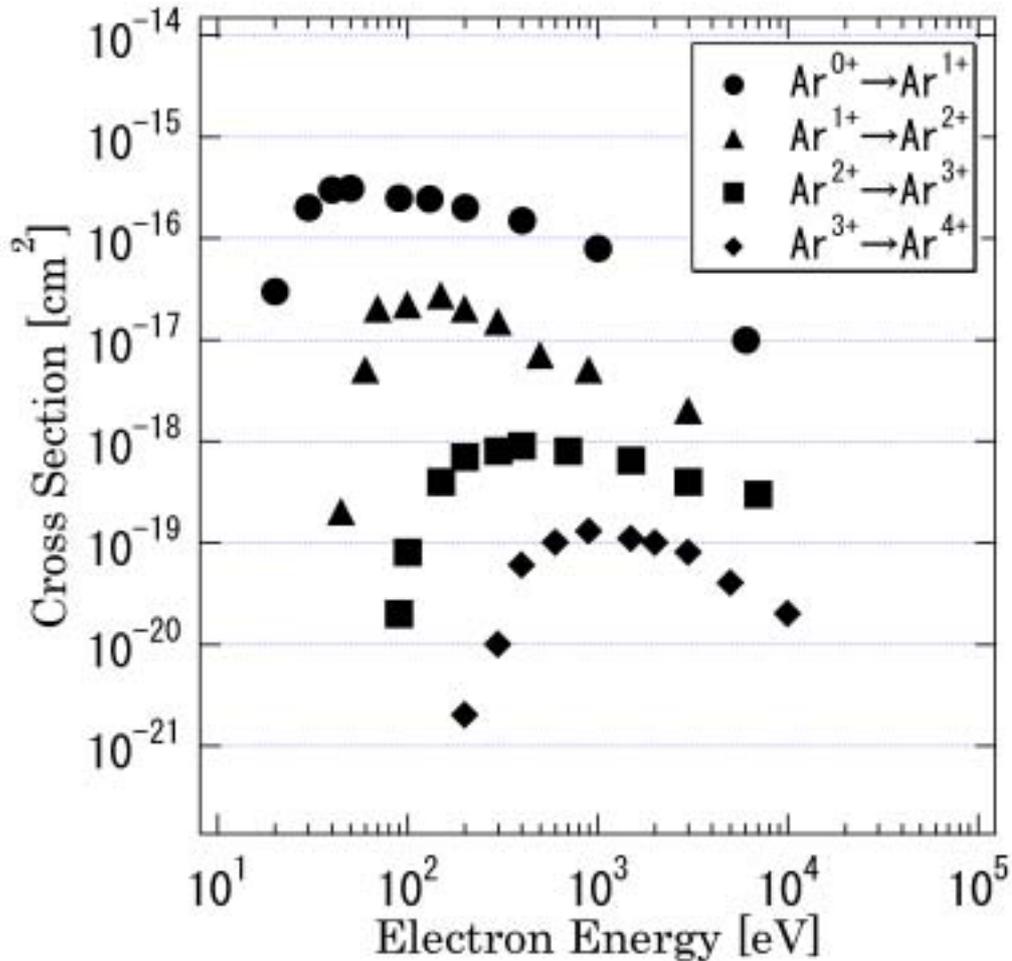
表 3 フィッティング結果

生成率と RF 強度の関係について考える。このためにイオン化現象を次の 2 段階の現象としてとらえる。

1. RF による電子の加速
2. 加速された電子によるイオン化

1. RF による電子の加速

グラフ 4[ref.4]に Ar の電離断面積(イオン化の確率)の測定値を示す。このグラフからそれぞれのイオン化の立ち上がる電子のエネルギーを調べるために、それぞれのイオン化が立ち上がる時の 3 点を $y = k_1x + k_2$ でフィッティングを行った。その結果が表 4 である。フィッティング結果からえられる電離断面積が 0 のときの電子のエネルギーが表 1 で示した Ar のイオン化エネルギーとほぼ一致している(表 5)。



グラフ 4 電離の電子のエネルギー依存性

このグラフは参考文献のグラフから値を目で読み取ってグラフ化したものである。

グラフ 5 はグラフ 4 が示すイオン化の立ち上がる電子のエネルギーと実験結果から

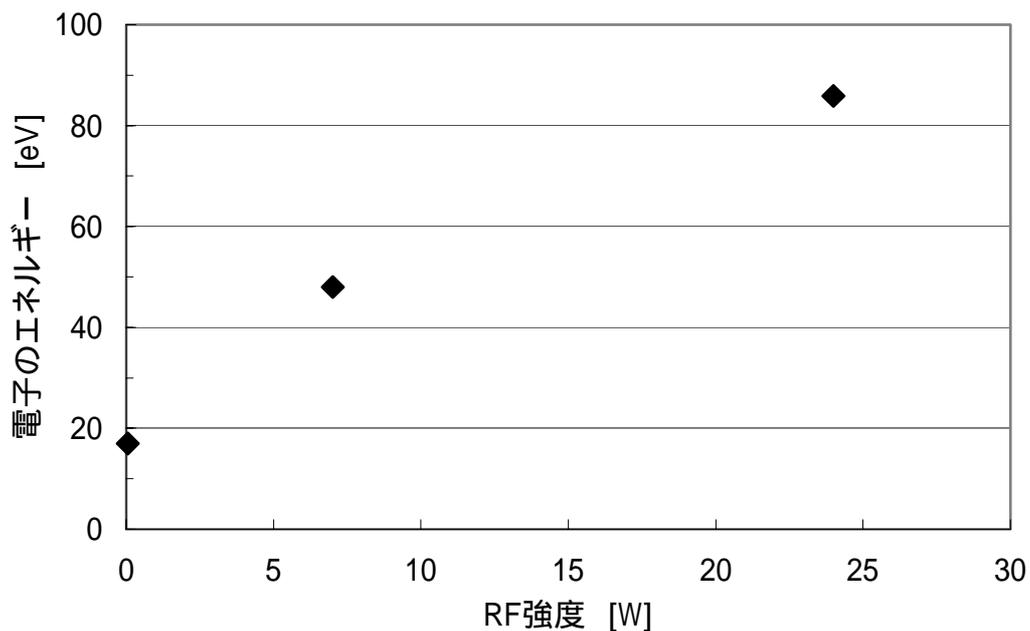
得られたイオン化の立ち上がる RF 強度の関係を示したもので、電子のエネルギーと RF 強度の関係を示す。

	Ar^{1+}	Ar^{2+}	Ar^{3+}
k_1	$1.35 \times 10^{-17} \pm 2.02 \times 10^{-18}$	$7.54 \times 10^{-19} \pm 3.23 \times 10^{-19}$	$6.35 \times 10^{-21} \pm 5.59 \times 10^{-23}$
k_2	$-2.28 \times 10^{-16} \pm 6.28 \times 10^{-17}$	$-3.56 \times 10^{-17} \pm 1.91 \times 10^{-17}$	$-5.54 \times 10^{-19} \pm 6.5 \times 10^{-21}$

表4 フィッティング結果

	フィッティング 結果 [eV]	イオン化 エネルギー [eV]
Ar^{1+}	17.0	15.760
Ar^{2+}	47.2	43.389
Ar^{3+}	87.2	84.12

表5 エネルギーの比較



グラフ5 電子エネルギーの RF 依存性

2. 加速された電子によるイオン化

電子のエネルギーとイオン化の確率はグラフ4に示したとおりである。

5 結論

本実験では ECR イオン源にイオン化物質として Ar・空気・水・エタノールを導入して、多価重イオンビームを生成し、生成率を測定した。一様磁場による質量分析の結果、導入した全てのイオンが生成された。また、Ar の生成率の RF 強度依存性の測定結果から関数を導き出した。

それらから次のような結果を得た。

- 1 . プラズマ生成室のガス状で導入した元素全てがイオン化できる。イオン化が正常に行われていることがわかった。
 - 2 . Ar の生成率 I が RF 強度 P に依存しており、また、 $I = kP^{0.16} + C$ という関係を見つけた。
- 2 . に関しては今後、さらに多価のデータやガス圧を変化させて測定してその一般性を調べる必要がある。
- 1・2 よりイオン化が制御できこのイオン源は正常であることが分かるとともに、今後、多価で生成率を上げることに活かすことが出来る。

6 付録

6 - 1 装置全体像

図が構築した高電離重粒子線発生装置の全体図である。

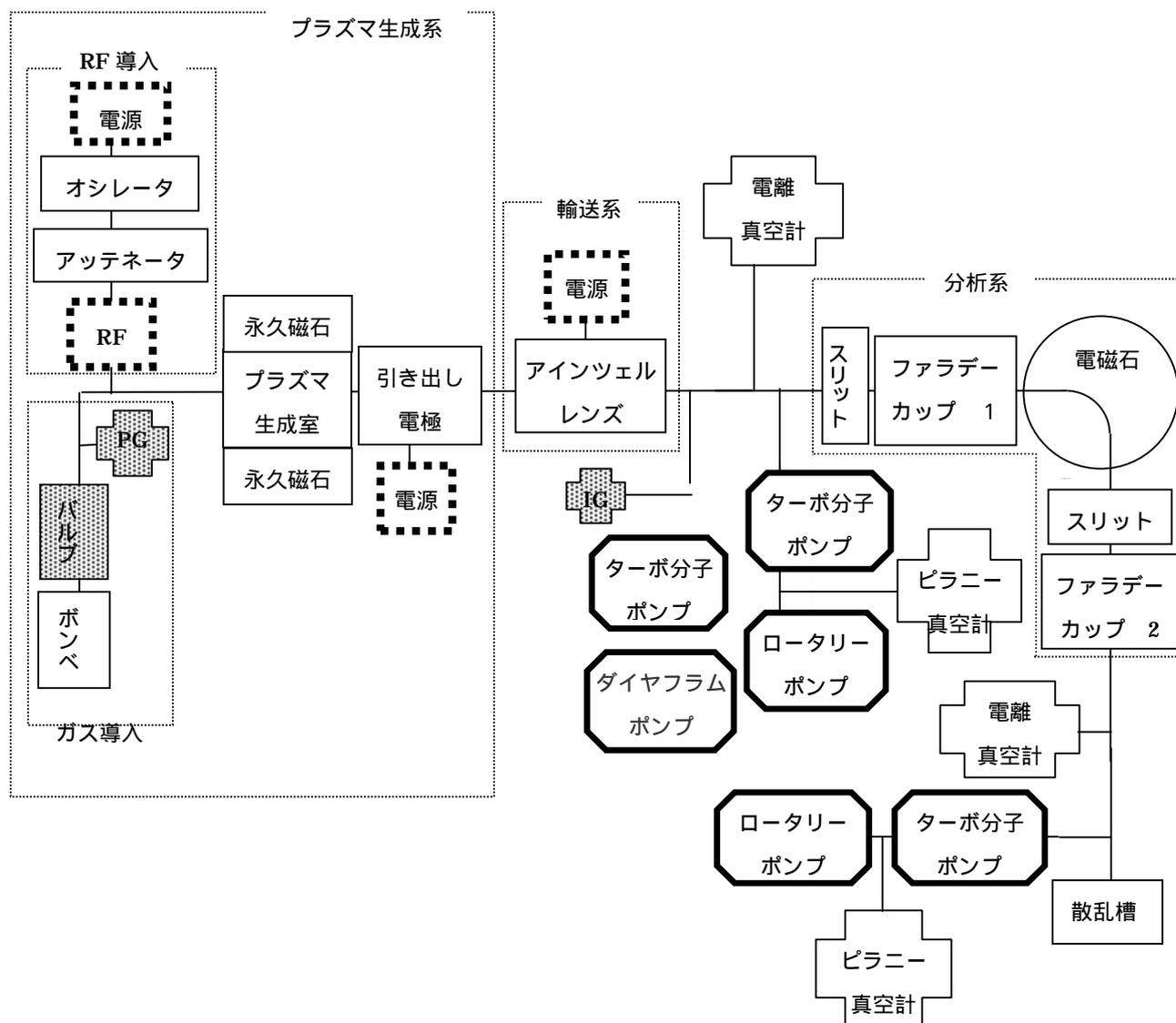


図 1 0 高電離重粒子線発生装置

6 - 2 アインツェルレンズによるイオンビーム集束原理

3つの電極によって発生する電場から受けるクーロン力を利用する。

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、 \cdot の範囲では半径方向に集束する。しかし、 \cdot の範囲では進行方向に減速し、 \cdot 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 12 のようになる。ゆえに \cdot の集束する部分では進行方向への速度が遅く、 \cdot 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。

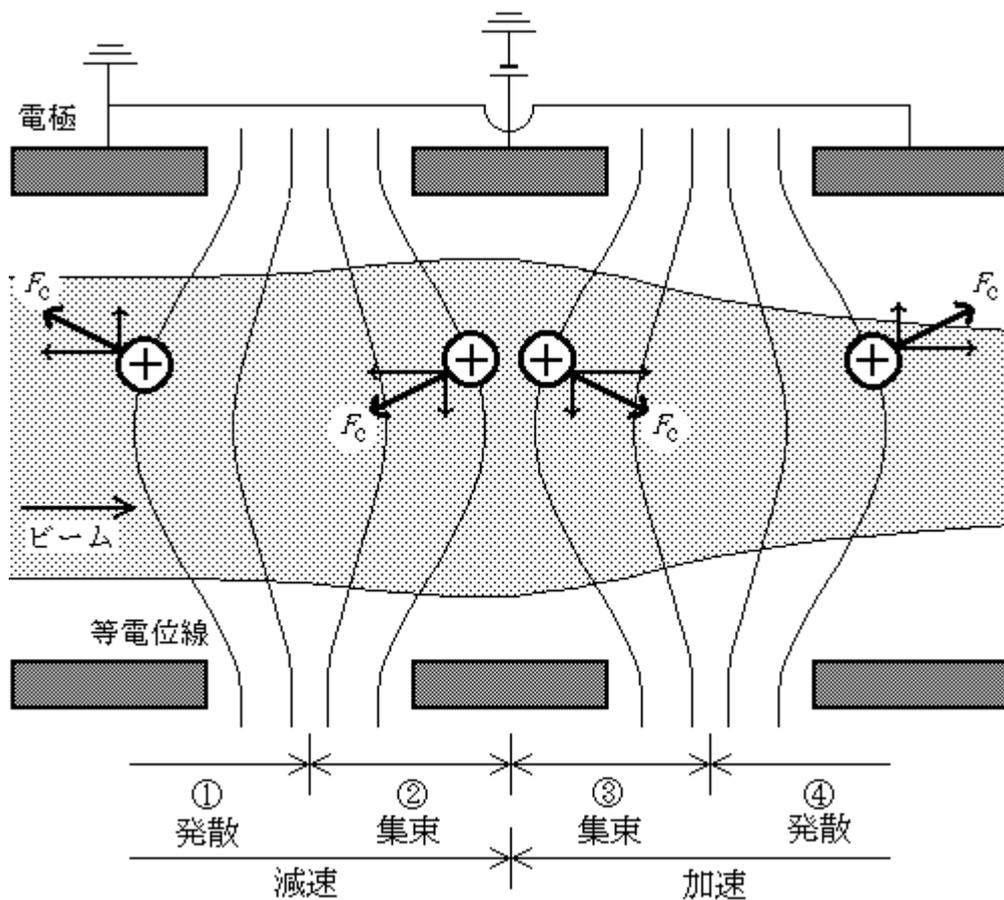


図 1 1 アイソツェルレンズの断面図

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。

6 - 3 結果

グラフ 2 のときの測定結果

元素	価数	ビーム電流 [μ A]	生成率	RF 強度 [W]	ガス圧		アインツェル		分析電磁 石 電流 [A]
					IJ [Pa]	PG [Pa]	電圧 [kV]	電流 [mA]	
Ar	1	32.8	2.1E+14	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	16.83
		23.3	1.5E+14	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	16.85
		27.2	1.7E+14	14	6.7E-03	1.4E-01			16.85
		29.7	1.9E+14	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	16.81
		30.9	1.9E+14	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	16.78
		27.8	1.7E+14	20	6.2E-04	1.1E-01			16.79
		26.5	1.7E+14	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	16.81
	27.5	1.7E+14	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	16.81	
	2	0.2	6.3E+11	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	11.91
		0.2	6.3E+11	14	6.7E-03	1.4E-01			11.93
		0.2	6.3E+11	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	11.89
		0.2	6.3E+11	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	11.91
		0.2	6.3E+11	20	6.2E-04	1.1E-01			11.90
		0.3	9.4E+11	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	11.90
0.3		9.4E+11	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	11.90	
C	1	0.2	1.3E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	9.26
		0.1	6.3E+11	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	9.29
CO2	1	0.2	1.3E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	17.69
		0.2	1.3E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	17.65
		0.1	6.3E+11	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	17.74
H2O	1	1.8	1.1E+13	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	11.30
		1.8	1.1E+13	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	11.32
		1.4	8.8E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			11.32
		1.2	7.5E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	11.32
		1.3	8.1E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	11.24
		1.2	7.5E+12	20	6.2E-04	1.1E-01			11.27
		1.1	6.9E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	11.31
		1.1	6.9E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	11.29
N	1	0.2	1.3E+12	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	10.01

		0.2	1.3E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	9.96
		0.2	1.3E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			9.97
		0.2	1.3E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			10.01
		0.2	1.3E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	10.00
		0.2	1.3E+12	20	6.2E-04	1.1E-01			9.95
		0.2	1.3E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	10.00
		0.2	1.3E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	10.02
N2	1	1.3	8.1E+12	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	14.09
		1.4	8.8E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	14.09
		1.1	6.9E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			14.05
		1.1	6.9E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	14.05
		1.2	7.5E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	14.08
		0.3	1.9E+12	20	6.2E-04	1.1E-01			14.00
		1.1	6.9E+12	20	6.2E-04	1.1E-01			14.09
		1.1	6.9E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	14.07
		0.9	5.6E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	14.04
NO	1	0.4	2.5E+12	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	14.59
		0.4	2.5E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	14.61
		0.3	1.9E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			14.61
		0.4	2.5E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	14.51
		0.4	2.5E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	14.51
		0.4	2.5E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	14.56
		0.4	2.5E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	14.54
O	1	0.4	2.5E+12	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	10.67
		0.3	1.9E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	10.68
		0.2	1.3E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			10.69
		0.2	1.3E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	10.69
		0.2	1.3E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	10.69
		0.2	1.3E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	10.67
		0.2	1.3E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	10.64
OH	1	0.7	4.4E+12	10	6.9E-04	1.2E-01	8.8	0.14	11.00
		0.5	3.1E+12	12	6.7E-04	1.2E-01	8.8	0.24	10.99
		0.5	3.1E+12	14	6.7E-03	1.4E-01			11.01
		0.4	2.5E+12	16	6.4E-04	1.1E-01	8.8	0.24	10.96

		0.4	2.5E+12	18	6.3E-04	1.1E-01	8.8	0.37	10.99
		0.4	2.5E+12	20	6.2E-04	1.1E-01			10.92
		0.3	1.9E+12	22	6.1E-04	9.7E-02	8.8	0.24	10.94
		0.3	1.9E+12	24	6.6E-04	9.0E-02	8.8	0.22	10.93

グラフ3のときの測定結果

元素	価数	ビーム電流 [μA]	生成率	RF 強度 [W]	ガス圧		アインツェル		分析電磁石 電流 [A]
					IJ [Pa]	PG [Pa]	電圧 [kV]	電流 [mA]	
Ar	1	14.4	9.0E+13	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		16.85
		25.4	1.6E+14	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	16.76
		26.4	1.7E+14	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	16.78
		22.4	1.4E+14	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	16.77
		21.7	1.4E+14	24	2.6E-04	<E-2			16.75
	2	0.7	2.2E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		11.84
		1.2	3.8E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	11.82
		0.5	1.6E+12	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	11.81
		1.6	5.0E+12	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	11.86
		3.3	1.0E+13	24	2.6E-04	<E-2			11.86
3	0.2	4.2E+11	24	2.6E-04	<E-2			9.60	
C	1	0.8	5.0E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		9.19
		1.5	9.4E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	9.20
		1.9	1.2E+13	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	9.23
		2.1	1.3E+13	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	9.16
		2.8	1.8E+13	24	2.6E-04	<E-2			9.18
	2	0.2	6.3E+11	24	2.6E-04	<E-2			6.52
CO2	1	0.5	3.1E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		17.74
		0.8	5.0E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	17.63
		0.8	5.0E+12	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	17.64
		0.7	4.4E+12	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	17.60
		0.7	4.4E+12	24	2.6E-04	<E-2			17.59
H2O	1	3.8	2.4E+13	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		11.27
		8.2	5.1E+13	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	11.26

		10.5	6.6E+13	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	11.27
		12.8	8.0E+13	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	11.24
		9.1	5.7E+13	24	2.6E-04	<E-2			11.26
N	1	0.3	1.9E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	9.96
		0.2	1.3E+12	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	10.02
		0.4	2.5E+12	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	9.92
		0.5	3.1E+12	24	2.6E-04	<E-2			9.90
N2	1	3.4	2.1E+13	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		14.06
		5.6	3.5E+13	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	14.01
		6.2	3.9E+13	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	14.05
		6.5	4.1E+13	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	14.01
		6.3	3.9E+13	24	2.6E-04	<E-2			14.02
NH	1	0.2	1.3E+12	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	10.29
		0.1	6.3E+11	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	10.23
		0.2	1.3E+12	24	2.6E-04	<E-2			10.22
NO	1	0.6	3.8E+12	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	14.52
O	1	0.7	4.4E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		10.66
		1.4	8.8E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	10.62
		1.8	1.1E+13	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	10.62
		2.1	1.3E+13	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	10.59
		3.1	1.9E+13	24	2.6E-04	<E-2			10.59
	2	0.2	6.3E+11	24	2.6E-04	<E-2			7.52
O2	1	0.2	1.3E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		15.13
		0.3	1.9E+12	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	15.00
		0.3	1.9E+12	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	15.05
		0.4	2.5E+12	24	2.6E-04	<E-2			14.99
OH	1	0.9	5.6E+12	8	3.8E-04	8.1E-02	8.3		10.97
		2.1	1.3E+13	12	3.0E-04	6.4E-02	8.3	0.17	10.94
		2.7	1.7E+13	16	3.0E-04	6.7E-02	8.3	0.24	10.93
		3.2	2.0E+13	20	3.5E-04	7.3E-01	8.7	0.33	10.93
		3.2	2.0E+13	24	2.6E-04	<E-2			10.95

8 参考文献

[ref.1]イオン源工学 石川順三 アイオニクス株式会社

[ref.2]物理学辞典 物理学辞典編集委員会 培風館 P.2386

[ref.3]岩波理化学辞典第5版 岩波書店 P.98

[ref.4]NIFS-DATA51

Electron Impact Ionization Data for Atoms and Ions –up-dated in 1998 P.68~70

謝辞

本研究を行うにあたって、ご協力、助言を下された皆様に感謝いたします。

研究全般にわたり細部までご指導して下さった野尻洋一先生に感謝いたします。

様々なアドバイスとご指導をして下さった百田先生に感謝いたします。

実験や考えを深めていくために具体的な教えていただいた関整爾さんに感謝いたします。

製作・実験・議論と様々な手助けをしてくれていた浜川恒圭君、濱口顕典君に感謝いたします。