

ビームプラズマ重イオン源におけるアルゴンイオン ビームの引き出し

亀谷, 均

九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

大庭, 邦夫

九州大学大学院工学研究科応用原子核工学専攻 | 三菱電機株式会社

堀江, 通宏

九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

小松, 和則

九州大学工学部応用原子核工学科

他

<https://doi.org/10.15017/17554>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 4 (1), pp.65-72, 1982-06-30. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :



ビームプラズマ重イオン源におけるアルゴン イオンビームの引き出し

亀谷 均・大庭邦夫*・堀江通宏

小松和則**・的場 優***

(昭和 57 年 3 月 27 日 受理)

Argon-ion beam extraction from a beam-plasma heavy-ion source

Hitoshi KAMETANI, Kunio OHBA*,
Michihiro HORIE, Kazunori KOMATSU**
and Masaru MATOBA***

The first experiment of extraction of ion beam from a beam-plasma ion source is described. Beam currents of argon-ions as functions of several parameters, the extraction voltage, the extraction geometry and the gas pressure, have been measured. The experimental results are analysed using Langmuir-Child formula and electron-beam trace theory. The maximum beam current extracted was about 1.5 mA with about 2 mm beam diameter.

1. 序

近年、重イオンビームを利用する研究分野の発展にともない、その目的に応じて様々な型のイオン源の開発が行なわれている。これらのイオン源はその動作原理にいろいろな工夫が施されていて、一見それらの動作はすべて異なるように見えるが、基本的な動作については、共通する部分が多く、イオン源をその基本的な動作について理解することは極めて重要であると考えられる。

一方核融合研究の発展の中でトカマクに代表される磁気封じ込めによる核融合炉の実用性に対する疑問から、レーザーあるいは電子線を用いて D-T ペレットにエネルギーを局所的に与え爆縮によって核融合を起させる慣性核融合¹⁾²⁾に関する研究が様々な機関で始められ、更に最近では高エネルギー重イオンビームを

用いた慣性核融合³⁾の可能性が検討されている。

このような状況のもとで、我々は、現存する加速器用のイオン源を開発する立場以外に、現在使われている様々なイオン源に対して原理的、あるいは実用的な側面での検討を加え、更に新しい原理による性能の改善をはかるという立場が重要となってきたと考え、1) イオン源の基礎的な問題を研究し易いこと、2) 重イオン核融合炉用加速器のイオン源の基礎研究用として低い電荷のエミッタンスのよい強力なビームを得ることができること、3) サイクロトロンなどの加速器の入射用イオン源として多価の陽イオンが発生できること、という条件を満たすイオン源の開発を計画した。

このような重イオン源開発の立場を踏まえた上で、種々のイオン源を概観してみると⁴⁾、PIG 型では高電離イオンが著しく減少してしまうこと、EBIS 型では低電離イオンから高電離イオンまで安定して得られるが、今のところ十分なビーム強度が得られていないこと、更に ECR 型では、ビーム強度、電離度共に良好であるが消費電力が大きいことといった欠点があり、また、デュオプラズマトロン型では高電離イオンの発

エネルギー変換工学専攻修士課程

* 工学研究科応用原子核工学専攻修士課程（現在、三菱電機(株)）

** 工学部応用原子核工学科学生

*** エネルギー変換工学専攻

生が難しい、といった欠点が指摘されている。以上のことから、ビームプラズマ重イオン源⁵⁾⁶⁾が前述のイオン源開発の立場に適していると考えられ、我々はこの型のイオン源の開発を行っており、現在までに、ピアス型電子銃、電離室、及びイオン引き出し部を完成させている。

ところで、イオン引き出し系においては、引き出されるイオンの価数及びビームの性質を決定する要素として、引き出し電極の形状及び位置、引き出し電圧、プラズマ密度及び電子温度などがあり、これらがプラズマ界面の形状を決定していると考えられる。従って良質のビームを得るためにはプラズマの界面の様子を調べることが極めて重要なことである。

そこで本研究では、様々な条件の下でイオンビームの引き出しを行ない、プラズマ界面の様子を調べたことを主な目的とした。

2. 解析方法

プラズマが壁と接触するとき、プラズマと壁との間にシース領域ができる。この領域の長さ、つまり壁とプラズマ界面までの距離をシース距離とよぶ⁷⁾。ビームプラズマイオン源は一般に電離室を有し、この電離室内には電子ビームによってプラズマが形成されている。イオン引き出し電極と電離室のプラズマとの間のイオン引き出し領域では中性粒子とイオンとの衝突がないと仮定すると、プラズマとシース領域の境に遷移領域とよばれるデバイ長程度の長さをもつ電界の浸透した領域ができる。通常のイオン源では、この遷移領域は非常に薄い層であるからこの層をプラズマ界面とする⁷⁾。このプラズマ界面からのイオン引き出しにおいて、引き出されるイオンは空間電荷制限領域にあると考えられ、Langmuir-Childの法則が適用でき、イオン電流密度は

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2Zq}{m_i} \right)^{1/2} \frac{V_i^{3/2}}{d_s^2} \quad (1)$$

となる⁸⁾。ここで ϵ_0 は真空の誘電率、 Z はイオンの価数、 q は素電荷、 V_i はイオン引き出し電圧、 d_s はシース距離で我々の系ではイオン引き出し電極からプラズマ界面までの距離、そして J はイオン電流密度である。本イオン源においてイオンは、電子とイオンを中和させながら、引き出す形式をとっているため、単にイオンのみの空間電荷による制限電流を考えるのではなく電子の存在の効果をも考えなくてはならな

い。この効果を考えると、引き出されるイオン電流は

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 r \left(\frac{2Zq}{m_i} \right)^{1/2} \frac{V_i^{3/2}}{d_s^2} \quad (2)$$

となる⁹⁾。ここで r は緩和係数である。もし引き出し電圧及びシース距離の変化によって、引き出されるイオンの価数 Z 及び緩和係数 r が変化しないものとする、上述のイオン電流は

$$J = \alpha \frac{V_i^{3/2}}{d_s^2} \quad (3)$$

と簡化できる。ここで α は比例定数である。シース距離は後述する2つの実験から求めたが、その解析は次に述べる方法で行なった。まず引き出し電圧 V_i をパラメーターとする電極間距離 d とイオン電流特性実験の結果からイオン電流は d^{-2} にほぼ比例するこ

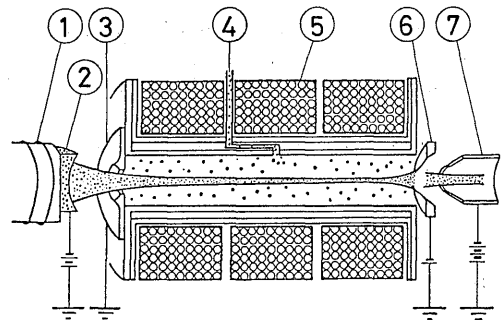


Fig. 1 Schematic drawing of the beam plasma heavy ion source

1: Heater, 2: Cathode (LaB₆), 3: Anode, 4: Gas inlet, 5: Compression solenoid, 6: Electron collector, 7: Ion extractor

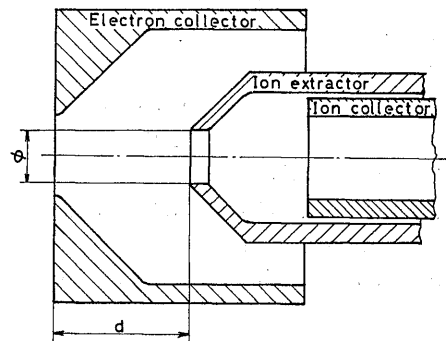


Fig. 2 Extraction system of the beam plasma heavy ion source

d : Distance between electrodes
 ϕ : Electrode hole diameter

とが分った。このことは、引き出し電圧 V_i が -10 KV 近辺になるとシース距離 d_s と幾何学的な電極間距離 d がほぼ一致していることを示している。そこで $d = d_s$ と仮定して、電極間距離 d とイオン電流特性実験から α を決定する。次に電極間距離 d をパラメーターとしたイオン引き出し電圧とイオン電流特性実験、及び前に求めた α の値を用いて (3) 式からシース距離を計算する。以上がシース距離の解析方法である。Fig. 1 にビームプラズマ重イオン源の概念図を示し、Fig. 2 に電極間距離 d と電極孔直径 ϕ を定義する。

3. 実験装置と実験

3.1. ビームプラズマ重イオン源

現在開発中のビームプラズマ重イオン源の動作原理と特徴を簡単に述べる。このイオン源ではまず電子ビームをピアス型電子銃で発生、加速し、電離室に導入した中性ガスと衝突電離を起こさせる。ビーム電子により電離されたイオンはビーム電子の形成する電位の谷を中和し、なおもビーム電子による電離が続く弱電離プラズマが形成される。これと並行して、このプラズマとビーム電子が相互作用を起し、電子サイクロトロン周波数に近い周波数をもつマイクロ波、及び電子サイクロトロン周波数より高く、プラズマ密度に依存する周波数をもつマイクロ波が発生する¹⁰⁾¹¹⁾。これ

らの電子サイクロトロン周波数に近いマイクロ波とそれよりも高い周波数をもつマイクロ波による電離が加わってビームプラズマ密度が、更に上昇する。このような状態から、イオン引き出し電極に電圧を印加し、イオンを引き出す方式のイオン源をビームプラズマ重イオン源という。

次に本ビームプラズマ重イオン源の特徴について述べる。Fig. 1 から分るようにこのイオン源は電子銃、電離室、引き出し部の三つの部分に分かれていて、1) 電子発生源の維持が容易であること、2) それぞれの部分での基礎的なデータが得易いこと、という特徴がある。原理面での特徴は次の通りである¹²⁾。1) ビームプラズマ相互作用によるマイクロ波で自らを加熱することができる。2) マイクロ波電離の ECR イオン源と共通点を持ち多価イオン源としても有望である。3) プラズマ密度は単なる電子ビームによる衝突電離に比べて $10^2 \sim 10^3$ 倍程度で一定の値に保たれると考えられている。

3.2. 実験装置

本研究に用いた実験装置を Fig. 3 に示す。この実験装置は、Fig. 3 の左側からピアス型電子銃、電子銃で発生させた電子とガス分子との衝突電離を起こさせる電離室及び電離室内で生成したイオンを引き出すためのイオン引き出し部から構成されている。各部の説明を以下に行なう。

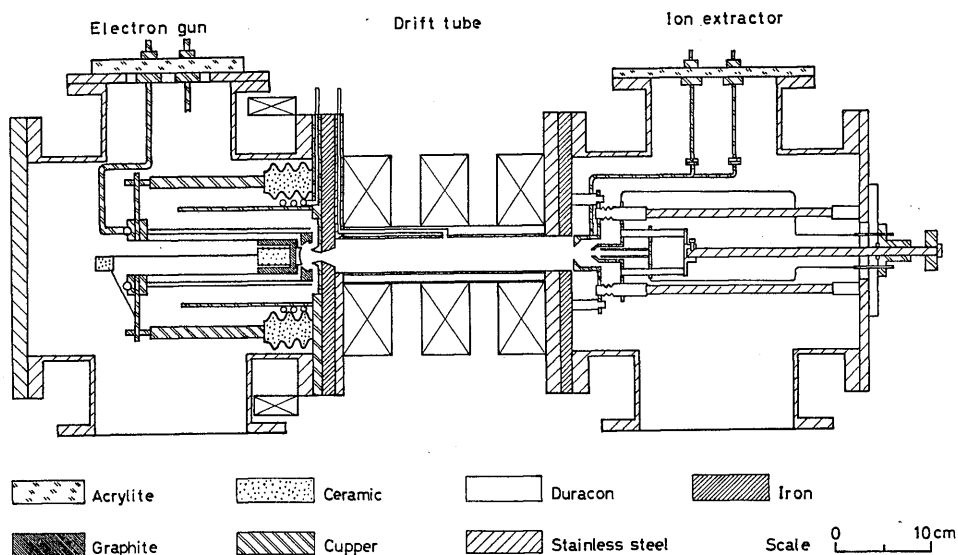


Fig. 3 Cross-section view of the beam plasma heavy ion source

3. 2.1 電子銃

この電子銃¹³⁾はピアス型の構造をもち、曲率半径が20 mmで直径が30 mmのLaB₆の焼結体でできた陰極を備えている。LaB₆の仕事関数は1.27 eVと低く、そのために陰極表面を1,300°C以上に加熱すると200 mA以上の電子電流が得られる。この焼結体は高温で金属を脆化させる性質があり、この電子銃では陰極の支持は、黒鉛板で行なっている。現在までにLaB₆の陰極を約400時間使用しているが電子の放出特性の劣化は起っていない。なお、この電子銃のパービアンスは 1.8×10^{-6} A/V^{1/2}となっている。

3. 2.2 電離室

電離室は、電子銃で発生させたビーム電子で、電離室中央から導入されるガスを衝突電離させプラズマを形成させる空間であり、直径34 mm、長さ200 mmのステンレスパイプでできている。電離室の周囲にはビーム電子収束用の3個のソレノイド電磁石が配置されており、1.3 KGの磁場が電離室内で得られる。今回は電離ガスとしてアルゴンガスを使用した。

3. 2.3 イオン引き出し部

イオン引き出し部の構造図をFig. 3に示す。イオン引き出し部は、電子集電極（ただし、負の電圧を印加して反射電極とすることもある）、イオン引き出し電極及びイオン集電極から構成され、電離室内のプラズマ界面等の情報を得るために、イオン引き出し電極とイオン集電極は一体として移動させることができるように設計されており、イオン源の動作時に外部からその距離を変えることができる。それぞれの電極間及びイオン源本体との絶縁はジュラコン及びテフロンで行なっている。

3. 2.4 真空排気と真空度

電子銃及びイオン引き出し部には各々、排気速度1,200 l/sの油拡散ポンプが備えられており電子銃の部分には液体窒素コールドトラップが付けてある。到達真空度は電子銃の陰極の加熱がない場合、電子銃用チェンバー及びイオン引き出し用チェンバーでそれぞれ、 1.7×10^{-7} Torr及び 7×10^{-7} Torrとなるが、陰極の加熱400 Wでそれぞれ、 6×10^{-6} Torr及び 2×10^{-6} Torrとなる。

3. 3 実験

今回は主としてイオン源の軸方向へイオンを引き出す実験を行なった。

3. 3.1 軸方向へのイオンの引き出し

ビーム電子を加速し、収束磁場が存在して電離室となるドリフトチューブに中性ガスを導入し、電離衝突が起った状態でイオン引き出し電極に負の高圧を印加し、イオンを引き出す。パラメーターとしてイオン引き出し電圧 V_i 、電極間距離 d 、及びガス圧力 P を変えて引き出し電流を測定した。 V_i は-2 KVから-15 KVまで、 d は8から28 mmまで、そして P は 4×10^{-6} Torrから 6×10^{-5} Torrまで変化させた。イオン電流はイオン集電極に捕えられるものを I_{ic} 、引き出し電極とイオン集電極のそれぞれの電流の和を I_{it} とした。実験結果で述べるイオン電流はビーム電子電流 I_{et} で規格化した値つまり I_{it}/I_{et} を用いている。

電極孔の直径 ϕ が6 mm及び2 mmのイオン引き出し電極を用いて実験を行なった。

3. 3.2 電子の蓄積実験

上述の実験では電子集電極に正電圧を印加して実験を行なったが、ここでの実験では負の電圧を印加して、イオン電流を引き出した。

4. 実験結果と考察

4. 1 軸方向へのイオンの引き出し

Fig. 4は引き出し電極孔直径 ϕ が6 mm、ガス圧力 P が 1.3×10^{-5} Torr、電離室内の磁場の強さ B が1.0 KG及びビーム電子の加速電圧 V_e が1.5 KVの場合の引き出し電極間距離 d と規格化イオン電流 I_{it}/I_{et} の特性で、パラメーターは V_i である。図に示されるように、 V_i が-10 KVの場合、ほぼ実験点は傾きが-2の直線上にある。このことは第2章でも述べたように、 d_s と d がほぼ一致していて d の変化によってこの関係がくずれないことを示している。そこでこの実験結果から、 α の値を計算により求めた。ただしガス圧力が 6×10^{-5} Torr程度に高くなると実験点は傾きが-2の直線からずれてくる傾向にあった。

次に規格化イオン電流のイオン引き出し電圧依存性について調べた結果をFig. 5に示す。パラメーターは d で、他の条件はFig. 4の結果と同じである。Fig. 5の直線は傾きが約1.5の直線であるが、実験はこの傾きからずれていることが分る。もしシース距離が V_i の変化によって影響を受けないとするならイオン電流は、 $V_i^{3/2}$ に比例するはずであるので、この実験点の、傾き1.5の直線からのずれは、シース距離 d_s

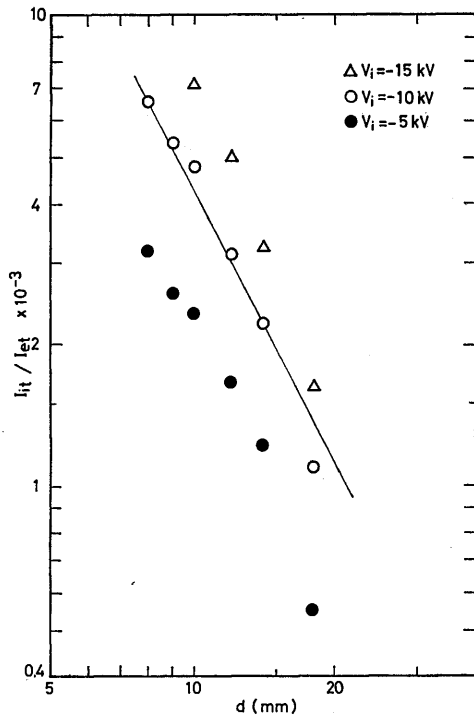


Fig. 4 Normalized ion current versus distance between electron collector and ion extractor

が V_i によって変化したことを意味する。この傾向は ϕ が 2 mm のイオン引き出し電極の場合も同じであるが、 d が大きくなるにつれて傾き 1.5 の直線からのずれは大きくなる傾向にある。

解析のところで述べた方法で V_i の変化による d_s の変化を計算する。Fig. 4 から求めた α の値と Fig. 5 の実験結果から (3) 式を用いて計算すると、Fig. 6 に示されるような結果を得る。この図から引き出し電圧 V_i が負の高圧になるにつれて、シース距離が増大し、プラズマ界面がしだいに凹状になることを示している。プラズマ界面が凹状になれば引き出されるイオンビームは収束性の良好なビームになる。 $\phi=2$ mm の引き出し電極の場合も同じ傾向を示した。

Fig. 7 はイオン引き出し用チャンバーで測ったガス圧力 P とシース距離 d_s の特性を示す図である。白丸は d が 10 mm の場合を黒丸は d が 18 mm の場合を示している。 V_i は -10 KV, 及び -5 KV の場合をそれぞれ図にしたがシース距離のガス圧力依存性は見い出されなかった。

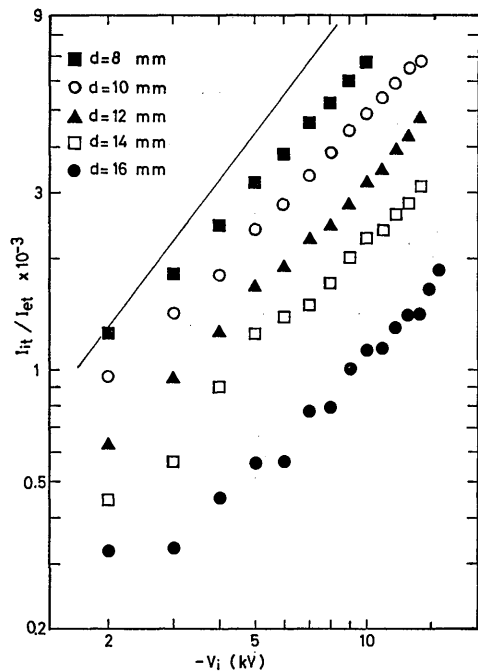


Fig. 5 Normalized ion current versus extraction voltage

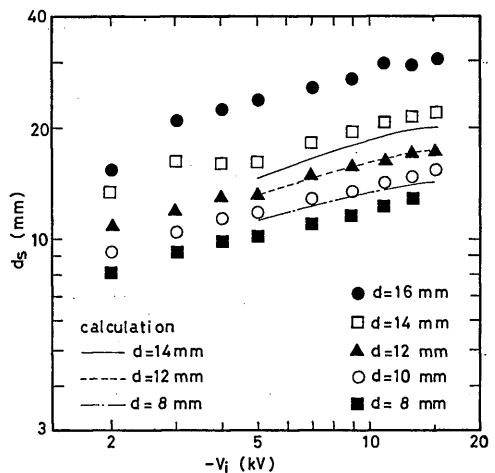


Fig. 6 Sheath distance versus extraction voltage

次にイオン引き出し孔付近の電子及びイオンの挙動のシミュレーション結果¹⁴⁾を参考にして考察を加えてみる。Fig. 8 (a), (b) は、基礎式としてポアソンの方程式及び磁場を考えない非相対論的な運動方程式等を用い緩和法によって電子及びイオンの挙動をシミュ

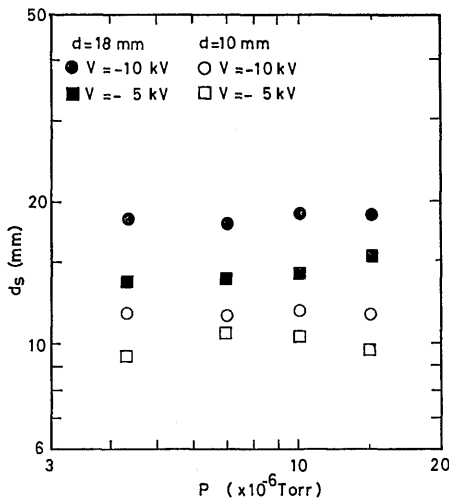


Fig. 7 Sheath distance versus gas pressure

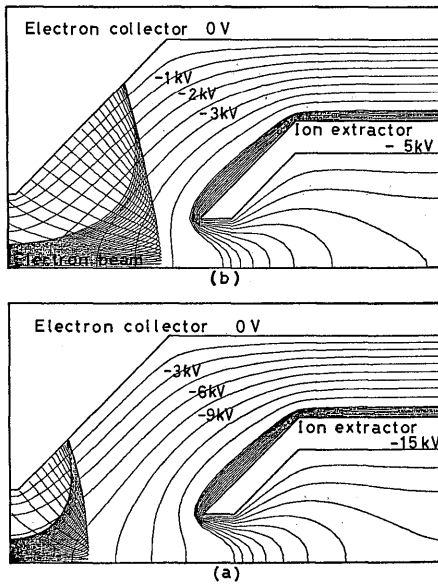


Fig. 8 Voltage distribution and orbits of electron at the ion extraction system

レートした結果を表わすものである。Fig. 8 (a) は V_i が -15 kV の場合を (b) は -5 kV の場合をそれぞれ示し、電子集電極及びイオン集電極に沿った曲線は等電位面を、電子集電極孔からの曲線は電子の軌跡を表わすものであり、電子は電子集電極に当たっている。(a) と (b) を比較すると引き出し電圧の相違に

よって電子ビームの軌跡が大きく変化することが分る。ところでプラズマ界面は、ビーム電子の電離室からのしみだしの状況に依存すると考えられ、引き出し電極からビーム電子の軌跡の包絡線までの距離を D とした時、 $d_s = a + bD$ (a, b は定数) なる関係があるものと仮定することができる。Fig. 6 の $d = 12$ mm の実験値 d_s とシミュレーションから求めた D の値を用いて最小二乗法で a, b を決定する試みを行なった。Fig. 6 にこのような方法で求めたシース距離の V_i による変化を示した。Fig. 6 から分るようにシミュレーションから求めたシース距離は $d = 12$ mm のときに実験値を良く再現しているが、 d が 8 mm 及び 14 mm の場合は、シース距離の変化の傾向は実験から求めたものに似ているが、その絶対値は、ずれている。このことから、プラズマ界面はビーム電子を中心に形成されていると考えられるが、シミュレーションから求めたシース距離はその評価の方法に問題があると考えられる。

Fig. 9 はガス圧力 P と規格化イオン電流の特性を示すものである。ガス圧力 P が 3×10^{-5} Torr 近くまでガス圧力と規格イオン電流は比例していることが分るが更にガス圧力が高くなるとこの比例関係が崩れ

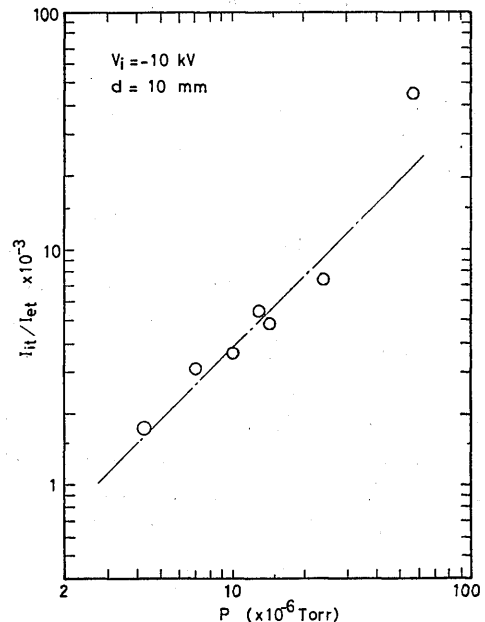


Fig. 9 Results of normalized ion current measurements as a function of gas pressure

てくることが分る。Targ¹¹⁾ らは同様な実験においてガス圧力がある点（臨界圧力）を越えると著しくプラズマ密度が増加することを示しているが、本イオン源での臨界圧力は、実験点が少ないので断定はできないが、 4×10^{-5} Torr 付近であると考えられる。

4. 2 電子蓄積の効果

電子集電極に負の電圧を印加し、電子を電離室内へ反射したとき、引き出されるイオンがどのように変化するかを確認する実験を行なった。Fig. 10 は、規格化電流の電子集電極電圧 V_{ec} 依存性を表わす図で、ガス圧力が 1.2×10^{-5} Torr と 3.9×10^{-6} Torr の場合を示している。この図から分るように、電子集電極に負の電圧を印加することにより、イオン収量は急激に増加している。正の電圧を印加するときと比べて、ガス圧力によって、異なるが2倍から7倍のイオン電流収量の増加があった。このイオン電流増加の原因を統計的な電子の蓄積とみなすと、図の実線のような曲線が得られる。ガス圧力が 1.2×10^{-5} Torr の場

合 V_{ec} が負の領域でこの曲線は実線を良く説明しているが、ガス圧力が 1.2×10^{-5} Torr 以外では、実験点からのずれが大きいことが分った。従って電子集電極を反射電極配置にすることは単に統計的な電子の蓄積のみの影響によるものではないことが分る。この効果は、恐らく電子ビームを反射し電離室内の電子密度が増加することによって、いわゆるビームプラズマ相互作用が電離室内で起った為であると考えられる。

5. 結 論

著者等が開発しているビームプラズマ重イオン源からのイオン引き出し実験について報告した。特にビームプラズマ重イオン源のプラズマ界面の変化の様子を調べ、次のような結論を得た。

(1) ガス圧力が 3×10^{-5} Torr までは、ガス圧力と引き出されるイオン収量は比例関係にあることが分った。

(2) シース距離は、実験を行なった範囲ではガス圧力に依存しないことが結論された。

(3) イオン引き出し電圧の変化によるシース距離の動きを定量的に決定することができ、良質のイオンビームを得るための指針が得られた。

(4) 電子集電極に負の電圧を印加し、電離室内に電子を蓄積することによって、プラズマ密度が増加し、引き出されるイオン電流が急激に増加するという現象が観測された。

なお、本報告では、ビーム電流の強度については議論しなかったが、Fig. 9 から分るように、引き出された最高ビーム電流は、直径 2 mm のとき、1.5 mA とこの種のイオン源としては極めて強力なものであった。但し、この点についてはビーム電荷分析などを行なった上で、詳しく議論したい。

References

- 1) K. Boyer: IEEE Trans., NS-22 (1975) 38
- 2) F. Winterberg: Phys. Rev. 174 (1968) 212; Nuclear Fusion 12 (1972) 353
- 3) R. O. Bangerter: Proc. of the 3rd Heavy Ion Fusion Work Shop (ANL) (1978)
- 4) R. Geller: IEEE Trans., NS-26 (1979) 2120
- 5) V. A. Saenko, A. I. Vladimirov and Yu. P. Tret'yakov: Instrum. & Exper. Tech. 20 (1977) 645
- 6) I. Alexeff and W. D. Jones: IEEE Trans.,

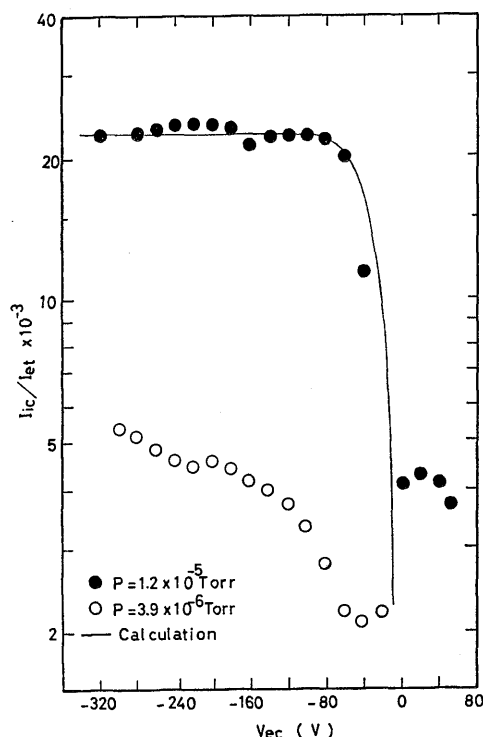


Fig. 10 Normalized ion current as a function of extraction voltage for two different gas pressures

- NS-19 (1972) 195
- 7) 石川順三: アイオニクス 3 (1977) 31
- 8) 日本学術振興会編: 電子・イオンハンドブック (1973) 74
- 9) 高木俊宣, 石川順三: 重イオン科学 (1979) 110
- 10) W. D. Getty and L. D. Smulin: J. Appl. Phys. 34 (1963) 3421
- 11) R. Targ and L. P. Levine: J. Appl. Phys. 34 (1963) 731
- 12) J. Ishikawa, F. Sano, H. Tsuji and T. Takagi: Proc. of the Symposium on Ion Sources and Application Technology (1977) 59
- 13) T. Shintake, K. Ohba, M. Matoba and A. Katase: Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) 341
- 14) M. Matoba et al.: to be published
-