

JAERI-Tech
2002-038



JP0250147



大強度陽子加速器用負イオン源のビーム試験

2002年3月

下岡 隆*・小栗 英知・滑川 裕矢*・富澤 哲男
奥村 義和・長谷川 和男

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

大強度陽子加速器用負イオン源のビーム試験

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
下岡 隆^{*1}・小栗 英知・滑川 裕矢^{*2}・富澤 哲男
奥村 義和⁺・長谷川 和男

(2002年1月31日受理)

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構が共同で推進する大強度陽子加速器計画では、陽子ビームをターゲットに照射し、核破碎反応によって発生する二次粒子を用いて多様な分野の研究を展開するため、既存の加速器を大幅に上回るビーム出力1MWという性能を目指している。これに必要なビームを生成するイオン源には、ビーム電流60mA、デューティー2.5%以上が必要とされる。また、シンクロトロンへの入射効率を上げるために、ビームの種類は負水素イオンが必須となる。

原研では、核融合炉で使用する大型負イオン源開発で培われた技術をベースに大強度陽子加速器用体積生成型負イオン源の設計・製作を行い、ビーム試験を進めてきた。その結果、セシウム添加状態において負イオンビーム電流72mA、規格化 RMS エミッタنس 0.15 π mm·mrad の負イオンビーム引き出しに成功した。また、運転ガス流量がパルスビーム電流波形に大きく影響し、16 SCCM 程度で良好なパルス平坦度が得られることが分かった。これらの開発により要求性能を十分に満たすイオン源を実現した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

⁺ ITER 業務推進室

^{*1} 東京工業大学

^{*2} 日本アドバンストテクノロジー株式会社

Beam Test of the Negative Ion Source for the High Intensity Proton Accelerator

Takashi SHIMOOKA^{*1}, Hidetomo OGURI, Yuuya NAMEKAWA^{*2}
Tetsuo TOMISAWA, Yoshikazu OKUMURA⁺ and Kazuo HASEGAWA

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2002)

The high intensity proton accelerator facility project which is conducted jointly by JAERI and KEK is to irradiate a proton beam onto a target and to use the secondary particles produced by nuclear spallation for various science studies. A negative hydrogen ion source for the accelerator is required to extract a peak beam current of more than 60 mA with a duty factor of 2.5 %. In addition, the ions should be negatively charged in order to improve the capture efficiency of the beam injected into a synchrotron. At JAERI, a negative ion source for the project has been developed with various technologies based on the large negative ion source for the nuclear fusion application. As a result of the beam test, the negative ion beam current and the rms normalized emittance of 72 mA and $0.15 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ were achieved in the cesium seeded operation, respectively. A waveform of the pulsed beam current was sensitive to the operation gas flow rate, and became to have a good flatness at about 16 SCCM. These results show that the basic performance of the ion source satisfies the requirement of the ion source for the project.

Keywords: Joint Project, High-intensity Proton Accelerator, Negative Hydrogen Ion Source, Cesium

⁺ Office of ITER Project Promotion

^{*1} Tokyo Institute of Technology

^{*2} Nippon Advanced Technology, Co. Ltd

目次

1. はじめに.....	1
2. 実験装置.....	2
3. 実験結果と考察.....	12
3.1 ビーム電流.....	12
3.1.1 測定方法.....	12
3.1.2 アーク放電パワー依存性.....	13
3.1.3 フィルター磁場強度依存性.....	13
3.1.4 バイアス電圧依存性.....	13
3.2 パルスビーム電流波形.....	14
3.3 エミッタンス.....	15
3.4 フィラメント寿命.....	15
4. まとめ.....	29
謝辞.....	30
参考文献.....	30

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Setup	2
3. Experimental Results and Discussion	12
3.1 Negative Ion Current	12
3.1.1 Measurement method	12
3.1.2 Arc Discharge Power Dependence	13
3.1.3 Magnetic Filter Strength Dependence	13
3.1.4 Bias Voltage Dependence	13
3.2 Waveform of Pulsed Ion Beam Current	14
3.3 Emittance	15
3.4 Filament Lifetime	15
4. Summary	29
Acknowledgment	30
Reference	30

This is a blank page.

1. はじめに

現在、数 MW 規模の高いビーム出力の陽子加速器は存在しない。そのため、原子核物理、素粒子物理、物質科学、生命科学、原子力工学といった分野で最先端の研究を行う加速器ユーザーから、よりエネルギーが高く、よりビーム強度の強い陽子加速器の建設が世界的に求められている。

そこで日本原子力研究所 (JAERI) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の共同プロジェクトである大強度陽子加速器建設計画^[1]が 2008 年の完成を目指して 2001 年からスタートした。この施設が完成し設計通りの性能が達成されることによって、世界最大出力の陽子ビームを実験施設に供給できることになる。

本計画の加速器には、既存のものに比べはるかに大きいビーム電流強度が要求されている。電流強度はビーム入射器であるイオン源の性能によって決定される。つまり、加速器の大電流加速を可能にするには、大強度イオン源が必要不可欠となる。本計画用のイオン源の主要要求性能を表 1・1 にまとめた。

表 1・1 大強度陽子加速器計画用イオン源の要求性能

パラメータ	要求性能
ビーム種類	負水素イオン
ピーク電流	>60 mA
ビームエネルギー	50 keV
デューティーファクタ	2.5 %
RMS 規格化エミッタンス	~0.20 π mm · mrad
運転サイクル周期	500 時間

世界的に見ても表 1・1 の性能を全て満たすイオン源は存在しない。そこで原研では、核融合炉で使用する NBI 用大型負イオン源開発で培われた技術をベースに大強度陽子加速器用負イオン源のプロトタイプを製作し、ビーム試験を行ってきた。本イオン源は、励起水素分子と電子の解離性付着を利用して、プラズマ中で直接負水素イオンを生成させる体積生成型イオン源で、今日の負イオン源開発で主流となっている方式のものである。また体積生成型の負水素イオン源にセシウムを添加するとビーム強度が著しく増加することが知られており、本実験でもセシウムを使用した。

本報告は、4 章で構成される。第 2 章では、実験装置の構造、動作機構について述べる。第 3 章では、実施した実験とその結果を挙げ、得られた結果から考察を述べる。第 4 章では、以上の結果から大強度陽子加速器計画が要求する性能の実現性についてまとめ結論とする。

2. 実験装置

今回実験を行ったイオン源本体の構造図を図 2・1 に、外観を図 2・2 にそれぞれ示す。本イオン源は、負イオン生成効率を上げるための様々なパラメーターサーベイが行えるように、プラズマ生成室をインシュレータの外側に設置し、プラズマ生成室の磁石配置の変更などが容易に行えるようになっている。しかし、その代償としてイオン源ビーム引き出し孔からイオン源取り付けランジ間の距離が長くなり、この間で空間電荷効果によりビームが拡がる恐れがある。

プラズマ生成室の形状は、直径 150 mm、長さ 200 mm の円柱型で、材質は無酸素銅である。ソースプラズマの生成は直径 1.5 mm のタンクステンフィラメント 2 本によるアーク放電を用いる。プラズマ生成室の磁石配置を図 2・3 に示す。永久磁石は生成室側壁と上蓋に並べられており、ソースプラズマ閉じ込め用のマルチカスプ磁場と体積生成型イオン源に必要なフィルター磁場を形成している。磁気フィルターは、永久磁石をプラズマ生成室の外側に設置する外部フィルター方式である。ビーム軸方向のプラズマ生成室中心の磁束密度分布の一例を図 2・4 に示す。

ビーム引き出し系は、プラズマ電極、引き出し電極および接地電極の 3 枚の電極から構成される。ビーム引き出し系の詳細寸法を図 2・5 に示す。プラズマ電極のビーム引き出し孔の直径は 8 mm、電極のギャップ長は、プラズマー引き出し電極間が 2.2 mm、引き出し一接地電極間が 8.35 mm にそれぞれ調整されている。

プラズマ電極は 2 mm 厚のモリブデン製である。セシウム効果はプラズマ電極温度に依存するので、熱電対を電極に取り付け運転中に温度をモニターしている。プラズマ電極はアーク放電パワーによって 400~500 °C 程度に加熱される。引き出し電極は 10 mm 厚の無酸素銅製である。負イオンとともに引き出される電子の加速を防ぐために、引き出し電極中に小型の永久磁石を埋め込み、ダイポール磁場によって電子の軌道を曲げ引き出し電極に衝突させる。さらに電子のビーム引き出し系への漏れを抑制するために、電子抑制電極と呼ばれる電極を引出電極の下流に設置し、引出電極で反射した電子または発生した二次電子をここで捕捉・処理することが有効である。本装置では、電子抑制電極の代わりに引き出し電極上面から 6 mm の位置にビーム軸方向の長さ 2 mm、直径 14 mm の溝を設け、ここで引き出し電極上面で捕捉しきれなかった電子の捕捉を行っている。接地電極は 2 mm 厚の無酸素銅製である。

イオン源から引き出されたビームの残留ガスによる中性化損失を低減するために、イオン源のビーム引き出し系の真横に排気速度 1300 l/s の差動真空排気装置 2 台を設置し、イオン源引き出し系内の残留ガスを積極的に真空排気している。これによりイオン源下流の真空度が大きく改善される^[2]。

イオン源本体と電源の接続図を図 2・6 に示す。イオン源電源を構成する各電源の性能は図に示した通りである。これらの電源のうち、加速電源、引き出し電源およびアーク電源についてはパルス運転対応となっているが、加速電源についてはイオン源電源の浮遊容量の影響でパルスの立ち下がり時間が遅いため、ビームのパルス化はアーク電源または引き出し電源のオン／オフ制御

で行っている。各パルス電源の典型的なタイムシーケンスを図 2-7 に示す。

本実験では大強度の負イオンビームを得るためにプラズマ生成室側面にセシウムオーブンを設置し、プラズマ生成室内にセシウムを添加した。セシウムオーブンの外観を図 2-8 に、構造図を図 2-9 に示す。セシウムオーブンは、リザーバー、高温バルブおよびセシウム導入口を備えたチューブで構成され、それぞれの場所にシーズヒーターと熱電対が取り付けられている。実験では、高温バルブとチューブを 300 °C、リザーバーを 250 °C 程度に保ち、温度が定常になった後にバルブを手動で一定時間開放して、プラズマ生成室内にセシウム蒸気を添加した。

セシウムオーブンへのセシウム封入作業は、図 2-10 に示すようにドライポンプを備えたグローブボックス内で行う。まず、グローブボックスにセシウムオーブン、セシウムの入ったアンプル、ガスケットなどを入れる。グローブボックスをドライポンプで真空に引き、0.08 MPa ~ 0.09 MPa になってからアルゴンガスを入れる。このアルゴン置換作業を 2、3 回行った後に、グローブボックス内でセシウムアンプルを割り、セシウムを封入する。

オープンに封入したセシウムを清浄状態に保つため、セシウムの封入を行う前にセシウムオーブンのベーキング処理を行う。ベーキング処理を行う装置の外観図を図 2-11 に示す。セシウムオーブンを純水で超音波洗浄した後、ベーキング装置に取り付け、真空引きを行いながら、高温バルブ、チューブ、リザーバーのそれぞれが 300 °C に保たれるようにシーズヒーターで加熱する。そして装置の真空計が $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa になるまでターボ分子ポンプで引いた後に、ヒーターを切りオープンを冷却する。

プラズマ生成室内に付着したセシウムを除去するときには水を使用するので、再度イオン源にセシウムを導入する時は、その前にイオン源のプラズマ生成室のベーキング処理を行う。このベーキングは、アーク放電パワー 1 kW、デューティー 0.1 % の水素プラズマを生成させ、フィラメントの輻射熱およびアーク放電電力によりプラズマ生成室を加熱する。ベーキングはプラズマ生成室の大気側表面温度が 80 °C 程度になるまで行う。

なお、図 2-12 に示すように、イオン源本体は chamber1 に取り付けられる。chamber1 にはビーム電流測定用のファラデーカップ、エミッタンスマニタおよび排気速度 2200 l/s のターボ分子ポンプ 1 台が組み込まれている。本実験では chamber2 は使用していない。

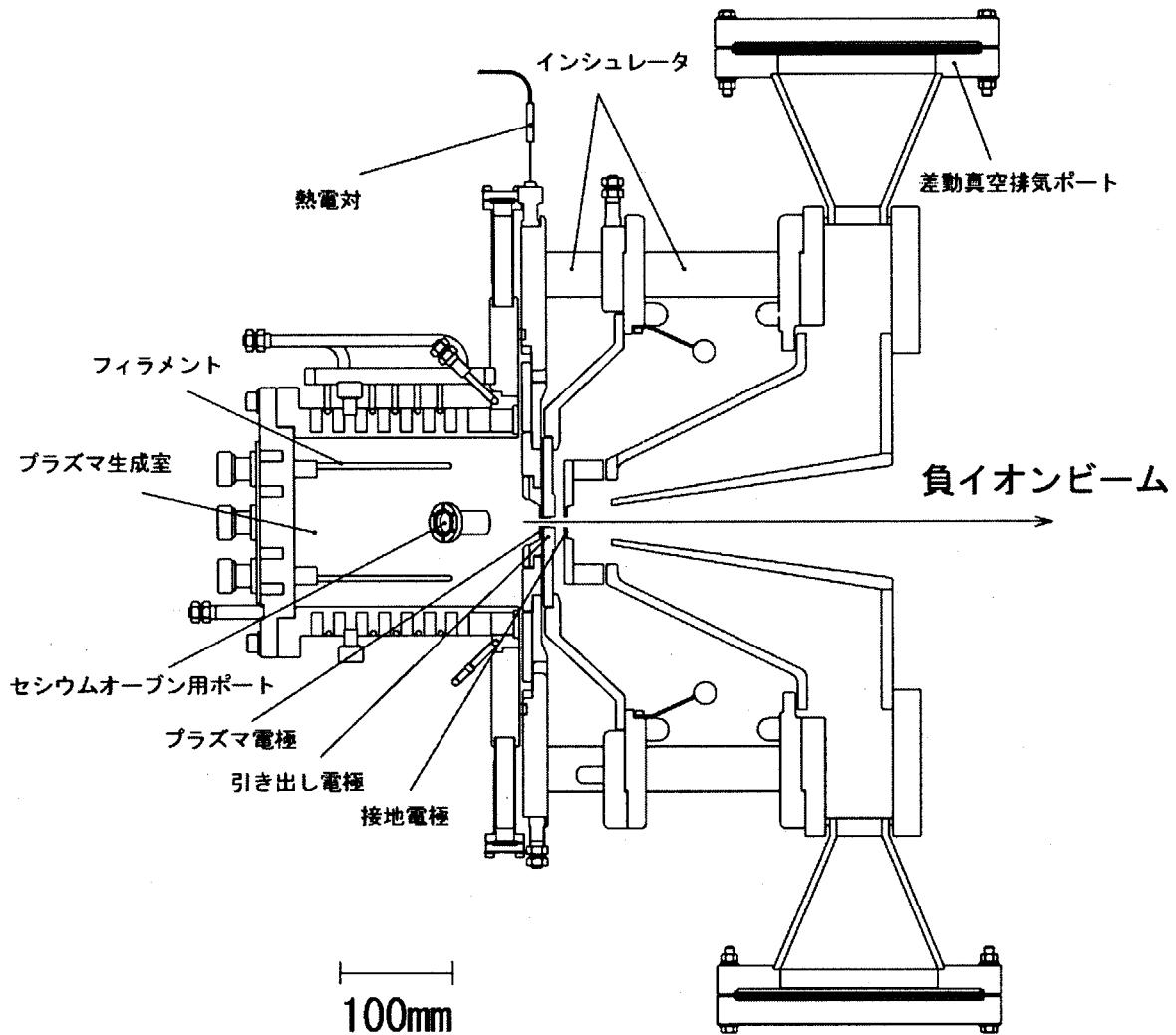


図 2-1 体積生成型負イオン源構造図

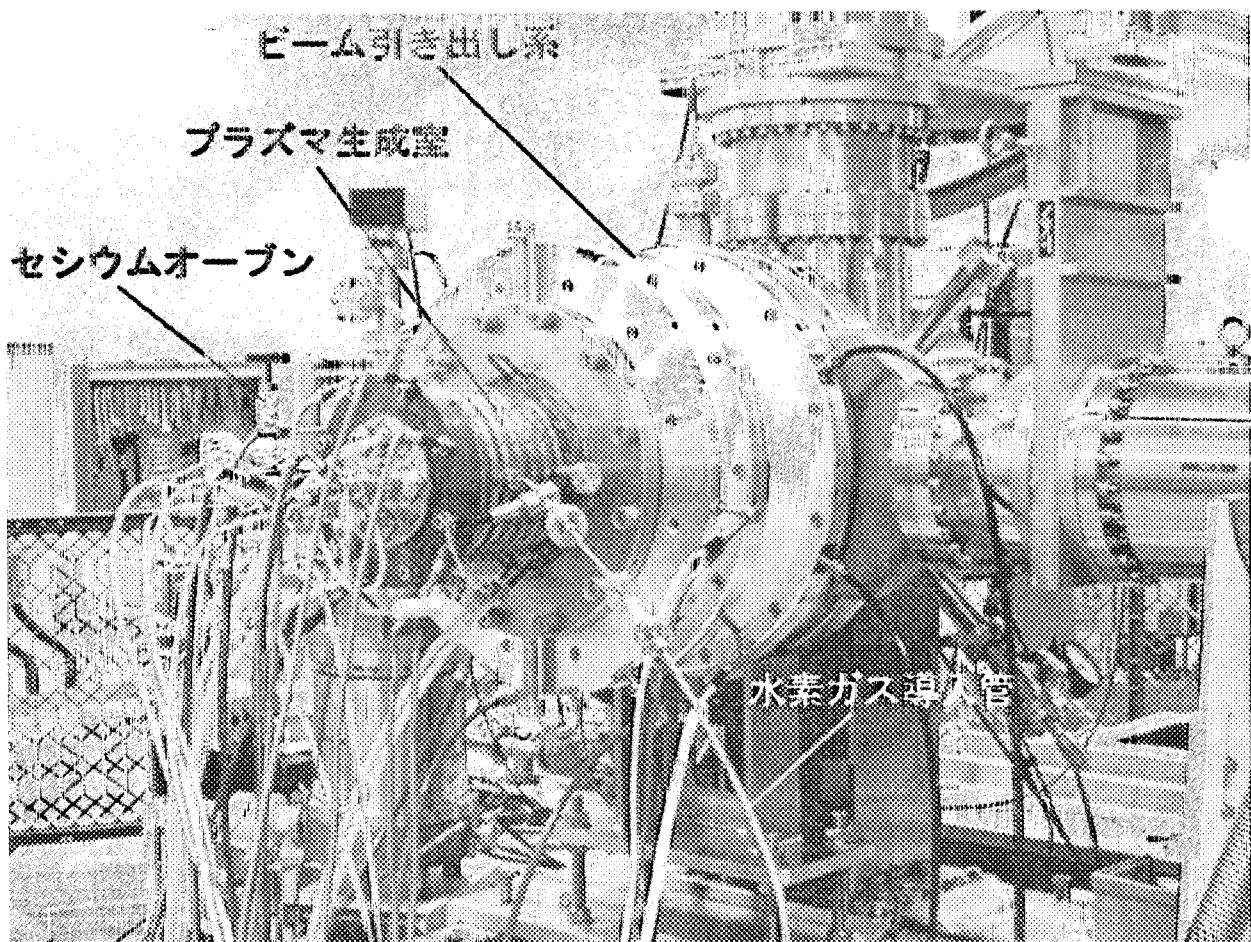


図 2-2 イオン源外観図

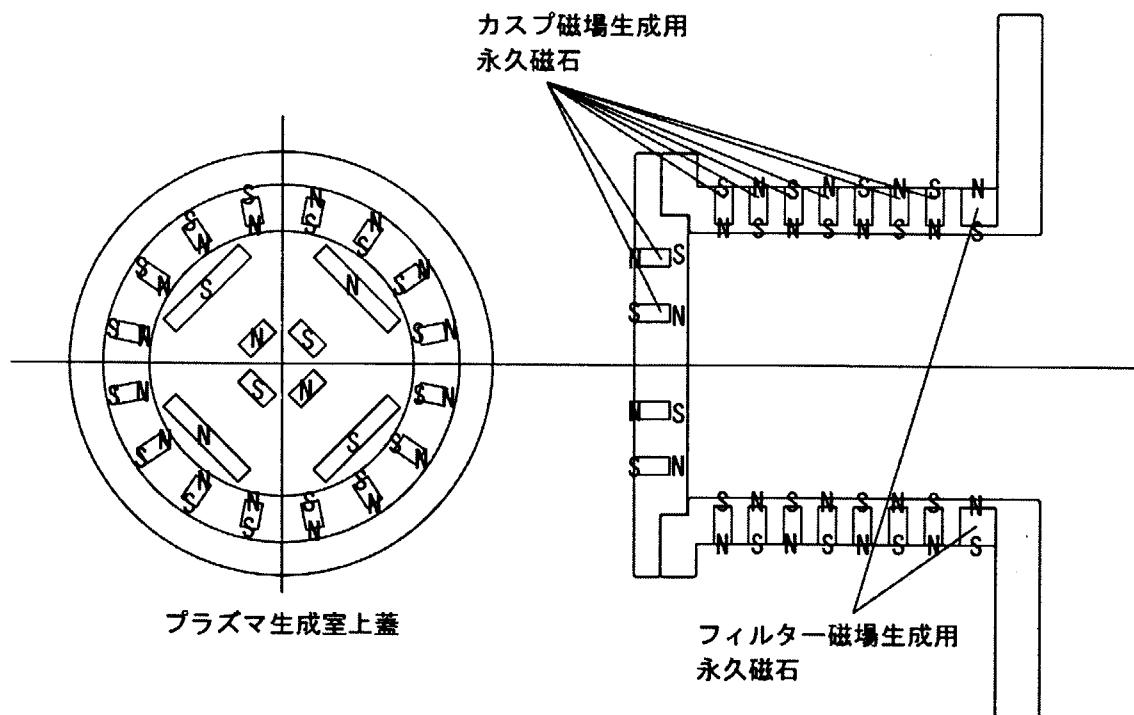
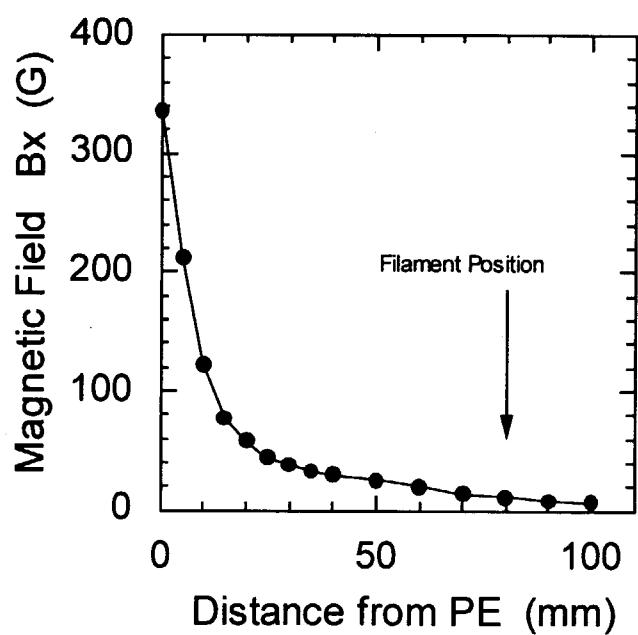


図 2-3 プラズマ生成室の永久磁石配置図

図 2-4 プラズマ生成室中心における磁気フィルター磁束密度分布
グラフ中の PE はプラズマ電極 (Plasma Electrode)

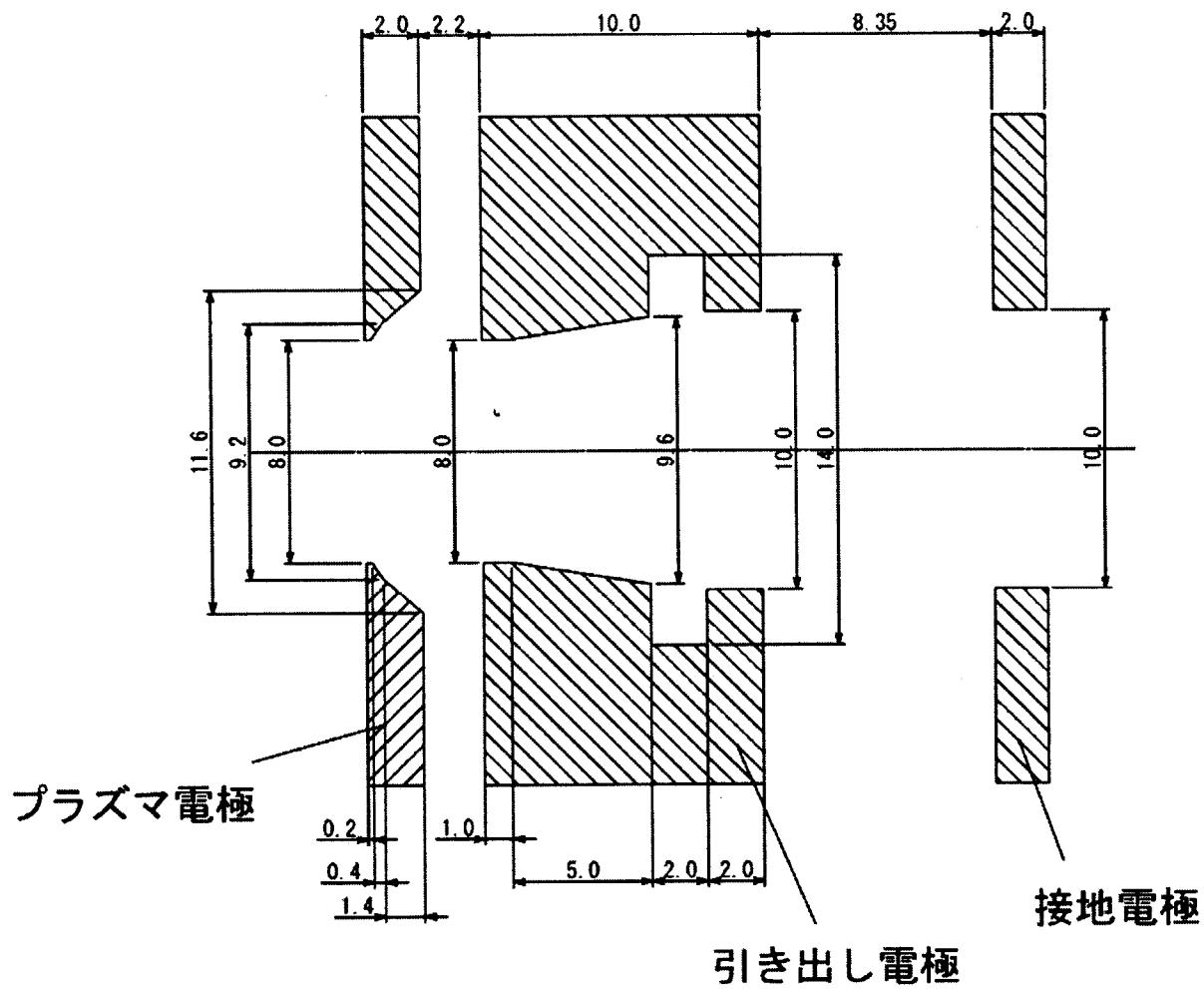
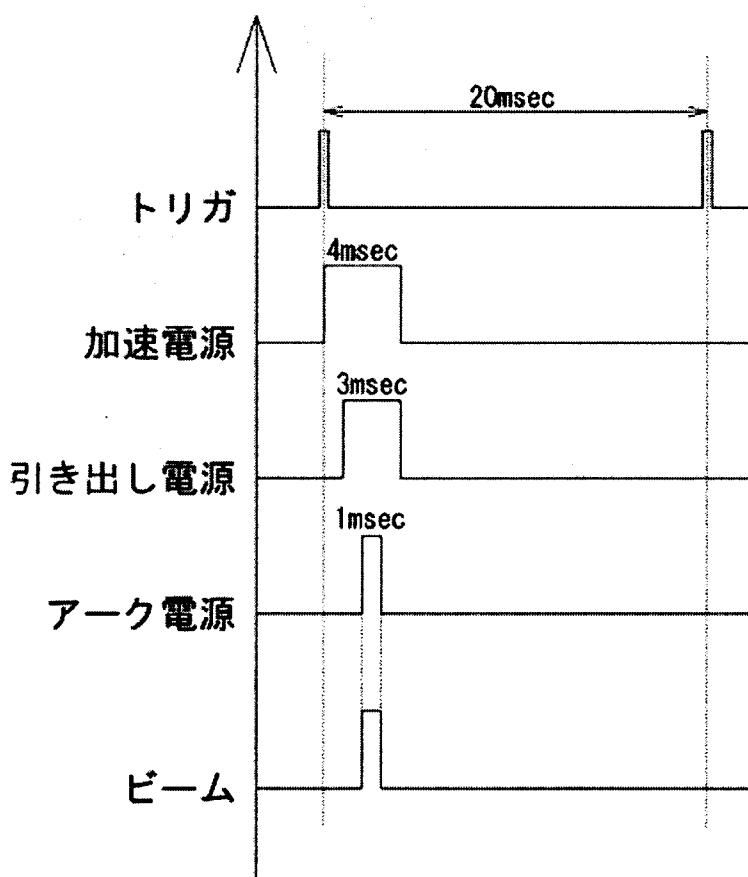
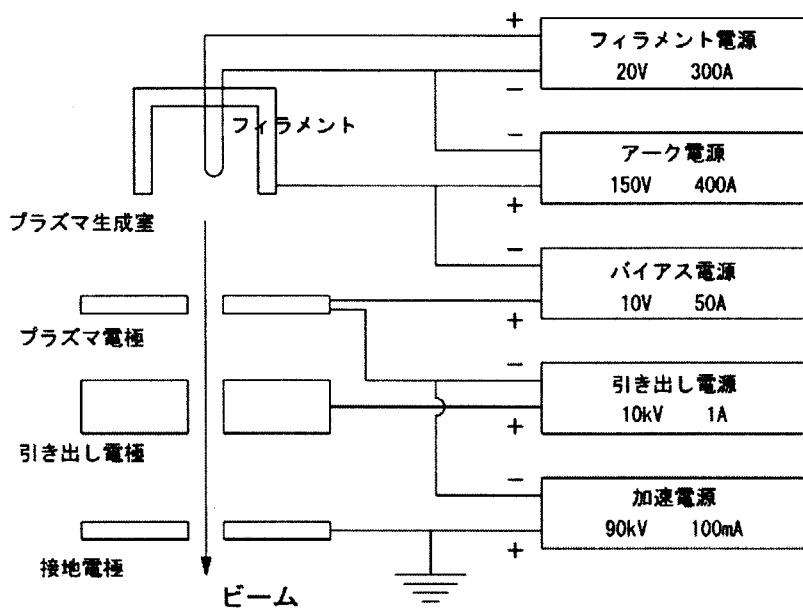


図 2-5 ビーム引き出し系の電極構造 (図中の単位は mm)



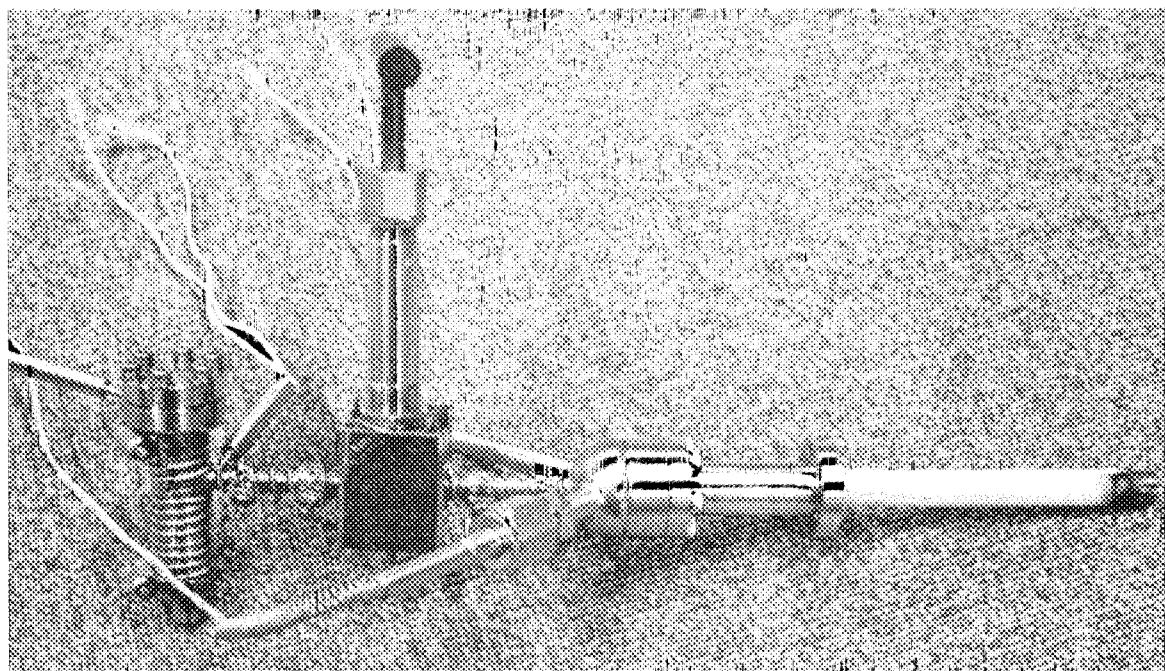


図 2-8 セシウムオーブン外観図

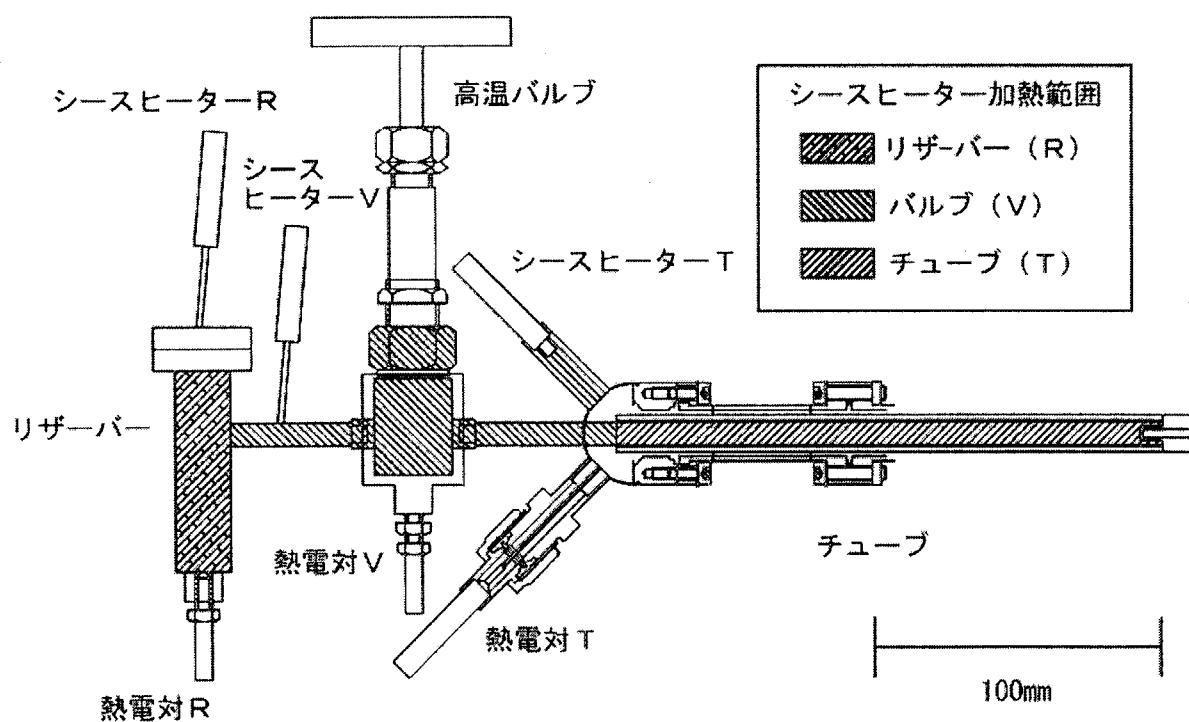


図 2-9 セシウムオーブン構造図

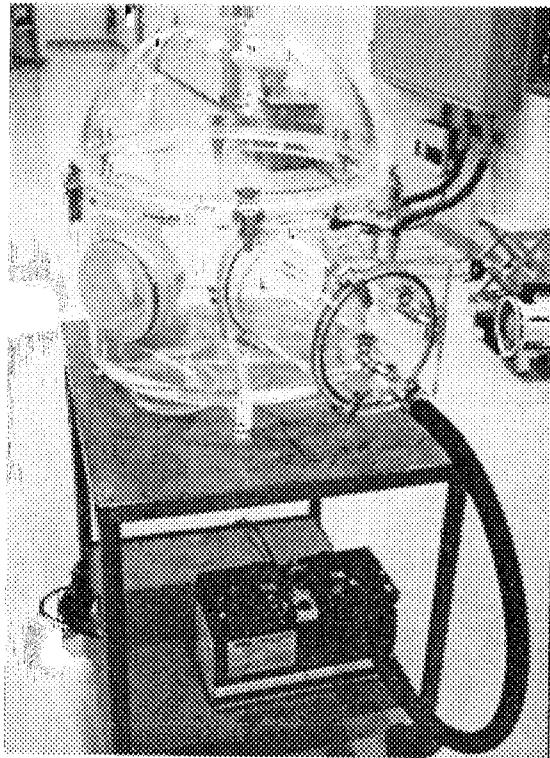


図 2-10 セシウム封入用グローブボックス

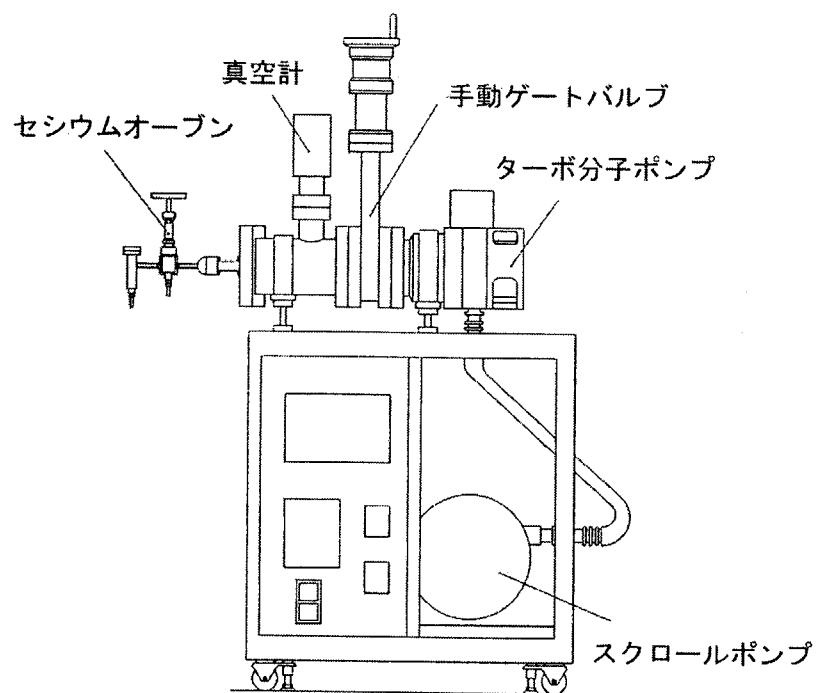


図 2-11 セシウムオーブンベーキング装置

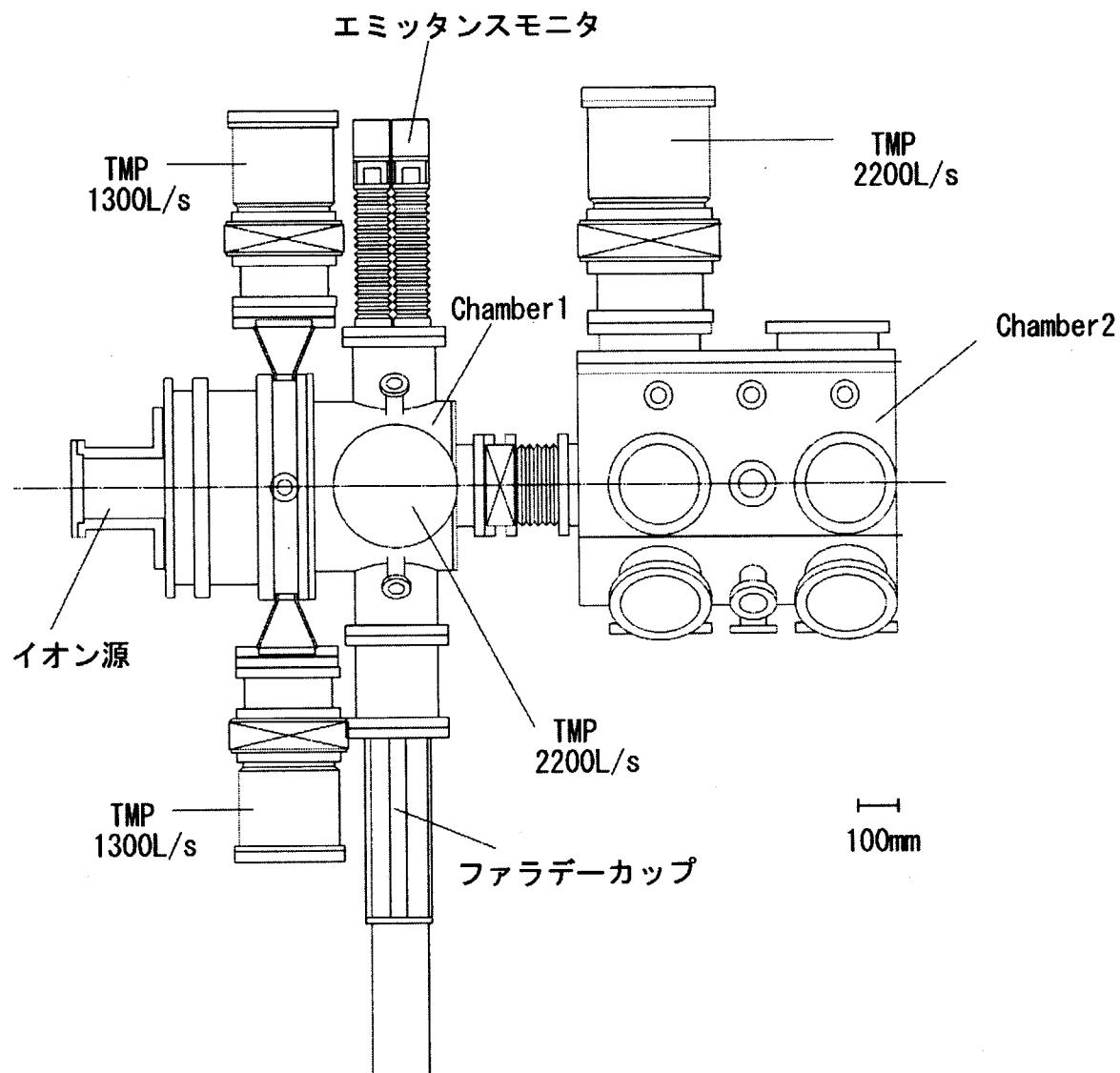


図 2-12 実験装置配置図

図中の TMP はターボ分子ポンプ (Turbo Molecular Pump) の略、付記した数値は排気速度

3. 実験結果と考察

3.1 ビーム電流

3.1.1 測定方法

本実験ではビーム電流測定器としてファラデーカップを使用した。図3・1にファラデーカップの実験配置図を示す。ファラデーカップはビーム測定容器(Chamber1)内を水平方向に300 mmのストローク幅をもって出し入れできる構造になっている。イオン源接地電極からファラデーカップまでの距離は約600 mmである。

ファラデーカップ詳細図を図3・2に示す。ビーム電流測定部であるカップ部は、内口径 ϕ 120 mm、深さ115.6 mmの無酸素銅製である。カップ部で生成された2次電子がファラデーカップ外に散逸するのを防ぐために、深さは内口径に対して長く取るのがビーム測定の面からは理想的であるが、ICF253 フランジの内径による制限があり、この構造で可能な限りの深さを確保するために底面が円錐状になっている。サプレッサー部は、内口径 ϕ 120 mm、厚さ20 mmの無酸素銅製であり、-500 Vの電圧を印加する。ビームシールド部は内口径 ϕ 120 mm、厚さ1.5 mmのモリブデン製であり、ここでビームハローの除去を行う。

負イオンビーム電流量測定にあたって注意しなくてはならないのは、負イオンと同時に引き出される電子も加算して、負イオンビーム電流量を過大評価してしまうことである。引き出し電極に組み込まれた磁石が発生する磁場によって電子の大部分が取り除かれるが、この抑制効果が十分でない場合には、電子の一部が負イオンと同等のエネルギーを得てイオン源の外に引き出される可能性がある。そこでファラデーカップに電子が流れ込んでいないことを確認するために、プラズマ生成室に導入するガスを水素ガスからヘリウムガスに替えて、ヘリウムプラズマ生成を行った。ヘリウムは水素とは異なり、通常負イオンは存在しない。よってヘリウムプラズマを生成した状態でイオン源に負の高電圧を印加しても、引き出されるのは電子だけである。つまりこの状態でファラデーカップに信号が出力されなければ、引き出し電極に組み込まれた電子抑制磁場が十分に機能してイオン源外に電子が引き出されていないことが確認できる。

ヘリウムプラズマ生成実験の結果を図3・3に示す。グラフの縦軸はファラデーカップ出力信号、横軸は引き出し電流量である。引き出し電流が200 mAの時のファラデーカップ出力信号は0.4 mA程度であり、引き出し電流の0.2%である。後述するが、セシウムを添加して負イオンビームを引き出した場合の引き出し電流量は50 mA以下なので、ファラデーカップに流れ込む電子量は0.1 mA程度と考えられ、これは負イオンビーム電流量に比べて無視できる量である。ここでの引き出し電流とはイオン源の引き出し電極に流れ込む電流のことと、本実験では電子電流に相当する。この実験によって、ファラデーカップ出力信号はすべて負イオンビーム電流であることが確認できた。

3.1.2 アーク放電パワー依存性

セシウム添加前 (Pure Volume) と添加後 (Cs Seeded) の負イオン電流と引き出し電流のアーカ放電パワー依存性を図 3・4 に示す。セシウム添加前の状態ではアーカ放電パワー 52 kW の時に負イオン電流は 14 mA であり、アーカ放電パワーに対して飽和傾向にある。しかしセシウム添加後の負イオン電流はアーカ放電パワーにほぼ比例して増加し、 56 kW で 72 mA に到達している。この電流値を電流密度に換算すると、ビーム引き出し孔の口径が $\phi 8\text{ mm}$ であるから 144 mA/cm^2 に相当する。

また引き出し電流が、セシウム添加により大幅に減少している。電子／負イオン比は、セシウム添加前は 21 (アーカ放電パワー 52 kW の時) であるのに対して、セシウム添加後は 0.6 (アーカ放電パワー 50 kW の時) である。引き出し電流が大きいと引き出し電極に多大な熱負荷がかかり電極が熱破損する恐れがあるので、大電流かつ高デューティーの運転を行う本実験装置にとって引き出し電流が減少することは好都合である。

3.1.3 フィルター磁場強度依存性

負イオン電流と引き出し電流のフィルター磁場強度依存性を調べた。この実験ではアーカ放電パワーを 30 kW に固定し、磁気フィルター強度は永久磁石の個数を変えて図 3・5 のように 7 種類の磁束密度分布を作つて変化させた。測定結果を図 3・6 に示す。

フィルター磁場を強くしていくと、ある程度までは負イオン電流が上昇傾向にある。これは、プラズマ生成室の低温電子領域の電子温度が下がってきて、負イオンの損失が減ることに起因する^[3]。しかしフィルター磁場を強くしすぎると、低温電子領域におけるプラズマ密度が低下し、電子も減少するために負イオン電流は減少する^[3]。本イオン源では、負イオン電流値が最大となるフィルター磁場は $400\sim 500\text{ Gauss}\cdot\text{cm}^*$ であることがわかった。

3.1.4 バイアス電圧依存性

本実験装置ではプラズマ電極とプラズマ生成室間に、正または負にバイアス電圧を印加できるよう設計されている。図 3・7 にアーカ放電パワー 30 kW 、 50 kW の時の負イオン電流および引き出し電流のバイアス電圧依存性を示す。左のグラフがセシウム未添加時で、右のグラフがセシウム添加時のグラフである。ただし、グラフ中のバイアス電圧の極性はプラズマ電極がプラズマ生成室に対して正の時にプラス、負の時にマイナスとした。

バイアス電圧を大きく変化させても、負イオン電流の変化量はそれほど大きくない。しかし、引き出し電流は正にバイアス電圧を印加すると減少する。これは次のような理由だと考えられる。図 3・8 に示すように、一般的にプラズマがプラズマ生成室に閉じ込められている時、プラズマ内の電子及びイオンの熱速度の差により生成室壁には電子が多く飛び込むため、プラズマは生成室

* プラズマ生成室中心の磁束密度をビーム軸方向にプラズマ電極表面からフィラメントの先端までの距離で積分した値

に対して正の電位を持つ ($V_{PL} > V_A$)。プラズマと生成室の極性の関係と合わせて考えると、バイアス電圧が十分プラス ($V_{PE} \gg V_A$) の時は、プラズマ電極はプラズマに対して正の電位 ($V_{PE} > V_{PL}$) となる。この時はプラズマ中の電子はプラズマ電極に引き寄せられ吸収されるので、引き出し電流は急激に減少することになる。逆にバイアス電圧がマイナス ($V_{PE} < V_A$) の時は、プラズマ電極はプラズマに対して負の電位 ($V_{PE} < V_{PL}$) となり、プラズマ中の電子はプラズマ電極によって反射され、ビーム引き出し孔付近の電子密度が上昇し、引き出し電流が増加する。前述したように、引き出し電流が減少することは大電流イオン源にとって好都合だが、その目的でバイアス電圧を正バイアスしすぎると負イオン電流値も減少してしまうので、負イオン電流と電子電流の許容値から適当な値に調整する必要がある。

3.2 パルスビーム電流波形

図 3-9 に負イオンビーム 72 mA、パルス長 1.0 msec のビーム電流波形（上）とその時のアーク電流波形（下）を示す。横軸は時間軸で 0.2 ms/div である。1.0 msec のパルス長ビームにおけるビームの立ち上がり時間は約 200 μsec、立ち下がり時間は約 100 μsec である。

加速器において、パルス幅でのビーム波形の平坦度は重要なファクターとなる。なぜなら加速器では収束電磁石などビーム電流値に依存するパラメータが存在し、ビームの平坦度が悪くパルス内でビーム電流が変化すると、マッチングの取れないビームが加速器を通過し、加速器内でビームロスを引き起こす恐れがあるからである。

3 種類のガス流量に対するビーム電流およびアーク電流波形の典型例を図 3-10 に示す。ガス流量にはビームがフラットになる最適値が存在し、最適値より少ない流量ではビーム波形が時間とともに減少し、逆に多い流量では増加する。一方、アーク電流波形はガス流量に対し若干変化するが、ビーム電流波形に比べると小さい。

ビーム電流波形が 1.0 msec のマクロパルス時間内で変化する理由は、アーク放電開始直後にプラズマ生成室金属表面に水素原子が吸着するため、生成室内のガス圧が一時的に下がることが原因と考えられる。図 3-11 にビームパルス内のある時間に着目したときのガス流量に対するビーム電流値の変化の様子を示す。負イオン電流が最大となるガス流量が存在するのは、生成室内の圧力が変化することで負イオン生成に主要な役割を果たす低速電子と、負イオンを消滅させる水素原子および水素分子の量が変化するためである。パルス内のビーム波形の変化は、図 3-11 の現象がマクロパルス時間内に起きるために生じると考えられる。図 3-11 を使って説明すると、ガス流量の少ない時はガス圧がマクロパルス時間内で図 3-11 の B から A の方向へ変化するためビーム電流が減少する。逆にガス流量が多いときは、ガス圧は C から B の方向に変化するのでビーム電流は増加する。そして最適なガス流量では、ガス圧は B 近傍で変化することになるので、電流変化が少なくフラットな状態が保たれる。

このように、ガス流量には良好なビーム波形が得られる最適値が存在するが、この値がメンテナンスなどでイオン源を大気開放した前後やアーク放電パワーやデューティーなどのイオシ源運転条件によって異なることも観測されている。今後さらに詳細な実験を行い、ビーム波形の変化について調べる予定である。

3.3 エミッターンス

エミッターンス測定器の概念図を図 3-12 に示す。本測定器はダブルスリット型スキャナーと呼ばれ、第 2 スリットを第 1 スリットの周りで動かしながら 2 枚のスリットを通過したビームをファラデーカップで測定することにより、第 1 スリットの位置 y におけるビーム発散角を測定することができる。この操作をいくつかの y 点で繰り返せば、第 1 スリットにおけるエミッターンス図形を測定することができる。

図 3-13 にエミッターンスマニタの測定配置を示す。エミッターンスマニタはビーム測定容器 (chamber1) に設置され、2 枚のスリット間距離は 100 mm、スリット寸法は図 3-11 で示したように両者とも 0.1×90 mm となっている。取り付け位置は、イオン源の接地電極から約 600 mm 下流である。スリットブロック部は $138 \times 114 \times 40$ mm の無酸素銅製である。なお、本実験装置の場合、測定開始から測定終了までに少なくとも 30 分以上は必要となる。そのため正確にエミッターンスを測定するためにはビーム電流量を安定させることが重要となり、エミッターンス測定時に限りセシウムの連続注入を行った。また、chamber1 にエミッターンスマニタの取り付けフランジが 1 つしかないため両方向のエミッターンスを測定するためには一旦イオン源を chamber1 から外し、イオン源本体を 90 度回転させる必要がある。この作業のためにイオン源は一度大気開放されるので、両方向のエミッターンス測定を完全な同条件で行うことができない。

電子抑制磁場と垂直方向のエミッターンスを図 3-14 に、電子抑制磁場と平行方向のエミッターンスを図 3-15 にそれぞれ示す。測定時のビーム条件は、ビームエネルギー 70 keV、ビーム電流 60 mA、パルス長 1.0 msec である。なお、測定のタイミングはパルス開始 0.8 msec 後である。

各方向の規格化 RMS エミッターンスは、電子抑制磁場と垂直方向が $0.13 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、平行方向が $0.15 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ であった。RFQ の RMS アクセプタンスの大きさは $0.2 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 程度であるので、これらの値は要求性能を十分に満足している。

電子抑制磁場に対して平行方向のエミッターンスが垂直方向に比べて悪いのは、2 つの理由が考えられる。まず 1 つは、ビームも電子抑制磁場の影響を受けて、除去される電子と同じ方向にビームが少し偏向するためである。もう 1 つの理由は、本測定時は平行方向測定時の方が垂直方向測定時に比べて最適ガス流量が少なくイオン源下流の真空度が高かったため、残留ガスによる空間電荷発散中和効果が小さくなり、平行方向のビームサイズが大きくなつたと考えられる。

3.4 フィラメント寿命

イオン源の保守の周期を決める最大の要因としてフィラメントの寿命が挙げられる。そこで今回、フィラメントの形状と寿命との関係について検討を行った。

本実験では、フィラメントの寿命のみに着目するため、ビームの引き出しは行わずアーク放電のみを点火した（セシウムは連続注入）。アーク電圧は一定とし、時間の経過とともにフィラメントが細くなりアーク電流が減少するが、アーク放電パワーが一定になるようにフィラメント電圧

を手動で動かし、アーク電流を一定に保った。1日で8時間程度の運転を行い、2本のうち片方のフィラメントが切れた時点の総運転時間をフィラメント寿命時間とした。なお、フィラメント電源は完全連続運転で、アーク電源はデューティー3%（ビームパルス幅：0.6 msec、繰り返し率：50 Hz）のパルス運転である。

実験で用いたフィラメントの形状を図3-16に示す。フィラメントは直径1.5 mm、長さ130 mmのヘアピン型で、材質はタングステンである。この形状はフィラメント電流の作る磁場が、電流が+端から一端に流れる間に打ち消し合うので、フィラメントから電子が放出しやすいという特徴をもつ。フィラメント導入端子の外観図を図3-17に示す。この端子は同軸形状であるので、プラズマ生成室の上蓋を外さずにフィラメント交換が行うことができ、メンテナンス性に優れている。

片方のフィラメントが断線した時点でのフィラメントの太さをマイクロメータで計測し、フィラメントの消耗の状態を調べた。その結果の典型例を図3-18に示す。グラフの横軸の符号は、フィラメント電源のプラス端と接続した方をプラス、マイナス端と接続した方をマイナスとした。

図が示すとおりマイナス側が著しく消耗している。アーク放電中の2本のフィラメントのプラス側、マイナス側に流れる電流をそれぞれ測定すると図3-19のようになり、アーク放電パワーの増加とともにプラス側の電流は減少し、逆にマイナス側は増加する。これは、アーク電流がフィラメントに流れ込む際に、プラス側の方はフィラメント電流を打ち消す方向に流れるのに対し、マイナス側は重畠する方向に流れることに起因する。

そこで、フィラメントのプラス側の表面積を小さくして少量の電流でも有効に電子放出が行われるように、グラインダーでプラス側を削り、プラス側だけが細いフィラメントを作り、同条件（アーク放電パワー30 kW、デューティー3%）で寿命測定を行った。その結果を表3-1に示す。

表3-1 正負異寸法のフィラメントの寿命時間

+側の直径	-側の直径	アーク放電パワー	デューティー	寿命時間	断線箇所
φ1.0 mm	φ1.5 mm	30 kW	3%	1 h 43 min	+側
φ1.1 mm	φ1.5 mm	30 kW	3%	5 h 37 min	+側
φ1.3 mm	φ1.5 mm	30 kW	3%	43 h 05 min	+側
φ1.4 mm	φ1.5 mm	30 kW	3%	119 h 00 min	±0付近
φ1.5 mm	φ1.5 mm	30 kW	3%	63 h 05 min	-側

119時間の最長寿命が得られたφ1.4 mm（プラス）- φ1.5 mm（マイナス）時のフィラメントの消耗状態を図3-20に示す。この時は図3-18のような消耗に偏りが無くプラス側とマイナス側でほぼ同等の消耗量となっており、フィラメントのプラス側を若干細くすることが寿命向上に寄与することが分かった。

正負異寸法のフィラメントは、JT60用正イオン源でも実際に用いられている^[4]。

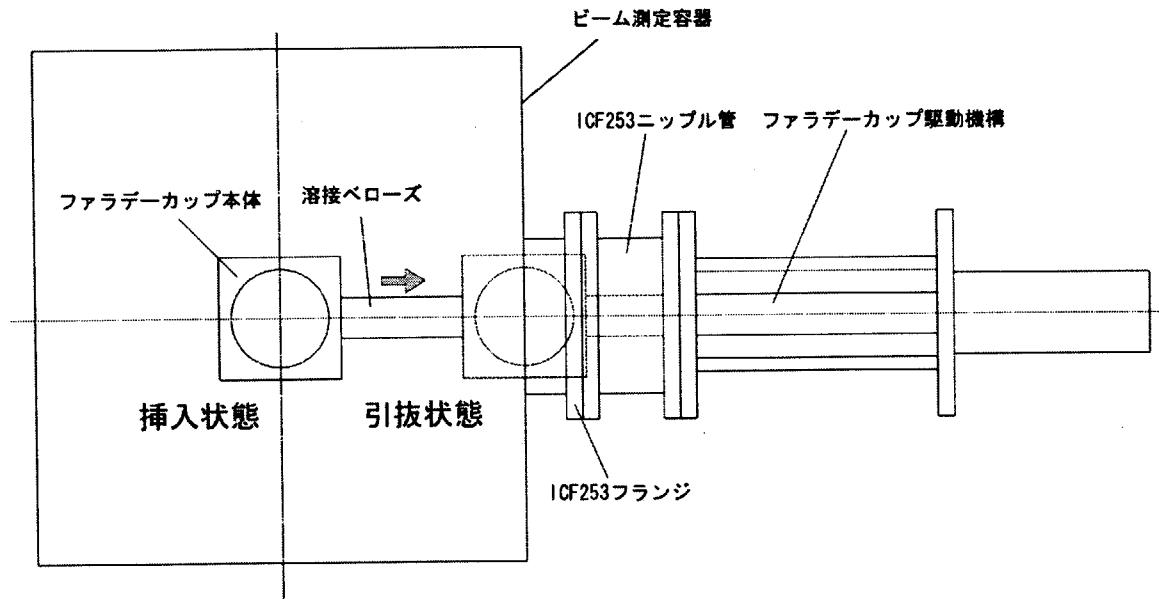


図 3-1 ファラデーカップ実験配置図

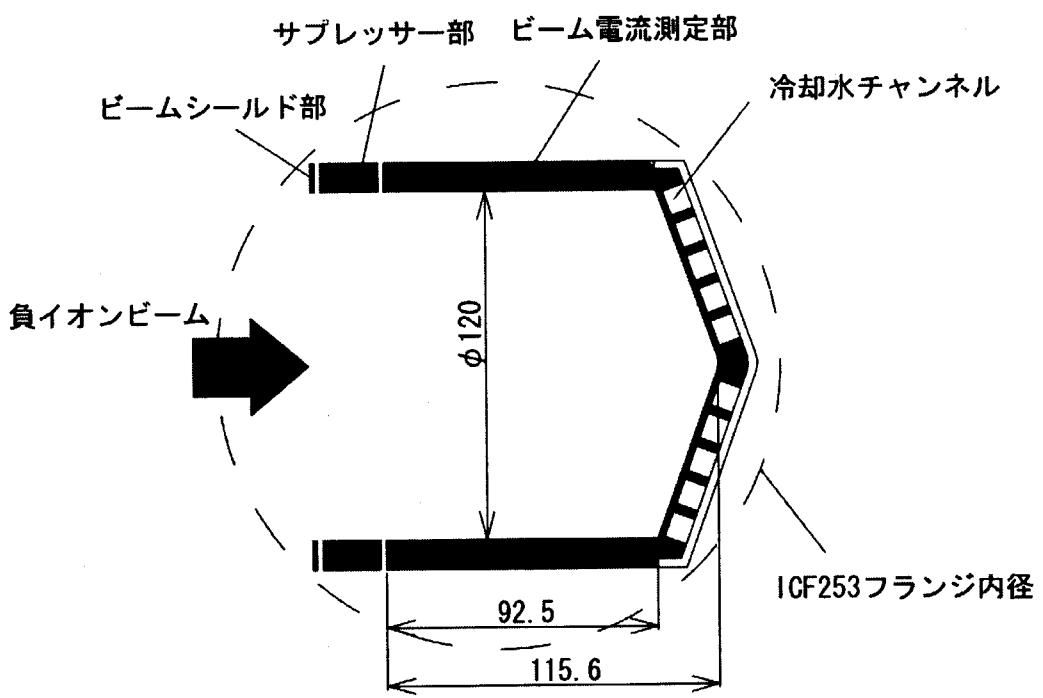


図 3-2 ファラデーカップ詳細図 (図中の単位は mm)

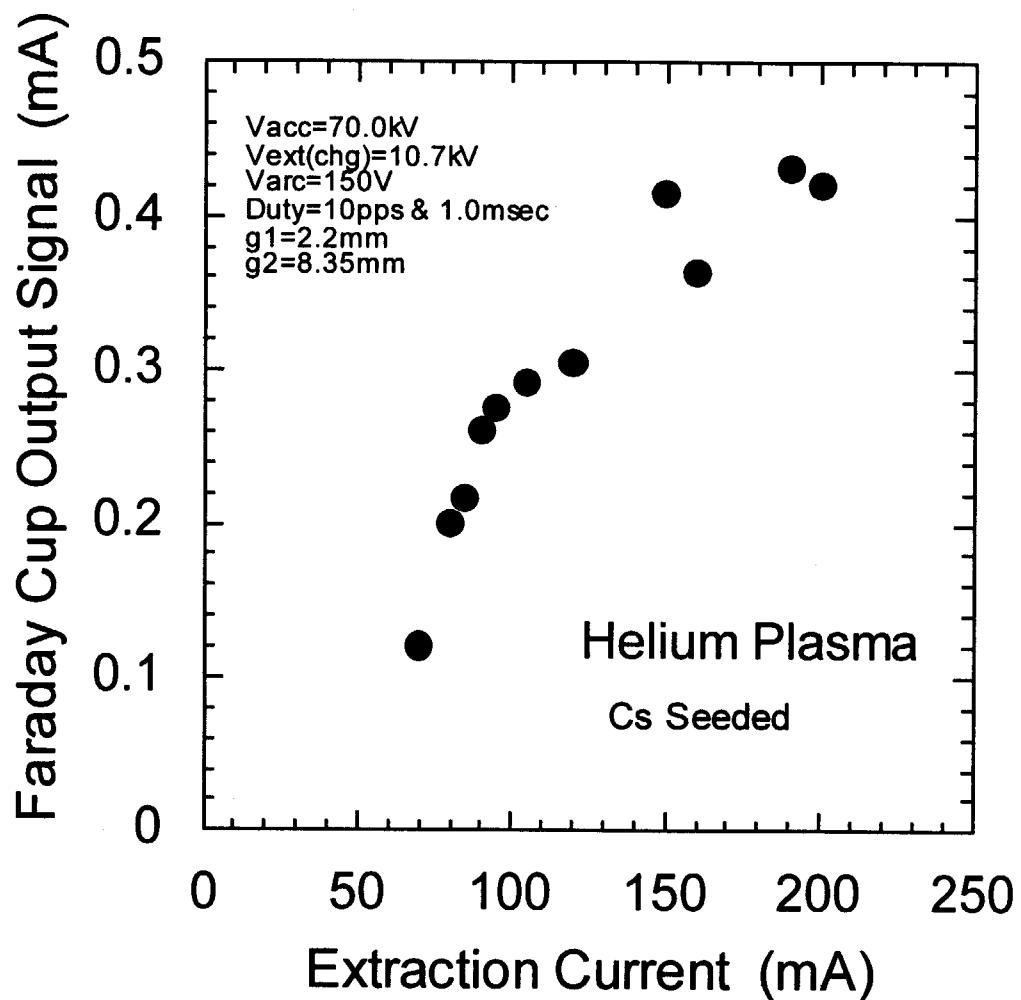


図 3-3 ヘリウムプラズマ生成実験結果

g_1 はプラズマ－引き出し電極間距離、 g_2 は引き出し－接地電極間距離

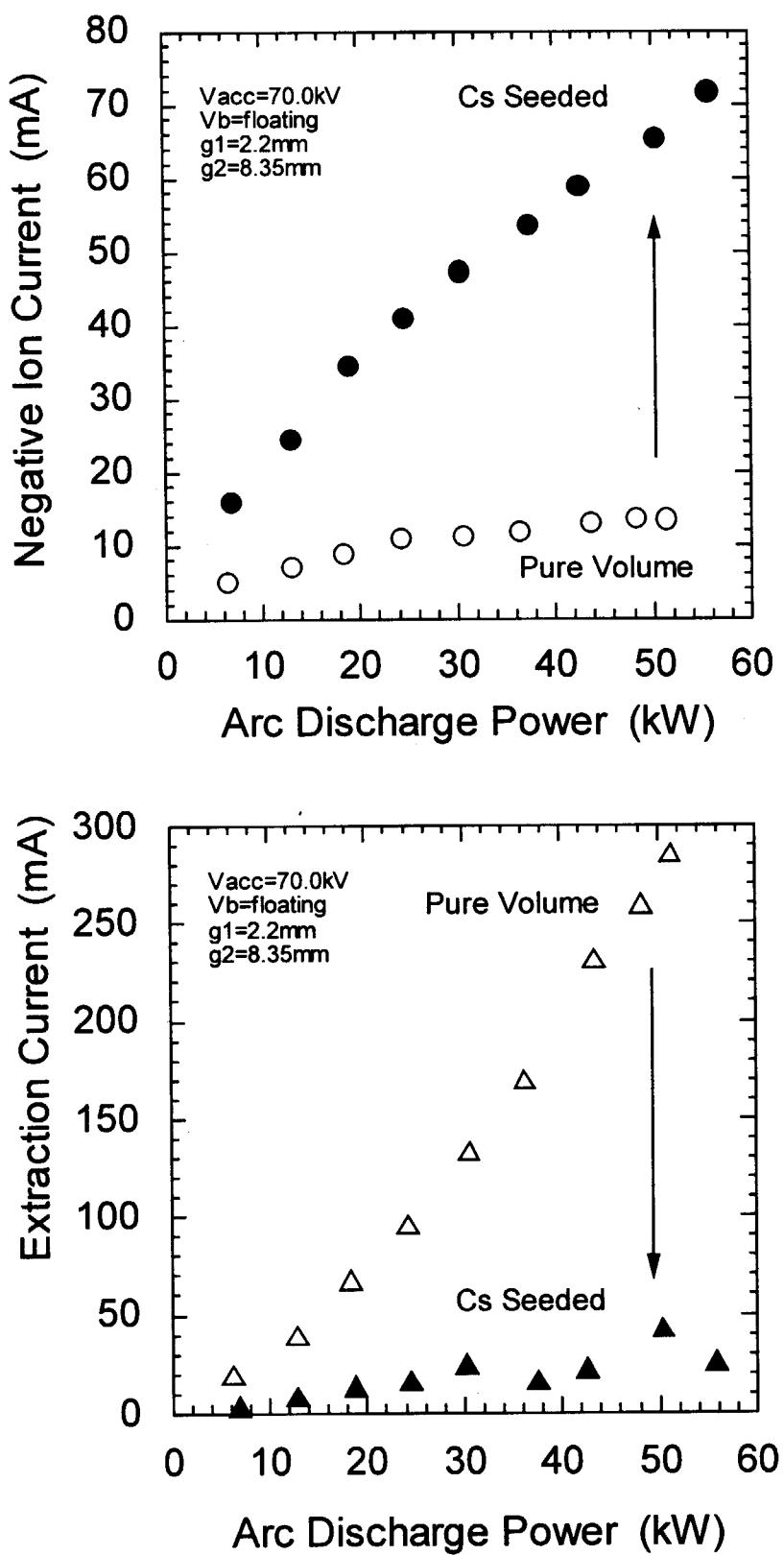


図 3-4 負イオン電流（上）と引き出し電流（下）のアーク放電パワー依存性

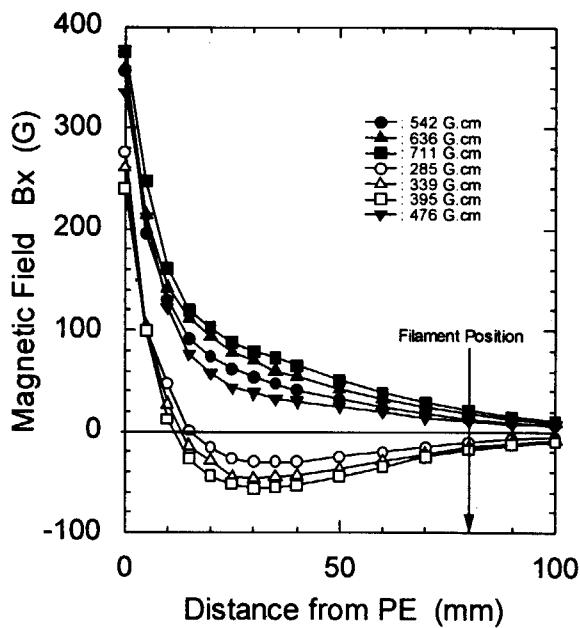


図 3-5 磁気フィルター磁束密度分布

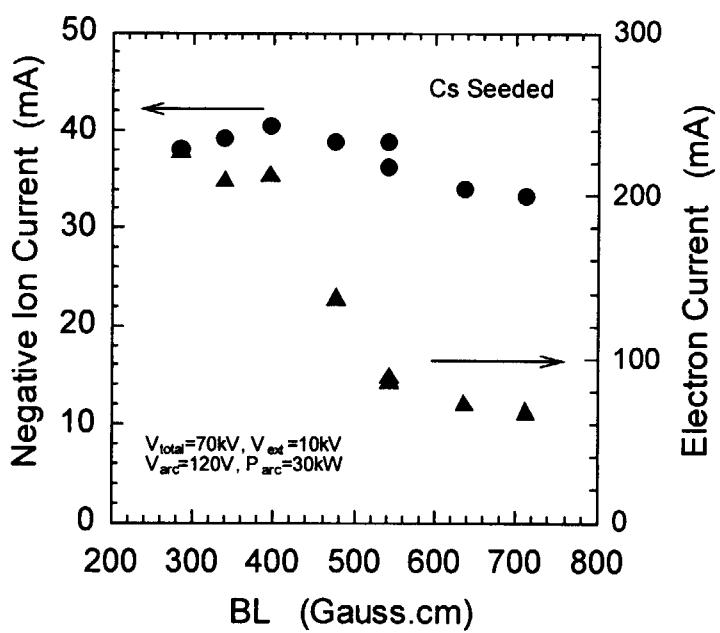


図 3-6 負イオン電流と引き出し電流のフィルター磁場依存性

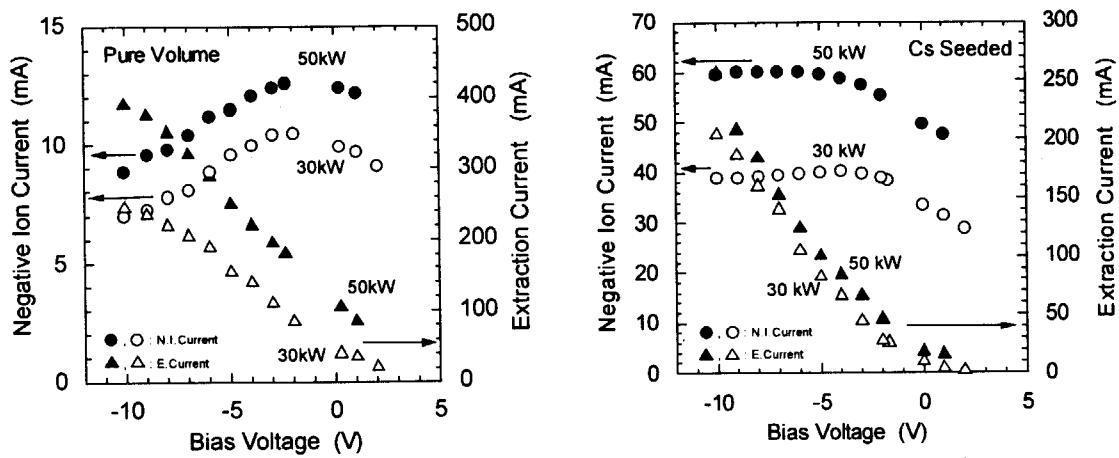
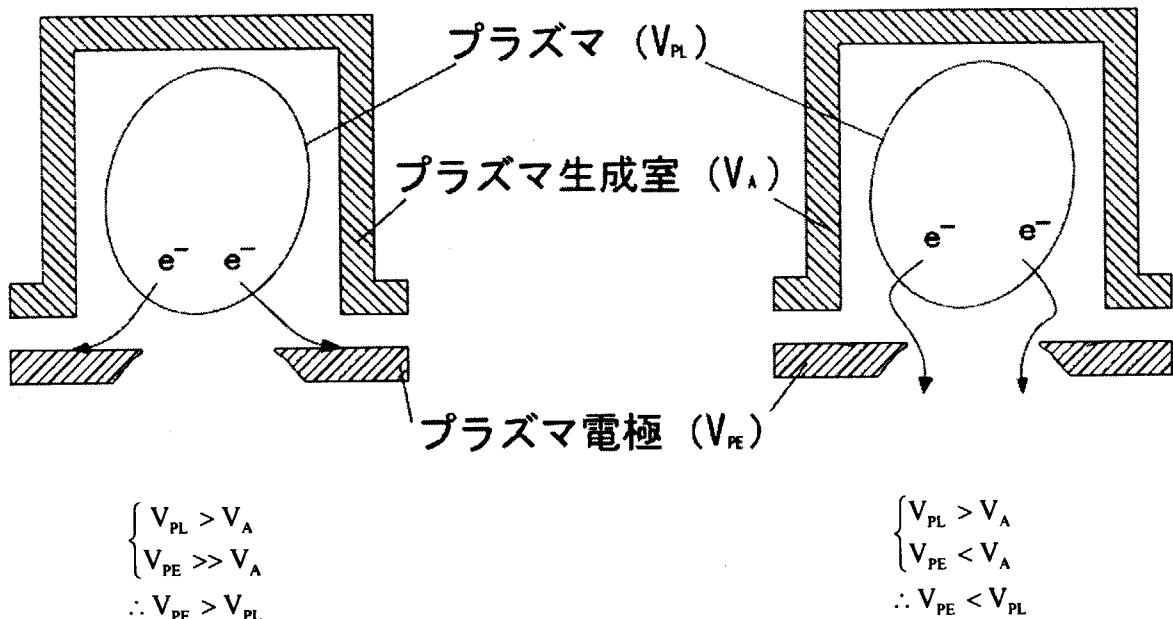


図 3-7 バイアス電圧と負イオン電流、引き出し電流の関係
(左: セシウム無、右: セシウム添加)



(a) バイアス電圧プラス時

(b) バイアス電圧マイナス時

図 3-8 バイアス電圧印加時の極性の関係

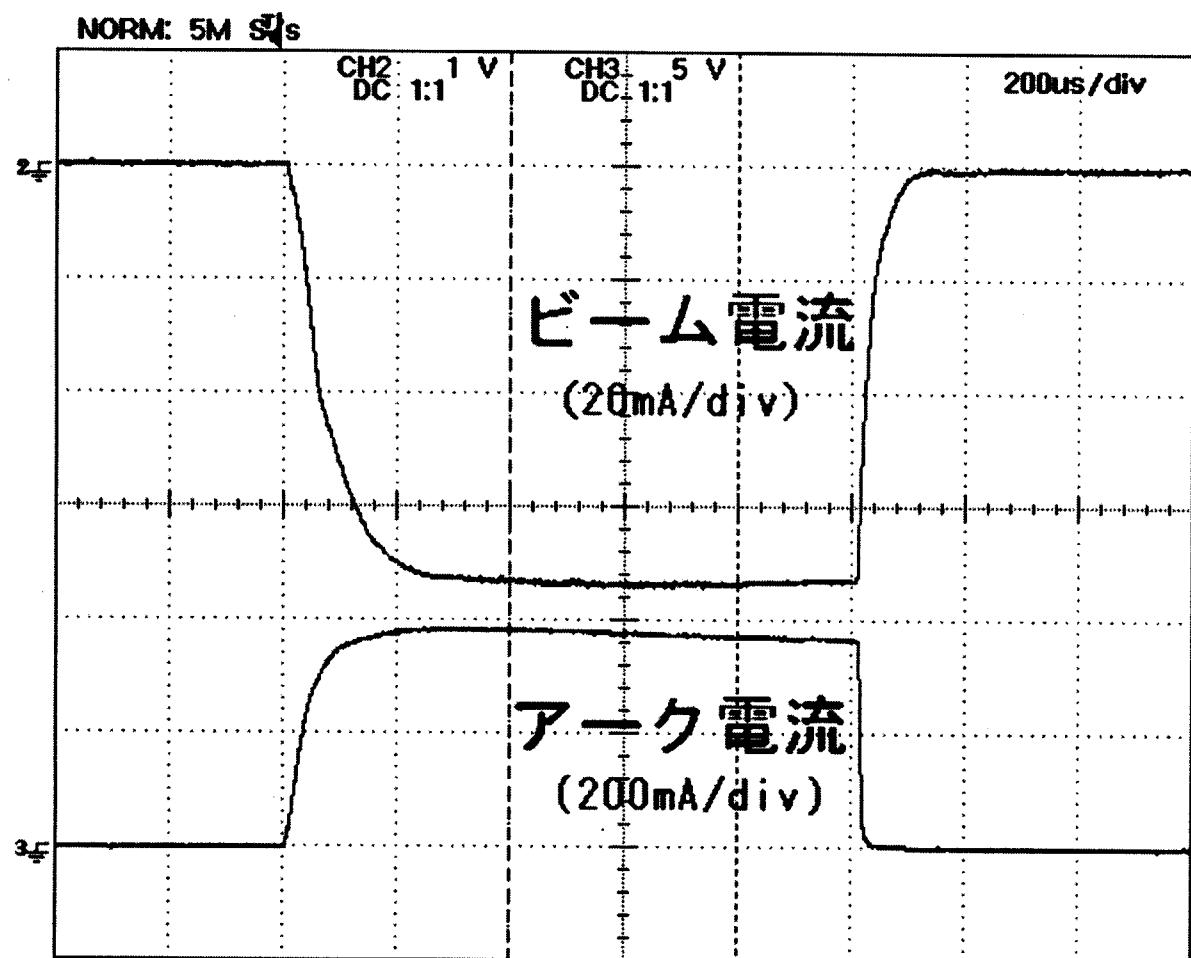


図 3-9 負イオン電流およびアーク電流波形

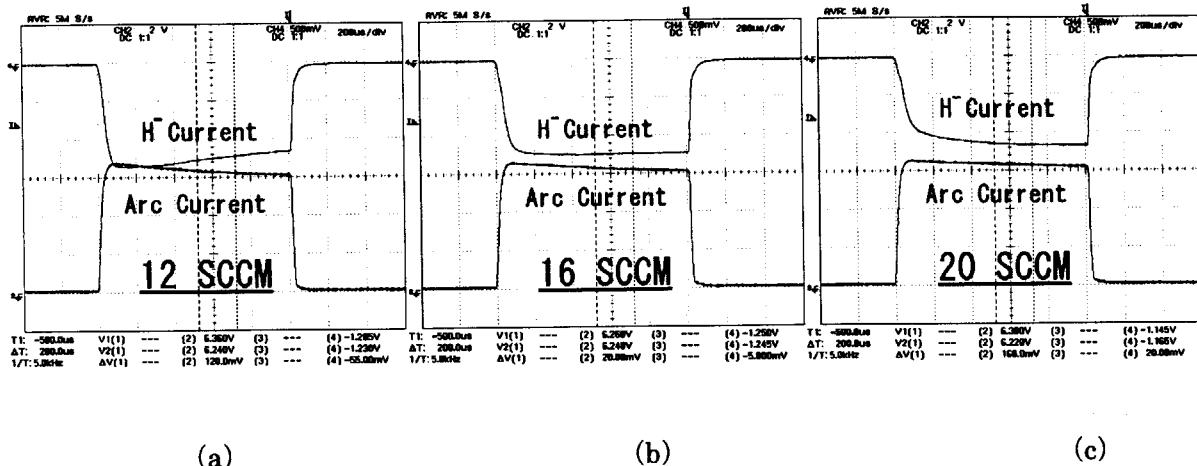


図 3-10 典型的なビーム波形のガス流量依存性
(アーク放電パワー30 kW 時)

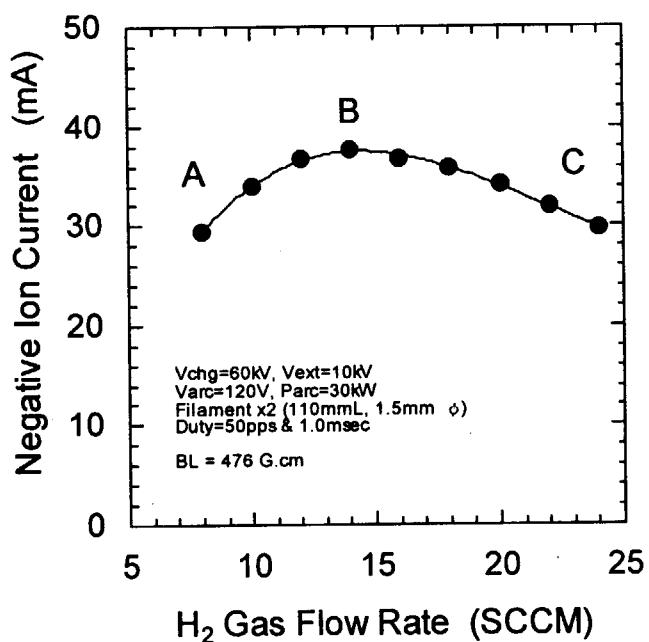


図 3-11 ガス流量と負イオン電流の関係

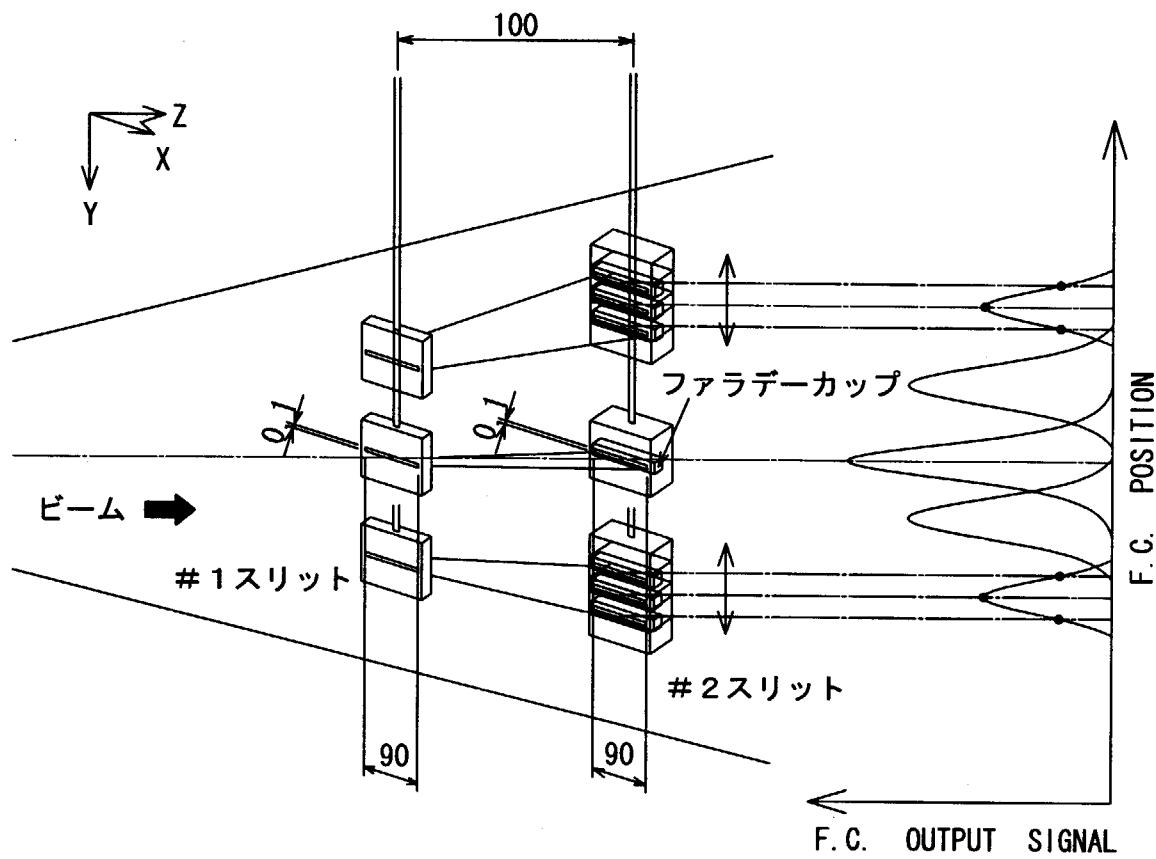


図 3-12 エミッタンスマニタ原理図

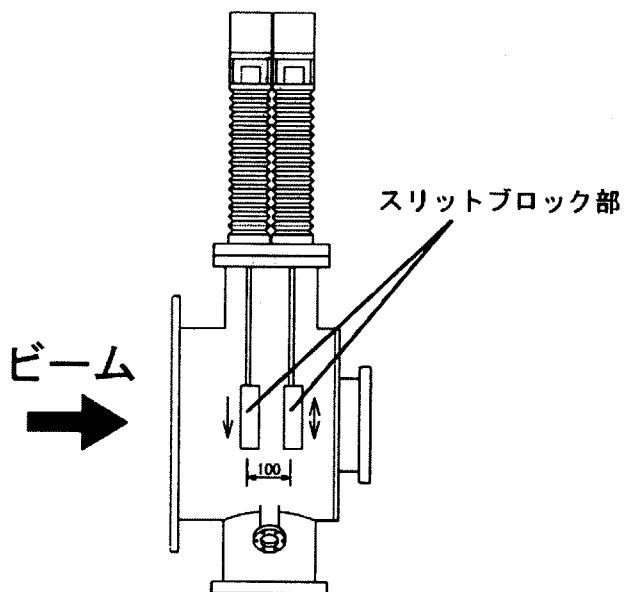


図 3-13 エミッタンスマニタ測定配置

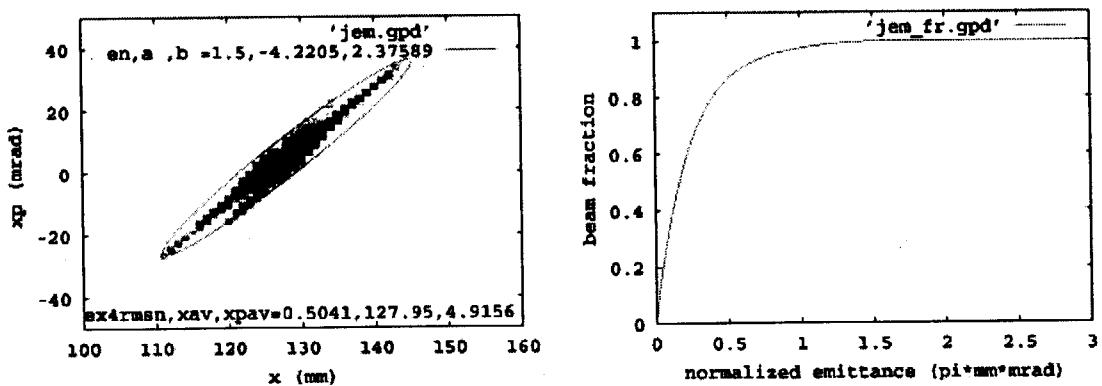


図 3-14 エミッターンス測定結果（電子抑制磁場と垂直方向）

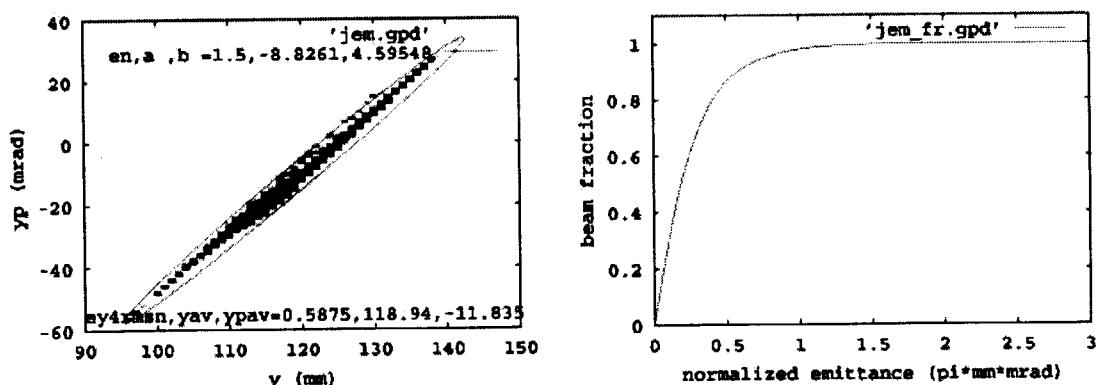


図 3-15 エミッターンス測定結果（電子抑制磁場と平行方向）

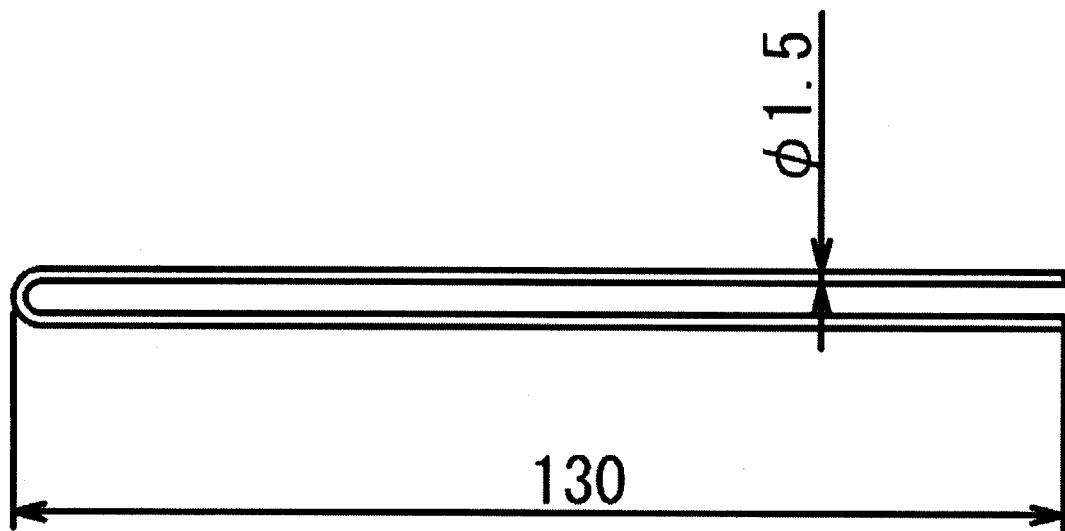


図 3-16 フィラメントの形状

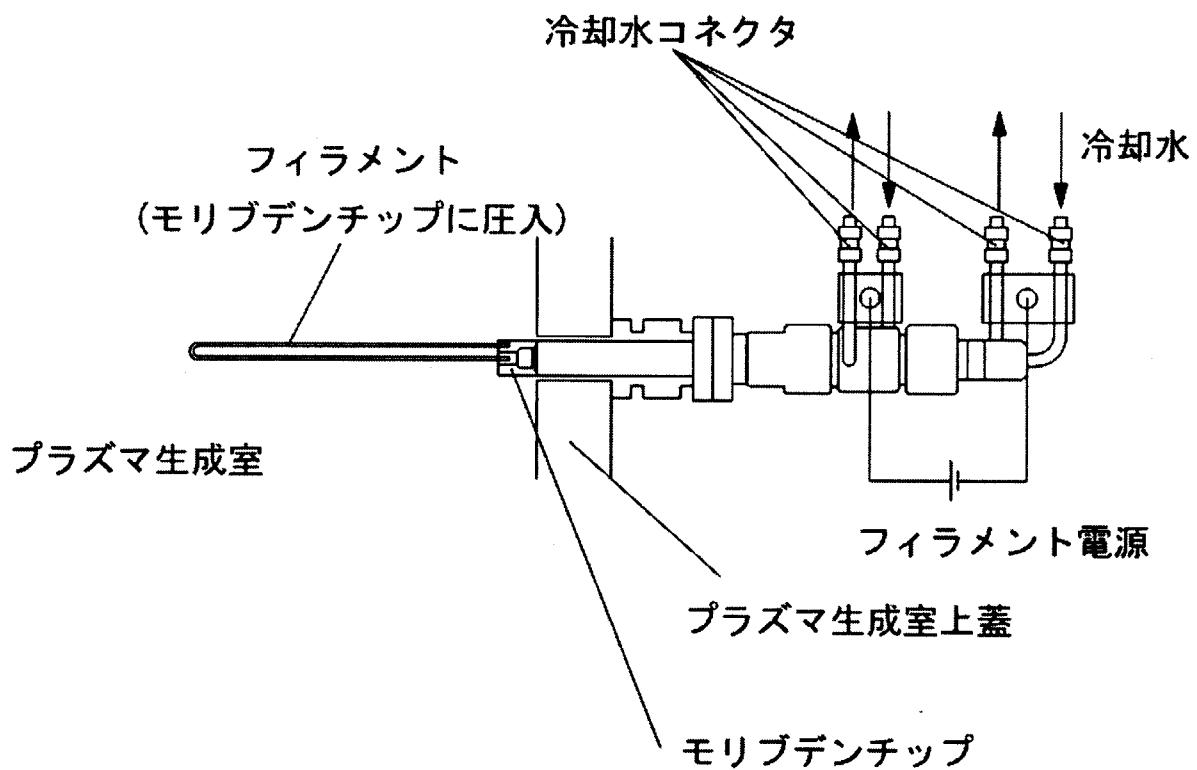


図 3-17 フィラメント導入端子構造図

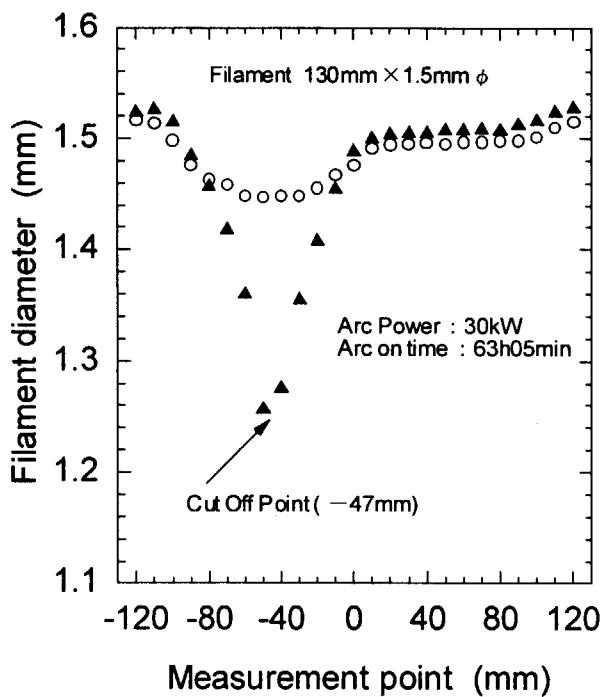


図 3-18 フィラメント寿命測定後のフィラメント径測定

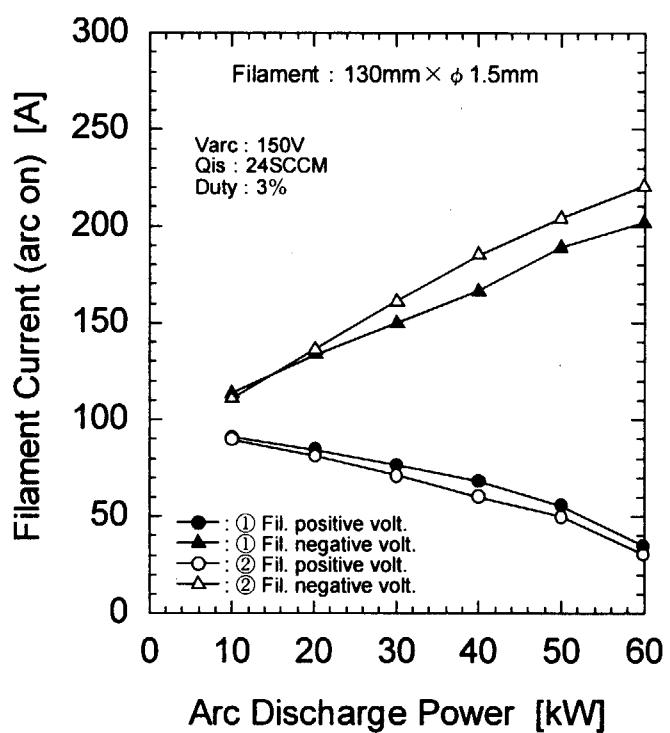


図 3-19 フィラメント電流のアーク放電パワー依存性

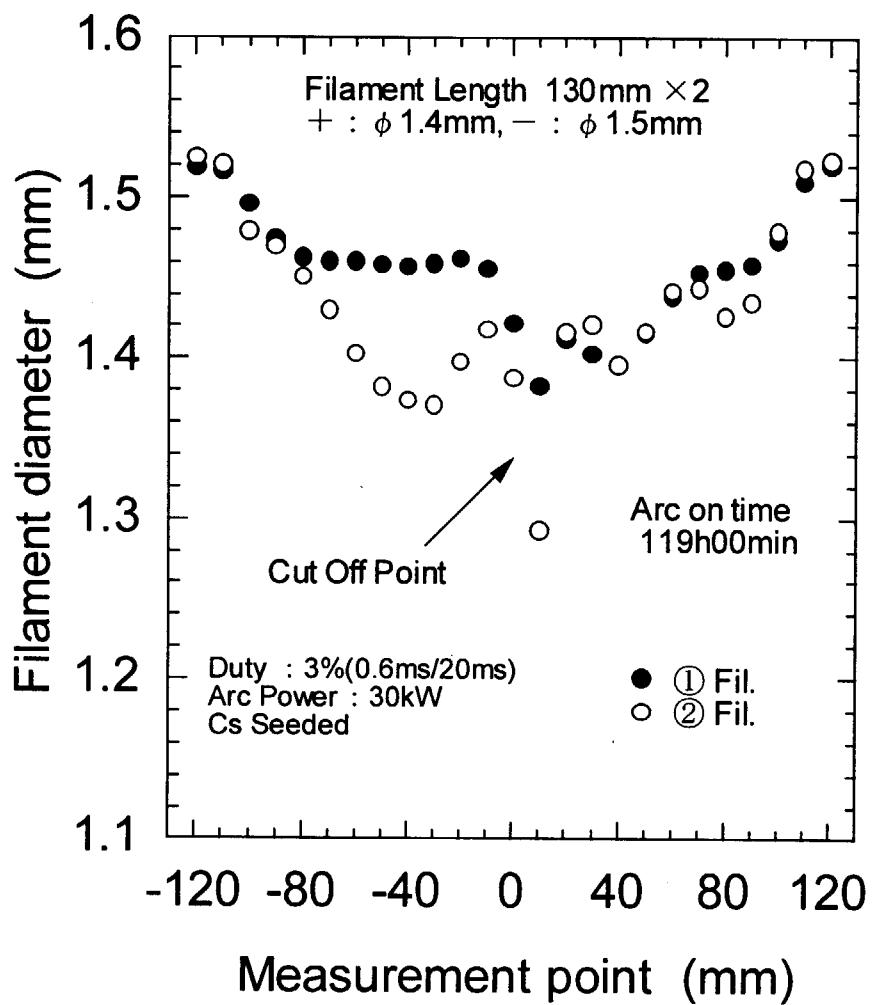


図 3-20 加工フィラメント寿命測定後のフィラメント径測定 (+側 : ϕ 1.4mm)

4. まとめ

本報告では、大強度陽子加速器計画が要求する性能を満たす負イオン源の開発を目的とし、ビーム電流測定、エミッターンス測定、フィラメント寿命測定を行った。今回得られた結果を表 4-1 に示す。

表 4-1 開発中の負イオン源の現状性能と目標性能の比較

	現状性能	目標性能
ピーク電流 (mA)	72	>60
エネルギー (keV)	70	50
パルス長 (msec)	1.0	0.5
パルス平坦度 (%)	~1 (ガス流量の依存性あり)	≤ 1
繰り返し率 (Hz)	50	50
デューティー (%)	5.0	2.5
RMS エミッターンス ($\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$)	0.13 (X) 0.15 (Y) @70 keV, 60 mA	~0.20 (X,Y)
運転ガス流量 (SCCM)	~16	as low as possible
運転サイクル周期 (時間)	119	500

負イオンビーム電流は、セシウム添加にてアーク放電パワー56 kW 時に 72 mA を達成し、要求性能である 60 mA を十分に満たすことができた。また引き出し電流は減少し、セシウム添加は引き出し電極保護の面からも有用であることが確認できた。

パルスビーム電流波形は運転ガス流量が大きく影響し、ガス流量 16 SCCM 程度でフラットになることが分かった。また、運転条件によって最適ガス流量の値が変化することも観測され、これについては今後の検討課題である。

エミッターンス測定では、ビームエネルギー70 keV、ビーム電流 60 mA 時に $0.13 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (垂直方向)、 $0.15 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (平行方向) を達成し、要求性能である $0.2 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ を十分に満足する結果を得た。

フィラメント寿命測定では、 $1.5 \text{ mm } \phi$ のフィラメントのプラス側のみを $1.4 \text{ mm } \phi$ に削ることで寿命が向上し、アーク放電パワー30 kW、デューティーファクタ 3 % の条件で、119 時間を達成した。

今後の課題として最も重要なのは、フィラメントの長寿命化である。今後はフィラメント太さや形状、本数の最適化実験を行う予定である。またビーム引き出し孔の口径を大きくし、低いア

一ク放電パワーで所定のビーム電流値を得ることも検討する。米国のローレンスバークレー国立研究所^[5]や KEK^[6]で開発中のイオン源ではプラズマ生成にフィラメントではなくアンテナによる RF 放電を使用している。両者ともまだ開発段階ではあるが、フィラメントに代わるプラズマ生成方法として注目でき、将来的にはこちらの方法を採用することを視野に入れ開発を行う。

大電流ビーム引き出しの達成にはセシウム添加が非常に有効な手段であることは分かったが、最近の陽子加速器では RFQ の使用が主流であり、イオン源からのセシウム蒸気の流れ出しは RFQ に放電の誘発などの悪影響を及ぼす恐れがある。今後、セシウム使用量の高効率化、安定な添加方法等を検討する必要がある。

謝辞

エミッターンス測定装置の調整をしてくださった加速器グループの廣木文雄氏に深く感謝いたします。高エネルギー加速器研究機構の上野彰氏にはエミッターンスの測定データ解析に協力して頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。本報告をまとめるにあたって有意義な助言を頂いた那珂研究所 NBI 加熱研究室の渡邊和弘氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム : JAERI-Tech 2000-003 "大強度陽子加速器計画" (2000)
- [2] H. Oguri, et al., Rev. Sci. Instrum. 71 (2000), 975
- [3] 奥村義和、核融合研究第 60 卷第 5 号 (1988) p329
- [4] S. Tanaka, Y. Ohara, Rev. Sci. Instrum. 55 (1984), 1625
- [5] Ka-Ngo Leung, Rev. Sci. Instrum. 71 (2000), 1064
- [6] A. Ueno et al., Proc. 2000 Linear Accelerator Conference, Monterey (2000)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーソル	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	0.0980665	1	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.101325	1.03323	0.967841	735.559	14.2233
力	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
力	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	
3.7 × 10 ¹⁰	1	

吸収線量	Gy	rad
1	100	
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

大強度陽子加速器用負イオン源のヒーム試験

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。