

JAERI-Tech
2001-028



JP0150488



IFMIF用高輝度イオン源の開発と初期実験結果

2001年 5月

伊賀 尚*・奥村 義和・柏木 美恵子

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。
入手の問合わせは、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）で複写による実費頒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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

IFMIF 用高輝度イオン源の開発と初期実験結果

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

伊賀 尚*・奥村 義和・柏木 美恵子

(2001年2月13日受理)

原研では 40MeV、250mA の重陽子ビームを発生する施設である IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) 用の高輝度イオン源の開発を進めている。このほど、熱陰極式の第1号機を開発し、ITS-2 テストスタンドにおいて 60keV までのビーム光学を調べた。このイオン源は多極磁場型プラズマ源と4枚電極からなる2段加速系の引き出し部から構成される。イオンビームの等価質量を 2.38 (プロトン比 30%) と仮定したビーム軌道計算結果は実験結果とよく一致した。最適パービアンス条件で得られたイオンビーム 60keV/100mA H⁺は 100keV/220mA H⁺ (155mA D⁺) に相当し、ビーム光学を良好に保ったまま IFMIF 用イオン源の仕様を満足する大電流イオンビーム引き出しの見通しを得た。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

* 外来研究員 (日立製作所)

Development of a High Brightness Ion Source for IFMIF and Preliminary Test Results

Takashi IGA*, Yoshikazu OKUMURA and Mieko KASHIWAGI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 13, 2001)

Development of a high brightness ion source for the 40MeV/250mA deuteron beam accelerator, IFMIF, is in progress at JAERI. A prototype ion source using hot filament cathodes has been developed. This ion source consists of a multi-cusp plasma generator and a two-stage accelerator. Beam optics has been investigated at the energy of up to 60keV. Experimental results of the beam optics agreed well with the simulation by assuming that the equivalent ion mass is 2.38. Ion beam of 60keV/100mA H⁺, which corresponds to ion beam of 100keV/220mA D⁺, was obtained with optimum perveance (minimum divergence). This result indicates that the current requirement for the IFMIF ion source would be satisfied with this ion source.

Key Words : IFMIF, High Brightness, Ion Source, Bucket Source, Multi-cusp,
Two-stage Accelerator, Low Emittance, Low Divergence, High Current

* On leave from Hitachi, Ltd.

目 次

1. はじめに.....	1
2. IFMIF 用イオン源の仕様.....	2
3. 高輝度イオン源 1 号機 (Mark I)	2
3.1 プラズマ生成部の構造.....	2
3.2 ビーム引き出し部の構造.....	3
3.3 ビーム軌道計算.....	3
4. 実験装置.....	4
5. 実験結果と考察.....	5
5.1 プラズマ生成.....	5
5.2 ビーム強度分布.....	5
5.3 空間電荷によるビームの発散.....	5
5.4 ビーム光学.....	6
6. まとめ.....	7
謝辞.....	7
参考文献.....	7

Contents

1. Introduction	1
2. Specifications for IFMIF Ion Source	2
3. High Brightness Ion Source I (Mark I)	2
3.1 Structure of Plasma Generator	2
3.2 Structure of Extractor	3
3.3 Beam Orbit Calculation	3
4. Experimental Setup	4
5. Experimental Results and Discussion	5
5.1 Plasma Production	5
5.2 Beam Intensity Distribution	5
5.3 Beam Spreading by Space Charge	5
5.4 Beam Optics	6
6. Conclusions	7
Acknowledgement	7
References	7

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) は、日本、米国、欧州連合及びロシアが共同で計画中の、核融合炉材料開発を目的とした加速器ベースの照射施設である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。IFMIF では、核融合炉の中性子条件を模擬するために、加速器で最大 40MeV に加速された重陽子ビームを液体リチウムターゲットに照射することにより重陽子-リチウム (D-Li) ストリッピング反応で高エネルギーの中性子束を発生させる計画である。

IFMIF の加速器系は2台の線形加速器からなり、各々は 100keV 入射器、8MeV 高周波四重極リニアック(RFQ)、40MeV ドリフトチューブリニアック (DTL)、および高エネルギービーム輸送系 (HEBT) から構成される。それぞれの加速器は独立に 125mA、40MeV の連続波重陽子ビームを生成し、そのビームは HEBT によりターゲット系に輸送されて、ターゲット面上で合成される。ターゲット面上では幅 20cm×高さ 5cm のスポットに一様にビームが照射される。100keV 入射器はイオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEBT) からなる。DTL と HEBT でのビームの損失は少なく、RFQ の加速効率を 90%と仮定すると、RFQ 入口では 140mA の重水素正イオン (D+) ビームが必要になる。さらに、LEBT の透過率を 90%と仮定するとイオン源では 100keV,155mA の D+ビームを連続的に発生させる必要がある⁽¹⁾。

このような世界最大規模の大電流重陽子ビーム加速を実現するために、国際的なタスク分担に加えて国内的にも原研と大学が協力し、基本要素の最重要課題を取り上げて要素技術確証を進めようとしている。加速器系においては、平成 12 年度からの3年間で大電流定常連続ビームの発生・輸送技術、大出力 RFQ 空洞結合の基本技術、ドリフトチューブの高周波発熱除去技術を中心とした要素技術確証を行う。

原研 NBI 加熱研究室では、上記の大電流定常連続ビームの発生・輸送技術の要素技術開発の一環として、IFMIF 用イオン源の開発を開始した。開発すべきイオン源要素技術としては、高輝度イオンビームの生成 (200mA H+、規格化エミッタンス(rms) $0.2 \pi \text{ mm mrad}$ 、90%規格化エミッタンス $1 \pi \text{ mm mrad}$)、低エネルギー大電流イオンビームの輸送、およびイオン源長寿命化 (ECRまたは長寿命カソード) があり、これらを順次確証して行く予定である。

本論文では、その第1段階として開発した熱陰極式の第1号機イオン源のビーム光学を調べた結果を報告する。

2. IFMIF 用イオン源の仕様

IFMIF 用イオン源に対する要求仕様を表 2.1 に示す。これに対応して、イオン源の開発課題としては、

- ① 高輝度イオンビーム生成 (200mA H⁺、エミッタンス 0.2-1 π mm mrad)
- ② 低エネルギー大電流イオンビームの輸送 (静電方式、磁場方式)
- ③ 長寿命化 (メンテナンス周期 300 時間以上、長寿命カソード or ECR イオン源)
- ④ 負イオン源 (低エミッタンス、LEBT 簡素化)

があり、既存の ITER 用負イオン源や大強度陽子加速器用イオン源開発の成果を最大限に利用して以下のステップで開発を進める計画である。

- I 高輝度イオン源 1 号機を ITS-2M テストスタンドに取り付け、フィラメントを用いたアーク放電で 60keV までの試験を実施し、ビーム光学の研究を行う。
- II 同イオンビームを用いて低エネルギービーム輸送系の研究開発を行う。
- III 並行して、ECR イオン源の開発を行う。
- IV 並行して、長寿命カソードの開発を行う。
- V 並行して、大電流負イオン源の開発を行う。
- VI 以上の結果を反映して、IFMIF 用イオン源を 2001 年に製作。既存のテストスタンド (NIAS or PBEF or JEBIS) を用いて 100keV/200mA 連続運転を実証する。

これまでに、ステップ I の熱陰極式の高輝度イオン源 1 号機 (Mark I) を開発し、そのビーム光学を調べた。

3. 高輝度イオン源 1 号機 (Mark I)

3.1 プラズマ生成部の構造

開発した高輝度イオン源 1 号機の断面図と外観をそれぞれ図 3.1 および図 3.2 に示す。本イオン源のプラズマ生成部は、原研で稼働中の核融合中性子工学研究用 D-T 中性子源 FNS (Fusion Neutronics Source) 用バケット型イオン源のプラズマ生成部と同じであり、無酸素銅製で直径 120mm、長さ 122mm の円筒形である⁽⁴⁾。アークチャンバーの側面、上蓋、およびプラズマ電極支持枠にはネオジウム磁石が配置され、プラズマ閉じ込め用の 10 極のラインカスプ磁場を形成している。図 3.3 にアークチャンバー側面とプラズマ電極支持枠の磁石の極性配置を示す。この配置ではチャンバー内を横断するフィルター磁場は形成されない。なお、引き出されるビームのプロトン比を上げるために、プラズマ電極支持枠の磁石配置を変えてフィルター磁場を形成することもできる。また、アークチャンバー側面の磁石配置も併せて変え

ればさらに強いフィルター磁場を形成することができ、80%のプロトン比が得られている⁽⁴⁾。アークチャンバーの上蓋からカソードとなるタングステンフィラメントを2本挿入した。フィラメントは直径1mm、長さ60mmのヘアピン形状である。

3.2 ビーム引き出し部の構造

本イオン源と同じプラズマ生成部を有するFNS用イオン源では引き出し電極系に3枚電極からなる単段加速系を用いたのに対して、本イオン源では図3.1に示したように4枚電極からなる2段加速系を採用した。これは、当研究室で開発したJT-60用正イオンNBIや原研の技術開発用加速器BTA (Basic Technology Accelerator) 用高輝度水素イオン源プロトタイプ⁽⁵⁾に用いられているもので、プラズマ電極、引き出し電極、減速電極、および接地電極と呼ぶ4枚の電極からなる。図3.4に電極孔の断面を示す。この電極系はJT-60用正イオンNBIの電極形状をベースに設計したものであり、口径はすべて12mmφである。

2段加速系(1段目:プラズマ電極-引き出し電極間、2段目:引き出し電極-接地電極間)の電圧比 Γ と電界比 f をそれぞれ以下の式で定義する。

$$\Gamma \equiv \frac{V_{GE}}{V_{PE} + V_{GE}}, \quad f \equiv \frac{E_{PE}}{E_{GE}} = \frac{V_{PE}/d_{PE}}{V_{GE}/d_{GE}} \quad (2.1)$$

ここで、 V_{PE} : プラズマ電極-引き出し電極間の電圧
 V_{GE} : 引き出し電極-接地電極間の電圧
 E_{PE} : プラズマ電極-引き出し電極間の電界
 E_{GE} : 引き出し電極-接地電極間の電界
 d_{PE} : プラズマ電極-引き出し電極間のギャップ長
 d_{GE} : 引き出し電極-減速電極間のギャップ長

Γ の値は引き出し電極に印加する電圧 V_{GE} を変えることにより調節できる。2段加速系ではビームの発散角は f に強く依存し、最小の発散角を与える f の最適値は0.3-0.5であることが分かっている⁽⁶⁾。本実験では、ビーム電流値と発散角のバランスが良い電極配置をビーム軌道計算により検討し、プラズマ電極-引き出し電極間距離 d_{pe} を6.4mm、引き出し電極-減速電極間距離 d_{ge} を5.4mm、減速電極-接地電極間距離 d_e を3.4mm(いずれも実測値)、 Γ を0.64に設定して、 f を0.47とした。

3.3 ビーム軌道計算

2次元ビーム軌道計算コードBEAMORBTを用いて、前節で述べた2段加速系についてビーム引き出し特性のシミュレーションを実施した。図3.5は加速電圧60kV、減速電圧-8kV、イオン電流密度90mA/cm²、イオンの等価質量2.38の条件におけるビーム軌道計算例である。ここで、イオンの等価質量は、本イオン源と同じプラズマ生成室をもつFNS用イオン源におけるビーム中のイオン種の分光分析結果⁽⁴⁾から、引き出されるイオン種とその比率を $H_1^+ : H_2^+ : H_3^+ : O^+ = 0.3 : 0.28 : 0.4 : 0.02$ と仮定して求めたものである。図3.6に、ビーム軌道計算か

ら求めたビーム発散角 (RMS) のビーム電流依存性を、加速電圧をパラメータにして示す。加速電圧一定のもとではビーム発散角が最小になる加速電流条件 (最適パービアンズ条件) が存在する。加速電圧が高いほどビーム進行方向の運動量が大きくなるので、ビーム発散角の最小値は加速電圧が高いほど小さくなる傾向を示している。また、この引き出し系では加速電圧 60kV の時にビーム電流 95mA 付近に最適パービアンズ条件があることが予測できる。

4. 実験装置

開発したイオン源を原研那珂研の負イオン源テストスタンド ITS-2M に取り付けて実験を行った。本イオン源の加速電圧の仕様は 100kV であるが、ITS-2M の加速電源の容量制限から今回は 60kV 以下の加速電圧でビーム光学を調べた。

ITS-2M の構造を図 4.1 に示す。真空容器とビームラインの真空排気には排気速度 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ のターボ分子ポンプ 3 台を用い、状況に応じて運転台数を調整した。イオン源はゲートバルブを介して真空容器に取り付け、高電圧架台からイオン源のプラズマ生成室内に水素ガスを供給した。また、真空容器にも水素ガス供給系を設置して、イオン源のプラズマ生成室とは独立にビームラインのガス圧を調整できるようにした。イオン源内のガス圧 P_a と真空容器のガス圧 P_{vac} はそれぞれピラニゲージおよび電離真空計で測定した。なお、以下に示すガス圧はそれぞれの真空計の指示値に、同種の真空計を隔膜式真空計 (Baratron[®]) を用いて校正した場合の校正係数である、0.7、2.5 を掛けて求めた値である。

イオン源接地電極の下流 2026mm の位置に、真空容器の上部ポートから 2 次元マルチチャンネル・カロリメータを挿入してビームの発散角を測定した。このカロリメータは、水平方向、垂直方向にそれぞれ 9 個の銅チップを 1 cm ピッチで十字に配置したもので、ビームの広がり $r_{1/e}$ (e-folding half width)、発散角 $\omega_{1/e}$ を求めることができる。

図 4.2 にイオン源と電源の接続系統図を示す。減速電源以外は ITS-2M の既設の電源を用いた。減速電源には定格電圧 10kV、定格電流 1 A の直流安定化電源を用い、電極間での絶縁破壊時に減速電源に過電圧がかからないようサージ対策を施した。本実験では、加速電極には電源の容量制限から最大で 60kV の正電圧を印加し、減速電極には最大 8kV の負電圧を印加した。加速電源にはイオン源と並列に $80 \text{ k}\Omega$ ($400 \Omega \times 8 \times 50$ 段) のブリーダ抵抗が接続されており、引き出し電極電位はこのブリーダ抵抗から分圧して与えた。イオンビームの電流値は加速電流 I_{acc} で評価した。 I_{acc} は加速電源の接地側に取り付けた 4.95Ω のシャント抵抗を用いて測定し、イオン源動作時の加速電源電流から無負荷時のリーク電流分を差し引いて求めた。ビーム引き出し時には引き出し電極と減速電極にもわずかに電流が流れるが今回はモニターしなかった。

5. 実験結果と考察

5.1 プラズマ生成

図 5.1 にフィラメント電圧 V_{fil} をパラメータとしたときのイオン源のアーク電流-電圧特性を示す。アーク放電は正特性を示しており、フィラメント電圧 V_{fil} を増すに従い高インピーダンス放電から低インピーダンス放電に移行することが分かる。今回の実験では、本イオン源でアークパワー6.2kW まで安定に放電することが確認された。

イオン源ガス圧には加速電流が最大になる最適値（最適ガス圧）が存在し、その値はイオン源のプラズマ閉じ込め性能で決まる。プラズマの閉じ込め性能はチャンバーのイオン損失面積 S_L に対するプラズマ体積 V_P の比 V_P/S_L に関係しており、同じ形状なら大きなチャンバーの方が一般に閉じ込め性能は良い。図 5.2 にアークパワー1.5kW 一定の条件における加速電流 I_{acc} のイオン源ガス圧 P_a 依存性を示す。イオン源ガス圧 P_a が 1 Pa 以上で加速電流 I_{acc} は飽和する傾向を示しており、本イオン源の最適ガス圧は 2 Pa 付近にあることが分かる。この値は BTA 用イオン源プロトタイプ機の最適動作ガス圧 0.5Pa に比べて高いが⁵⁾、これは本イオン源のチャンバーが BTA 用イオン源プロトタイプ機に比べて寸法が約 60%と小さく、 V_P/S_L が小さいためである。

5.2 ビーム強度分布

図 5.3 に 2 次元マルチチャンネルカロリメータで測定したビーム強度分布の例を示す。図中の実線および破線は、それぞれ垂直方向および水平方向の測定点からガウス分布を用いて最小自乗近似した場合の分布曲線を示している。この分布の広がり $r_{1/e}$ (e-folding half width) からビームの発散角 $\omega_{1/e}$ を求めた。また、この分布のピーク値と広がり $r_{1/e}$ からビーム電流値を熱的に求めることができる。今回の実験では、カロリメータで熱的に測定したビーム電流値は加速電流値の 60%から 70%であった。なお、垂直方向と水平方向のビーム強度分布はほぼ同じであることから、以下では垂直方向のビーム強度分布から求めた発散角のみを示す。

5.3 空間電荷によるビームの発散

引き出されたイオンビームは、何らかの空間電荷中和機構がないと自身の電荷によって急激に発散する。実験室ではビームラインにある程度残留ガスが存在するので、イオンビームとの衝突によりビームプラズマが形成され、空間電荷が中和される。イオンビームのエネルギーと電流値を一定に保ちながらビームラインの真空度を変えたときの、ビーム発散角 $\omega_{1/e}$ とビームライン真空度 P_{vac} の関係を図 5.4 に示す。エネルギーによらず、ビームライン真空度 P_{vac} が 0.01Pa 以下程度ではビームは大きく発散するが、 P_{vac} が 0.02Pa 程度になるとビーム発散角が小さくなり空間電荷中和効果が表れていることを示している。ビームラインの真空度が 0.03Pa から 0.1Pa 以上になるとビーム発散角が再び大きくなるのは、残留ガス分子によるビームの散乱が増えるためである。

5.4 ビーム光学

加速電圧 **20kV** から **60kV** の範囲で、カロリメータで測定したビーム発散角 ω_{1e} と加速電流 I_{acc} の関係を図 5.5 に示した。加速電流は、加速電圧一定の元でアークパワーを変えることで変化させた。ここで、空間電荷によるビームの発散が最小になるように、ビームラインの真空度は **0.03Pa** に保った。また、図中には白抜き記号で図 3.6 に示したビーム発散角(RMS)の計算値(等価質量 **2.38** を仮定)もあわせて示した。計算値と実測値は最適パービアンズ条件を与える電流値 I_{opt} に関して比較的良好に一致しているため、本イオン源から引き出されたイオンビームのプロトン比は、3.3 節で仮定した値である **30%** 程度と考えられる。加速電流 **60kV** の場合に実測値の方が計算値より最適パービアンズ条件を与える電流値 I_{opt} がやや大きくなっているのは、加速電圧 **60kV** の時には多くのアークパワーが投入されるのでプロトン比が上がり、等価質量が小さくなったためと考えられる。加速電圧が増加するに従いビームの縦方向の運動量が大きくなるので発散角の最小値自身は小さくなるが、加速電圧 **50kV** 以上ではやや増加した。これは、投入アークパワーの増加によるイオン温度の上昇が原因の一つとして考えられる。なお、今回の実験で得られた最小発散角は **8mrad (0.45 度)** であり、加速電圧 **60kV** で加速電流 **100mA** を引き出したときのアーク効率は約 **50mA/kW** であった。

図 5.5 から求めた最小発散角を与える最適加速電流値 I_{opt} と加速電圧(ビームエネルギー)の関係を図 5.6 に示した。最適加速電流 I_{opt} は加速電圧 V_{acc} の **1.54** 乗に比例して増加した。電流値が高いところで $3/2$ 乗則からのずれが大きくなるのは、電流が増えるに従いプロトン比が高くなってビームの等価質量が減少するためである。図 5.6 から加速電圧 **100kV** での最適ビーム電流値は約 **220mA** (重水素換算で **155mA**) になることが予想され、ビーム光学を良好に保ったまま **IFMIF** 用イオン源の電流値仕様を満足する大電流イオンビーム生成の見通しが得られた。

なお、前述のように、今回用いた 2 段加速系は **JT-60** 用正イオン **NBI** の電極形状をベースにしている。この電極形状は **NBI** で重要な発散角の低減には効果的であるが、エミッタンスが最も重要となる加速器用途では必ずしも最適とは言えない。これについては、さらなる大電流化とエミッタンス低減を指向した電極系を用いて、エミッタンスの評価を含めたビーム光学の検討を行う予定である。さらに、今回は使用しなかったアークチャンバーの磁気フィルターを用いてプロトン比の向上をはかる。

6. まとめ

2段加速系を備えた多極磁場型の IFMIF 用高輝度イオン源1号機を開発し、負イオン源テストスタンド（最大加速電圧 60kV）において試験を実施して、60keV までのビーム光学を調べた。最適パービアンズ条件で得られたイオンビーム 60keV/100mA H⁺は 100keV/220mA H⁺（155mA D⁺）に相当し、ビーム光学を良好に保ったまま IFMIF 用イオン源の仕様を満足する大電流イオンビーム生成の見通しを得た。また、イオンビームの等価質量を 2.38（プロトン比 30%）と仮定したビーム軌道計算結果は実験結果とよく一致した。

今後は、さらに大電流化と低エミッタンス化を進めて低エネルギービーム輸送部の試験を実施するとともに、ECR イオン源、長寿命カソード、および大電流負イオン源の開発を並行して進める予定である。

謝 辞

本実験を遂行するに当たり装置の運転・保守に多大なご協力を頂きました原子力エンジニアリング（株）の阿部宏幸氏、貴重なコメントを頂いた核融合中性子工学研究室の竹内浩室長、杉本昌義主任研究員、有意義な議論や助言をいただいた NBI 加熱研究室の皆様には感謝の意を表します。また、本研究を行う機会と激励を与えて頂きました関昌弘核融合工学部長、松田慎三郎那珂研究所長に感謝致します。

参考文献

- [1] IFMIF International Fusion Material Irradiation Facility Conceptual Design Activity Final Report, ENEA Frascati Report, RT/ERG/FUS/96/11(1996)
- [2] IFMIF International Fusion Material Irradiation Facility Conceptual Design Evaluation Report: A Supplement to the CDA by the IFMIF TEAM, FZKA 6199 (1999)
- [3] Fusion Neutronics Laboratory; IFMIF International Fusion Material Irradiation Facility Conceptual Design Activity Reduced Cost Report, JAERI-Tech 2000-014 (2000)
- [4] 宮本直樹、他 4 名；JAERI-Tech 99-010 (1999)
- [5] 小栗英知、他 3 名；JAERI-M 92-200 (1992)
- [6] Y.Ohara ; J. Appl. Phys. 49, 4711 (1978)

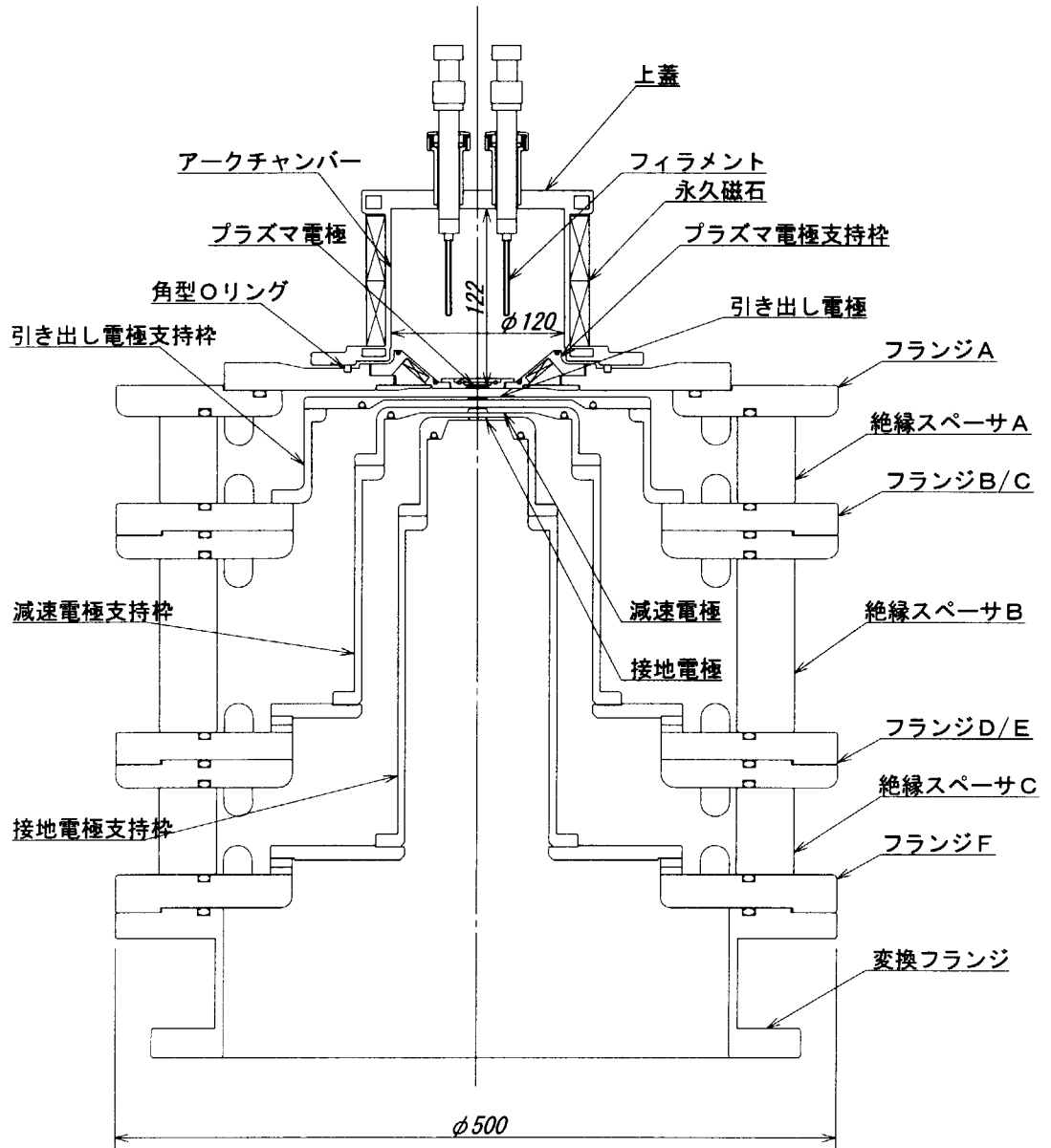


図 3.1 IFMIF 用高輝度イオン源 1 号機の断面図

表 2.1 IFMIF 用イオン源に要求される仕様

Requirements	Specification
Ion source type	Volume or ECR
Particle	D ⁺
Output energy	100keV
Output current	155mA
Species fraction	D ⁺ > 90%
Current noise fluctuation	±1%
Normalized rms transverse emittance (Normalized 90%)	0.2 π mm mrad (1 π mm mrad)
Duty factor	100%(CW)
Lifetime	>300h →1000h:goal

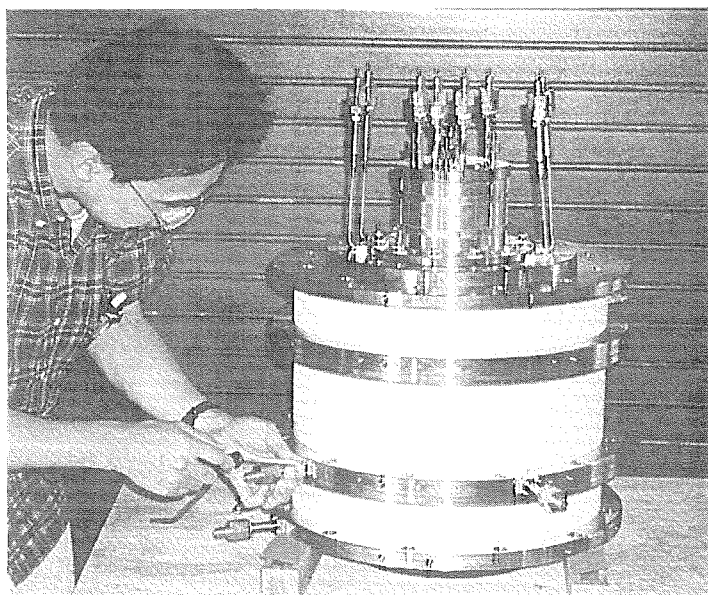


図 3.2 IFMIF 用高輝度イオン源 1 号機の外観

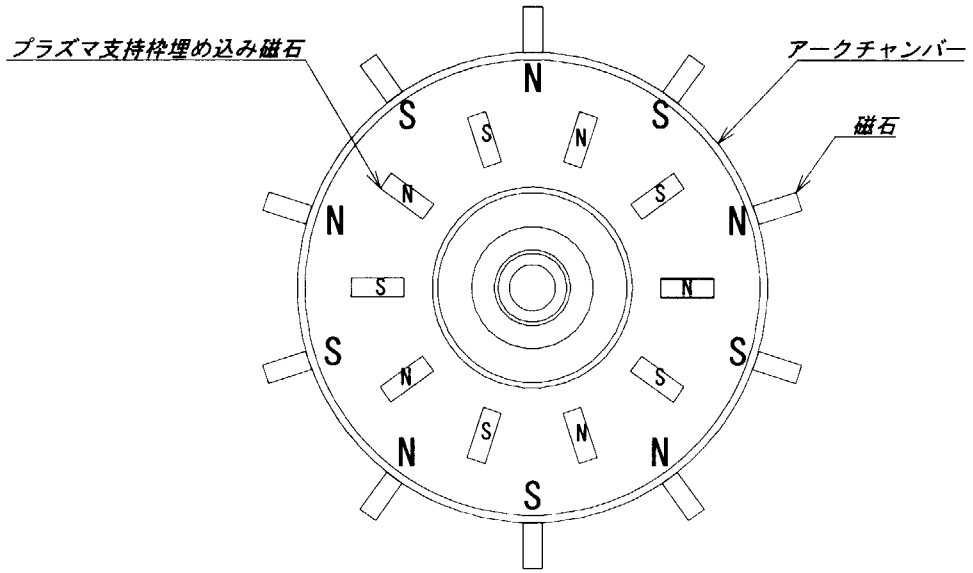


図 3.3 アークチャンバーの磁石配置

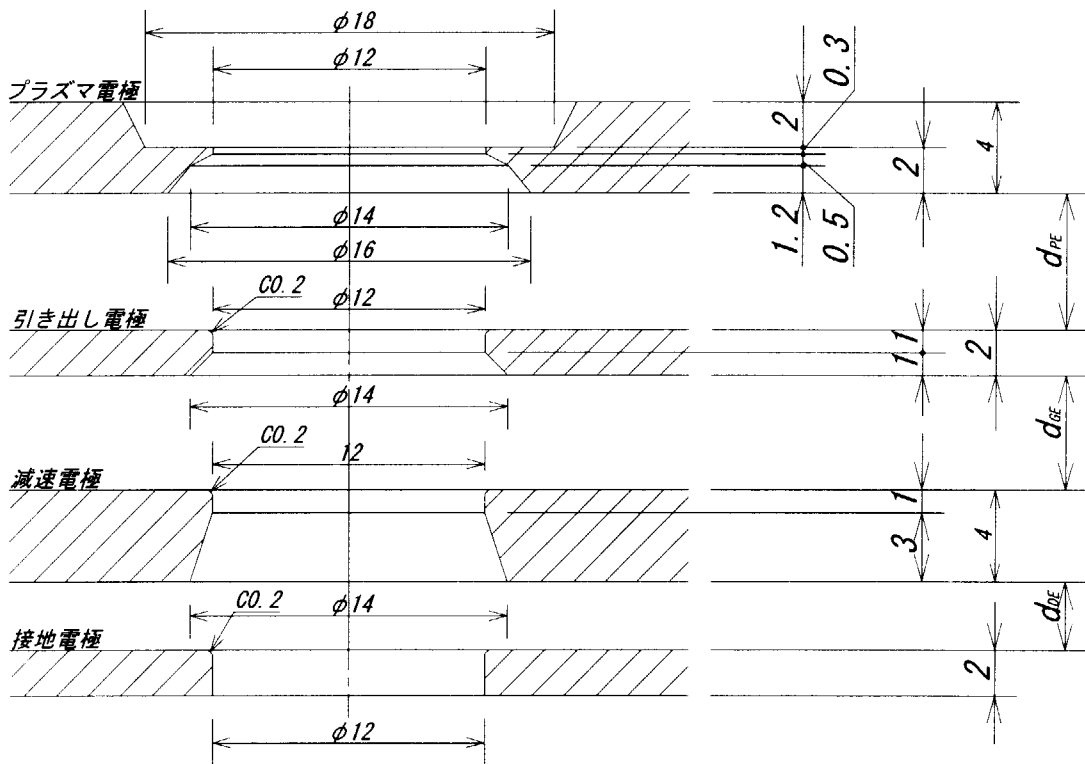


図 3.4 IFMIF 用高輝度イオン源 1 号機の電極孔

* IFMIF ION SOURCE * M=2.38, 6.4/5.4/3.4mm, 60/-8kV, G=0.64, f=0.47, 90mA/cm²

CURRENT DENSITY = 9.0000E+01 (MA/CM²)
 TOTAL CURRENT = 9.2837E+02 (A)
 PERVEANCE = 6.3168E-09 (A/V^{+1.5})
 MINIMUM POTENTIAL = -1.0306E+03 (V) AT Z = 2.3002E-02 (M)
 DIVERGENCE (RMS) = 4.0936E-01 (DEG)
 ELECTRON TEMPERATURE = 0.0000E+00 (EV)
 ION TEMPERATURE = 0.0000E+00 (EV)

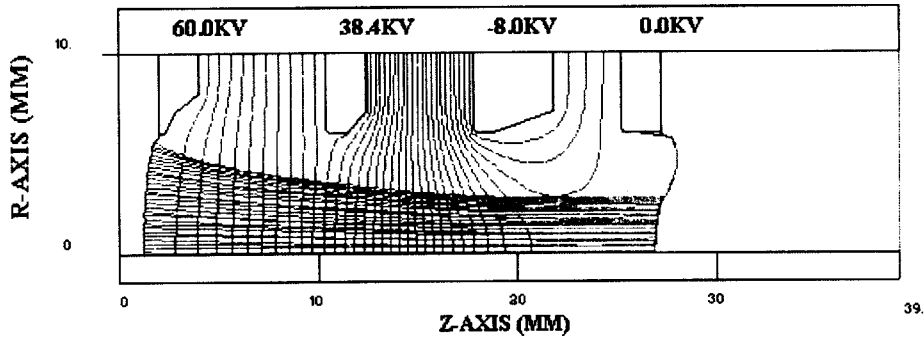


図 3.5 ビーム軌道計算例

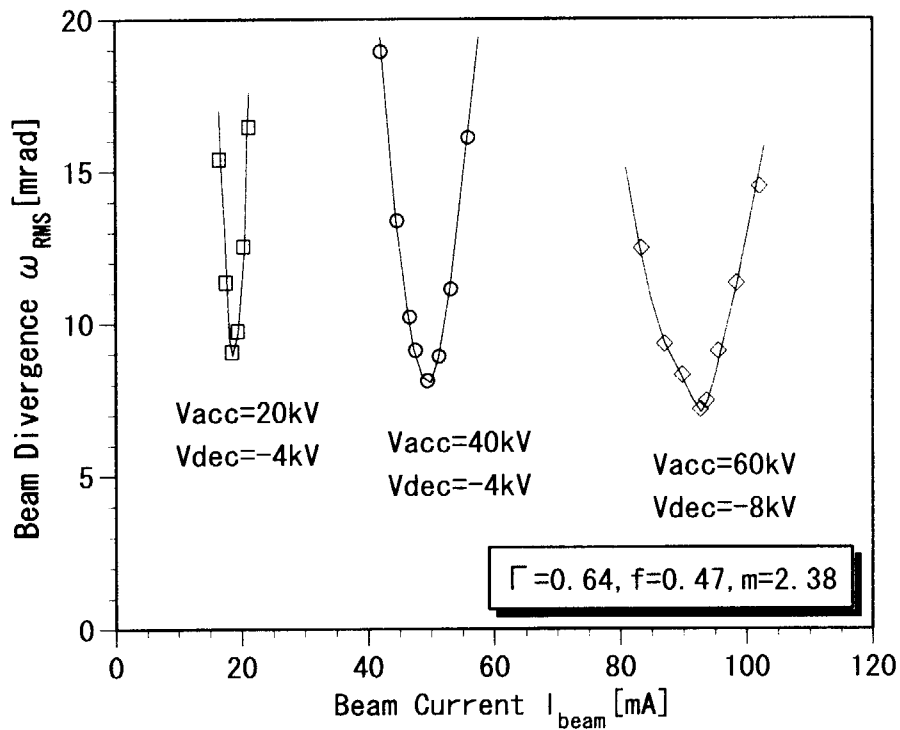


図 3.6 ビーム軌道計算から求めた発散角と加速電流の関係

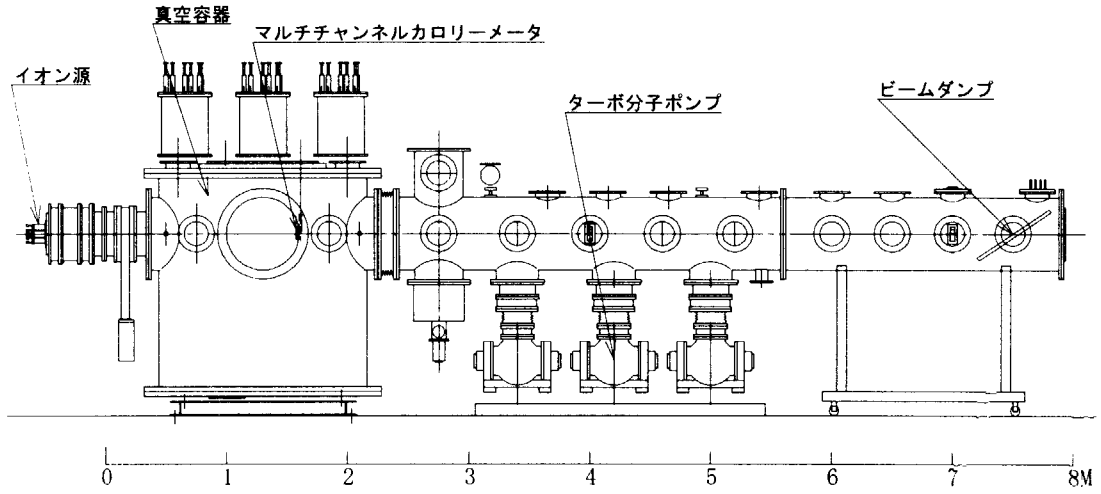


図 4.1 負イオン源テストスタンド ITS-2M の構成

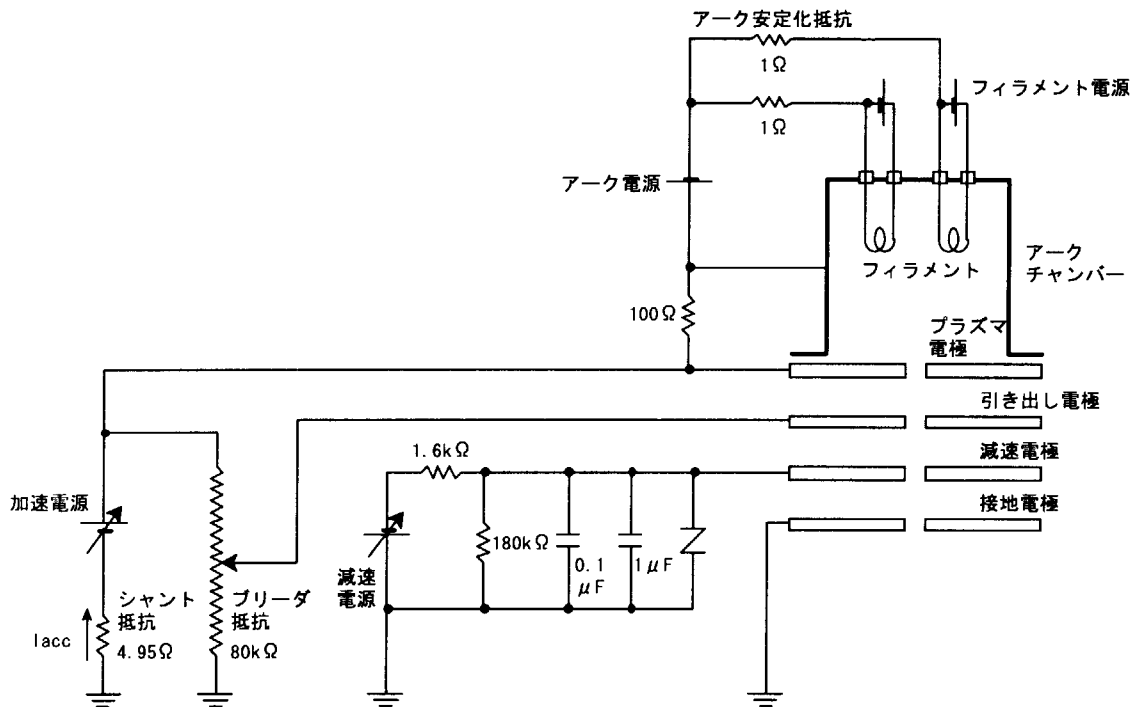


図 4.2 ビーム引き出し時の電源結線図

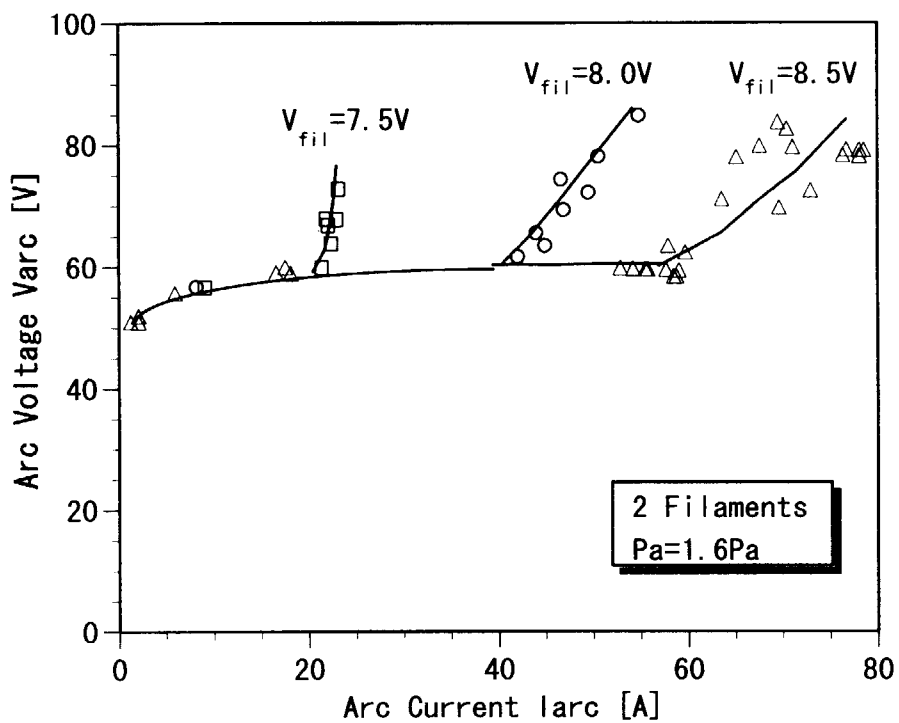


図 5.1 アーク放電特性

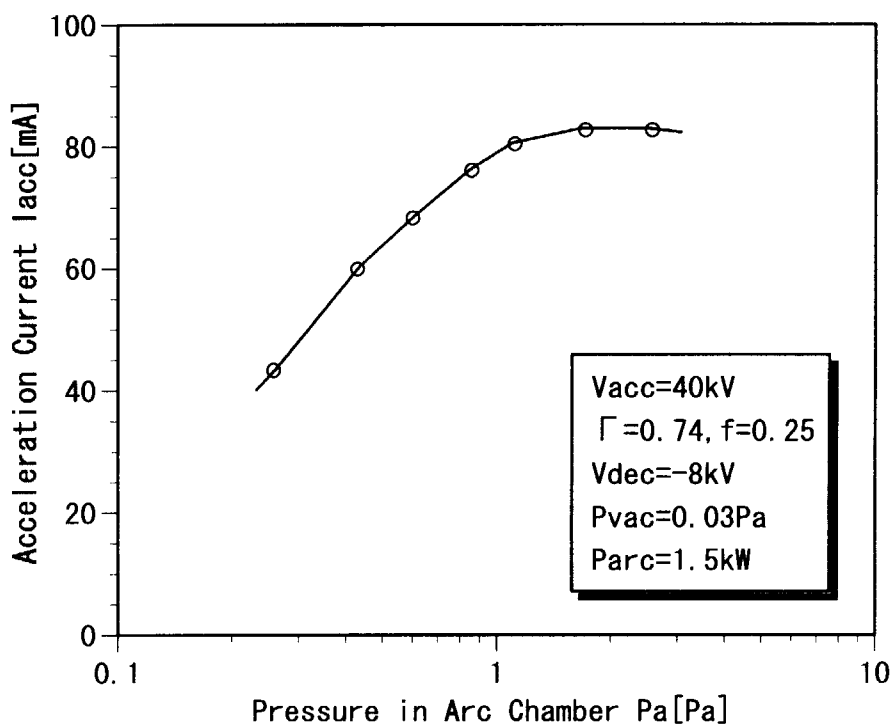


図 5.2 加速電流のイオン源ガス圧依存性

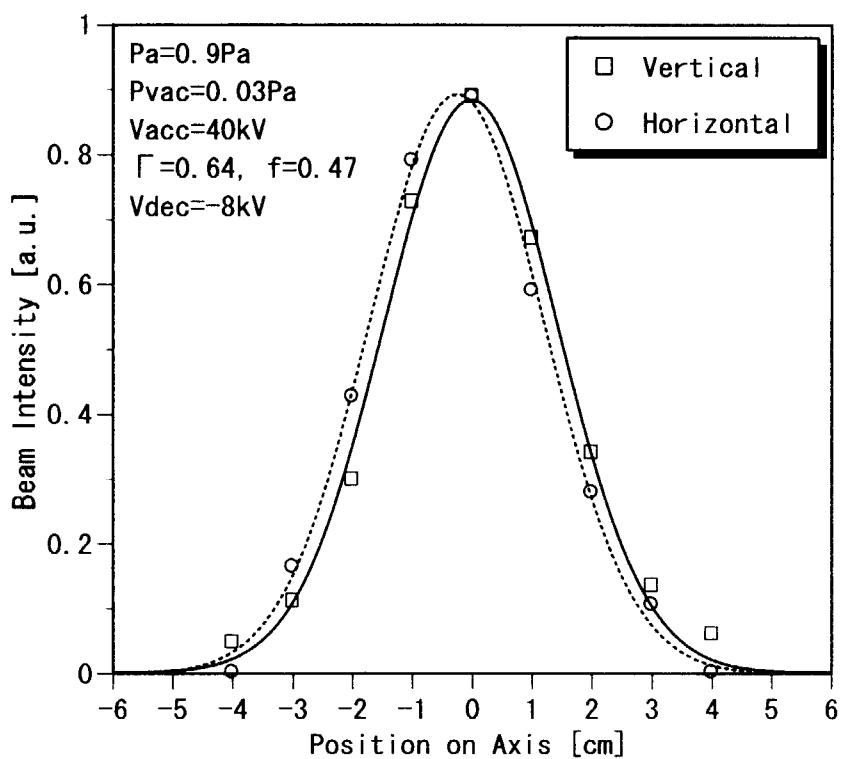


図 5.3 カロリメータで測定したビーム強度分布

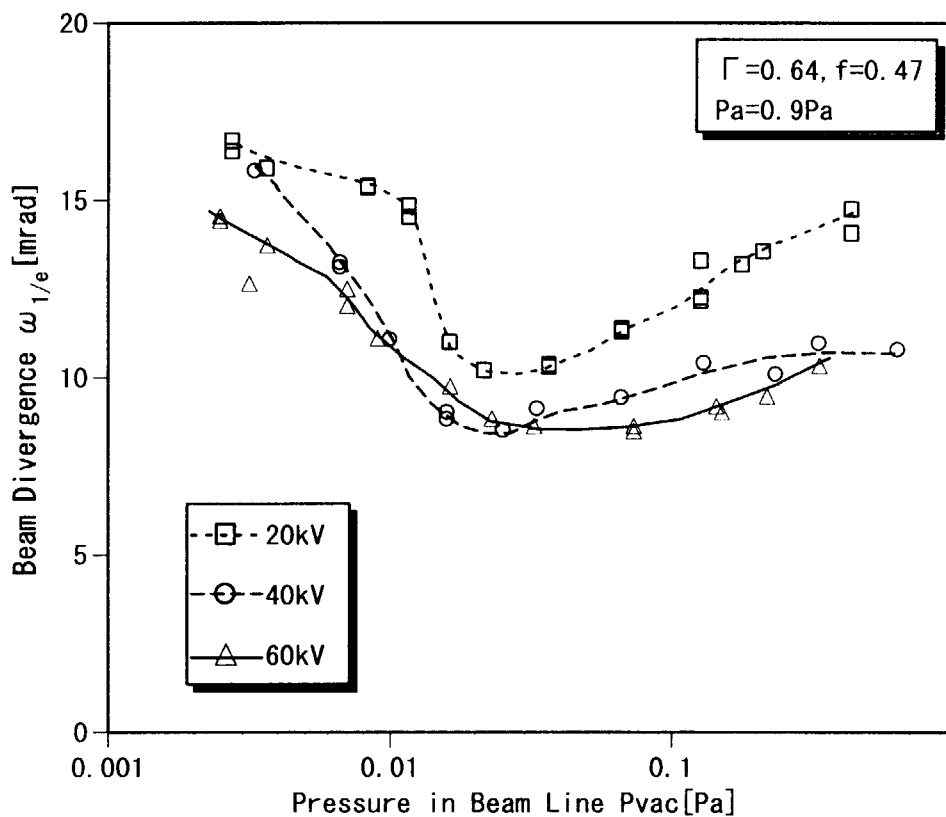


図 5.4 ビーム発散角のビームライン真空度依存性

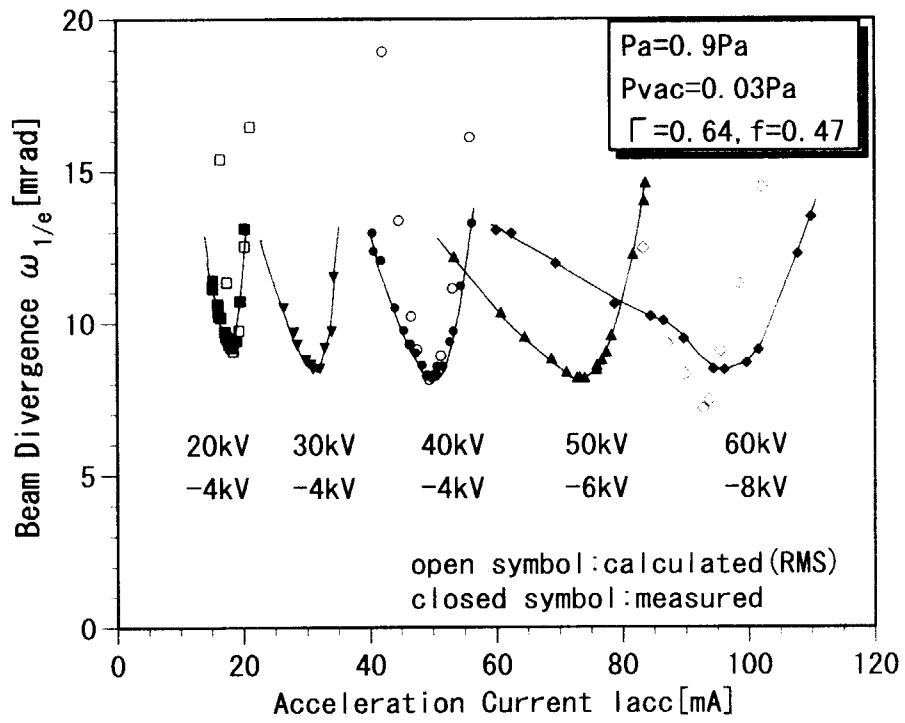


図 5.5 ビーム発散角と加速電流の関係

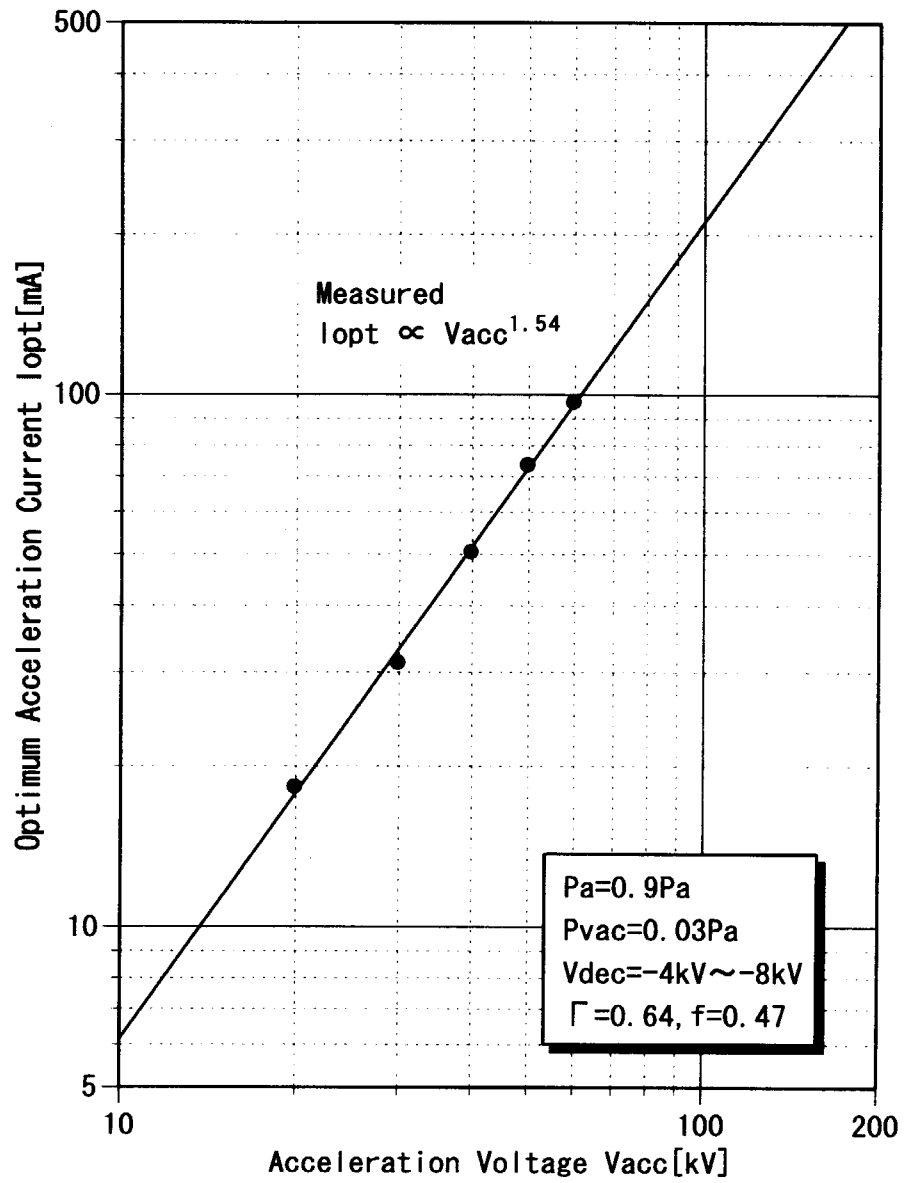


図 5.6 最適加速電流の加速電圧依存性

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
工率, 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	ジーメンズ	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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² 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, 1 eV および 1 u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のカテゴリに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	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

1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

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

