

JAERI-Tech
99-010



JP9950148



FNS用バケット型イオン源の開発

1999年2月

宮本直樹*・関 正和・金正倫計・小栗英知・奥村義和

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。
入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

FNS用バケット型イオン源の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

宮本 直樹*・関 正和⁺・金正 倫計⁺⁺・小栗 英知⁺⁺
奥村 義和

(1999年1月26日受理)

核融合中性子工学研究用D-T中性子源FNS (Fusion Neutron Source) の中性子束強度増大のために、新たに重水素イオン源を設計・製作し、試験を行った。このイオン源はバケット型であり、多極磁場型プラズマ源と3枚電極の引出部から構成される。高プロトン比を得るためにイオン生成部に強力なプラズマ閉じ込め磁場及び磁気フィルターを持つことを特徴とする。

試験の結果、引き出し電圧50kVでビーム電流130mA、発散角10mrad、プロトン比80%の水素ビーム引き出しに成功し、FNSの前段加速系において90mA以上の重水素イオンビームを得られる見通しを得た。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

＋ 東海研究所物質科学研究部

++ 東海研究所中性子科学研究センター

* 日新電機株式会社

Development of a Bucket Type Ion Source for FNS

Naoki MIYAMOTO *, Masakazu SEKI⁺, Michikazu KINSHO⁺⁺,
Hidetomo OGURI⁺⁺ and Yoshikazu OKUMURA

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

(Received January 26 ,1999)

A high current deuterium ion source for FNS (Fusion Neutron Source) has been designed and developed to increase the neutron flux. The ion source is a bucket type ion source. The source plasma is confined by a strong cusp magnetic field and magnetic filter is located near an extractor to produce a high proton ratio ion beam. The extractor consist of three electrodes. This extractor is same as the FNS extractor.

A hydrogen ion beam of 130mA was extracted with a low beam divergence of 10mrad and high proton ratio of 80% at extraction voltage of 50kV.

Keywords : Bucket Source, FNS, High Current, Deuterum, Ion Source, Neutron Source,
Magnetic Filter, Proton Ratio

+ Department of Materials Science, Tokai Research Establishment

++ Center for Neutron Science, Tokai Research Establishment

* Nissin Electric Co., LTD

目 次

1. はじめに.....	1
2. イオン源構造.....	2
2.1 イオン生成部.....	2
2.2 引き出し部.....	2
3. 設計検討.....	3
3.1 プラズマ生成に関する検討.....	3
3.2 引き出し部.....	7
4. 実験装置.....	8
5. 実験結果と考察.....	8
5.1 プラズマ生成.....	8
5.2 ビーム引き出し.....	9
5.3 フィラメント寿命評価.....	11
6. まとめ.....	12
謝辞.....	12
参考文献.....	12

Contents

1. Introduction.....	1
2. Structure of the Ion Source.....	2
2.1 Plasma Generator.....	2
2.2 Extractor.....	2
3. Design.....	3
3.1 Study on Plasma Production.....	3
3.2 Study on Extraction.....	7
4. Experimental Setup.....	8
5. Experimental Results and Discussion.....	8
5.1 Plasma Production.....	8
5.2 Ion Beam Extraction.....	9
5.3 Estimation of Filament Lifetime.....	11
6. Summary.....	12
Acknowledgement.....	12
References.....	12

1.はじめに

FNS(Fusion Neutron Source)は核融合炉の開発で基本的な、エネルギー生産性、燃料自己充足性などを実験的に検証し、それらの核設計精度を確認するために建設された核融合中性子工学研究用 D-T 中性子源である。

1981年に最初のD-T中性子の発生以来、核融合炉で重要なトリチウム増殖率、核発熱率、誘導放射能生成率、遮蔽性能などの D-T 中性子核反応に起因する量の実験を進めるとともに核設計コード及び核データの精度評価の研究を行っている。また、FNS は世界有数の発生強度を誇る中性子源として国際熱核融合実験炉の工学設計活動(ITER/EDA)を支援するための実験を行うとともに、機能材の照射効果、材料損傷の核的現象の実験などへと研究分野を広げ新たな展開を図っている。

これまで用いられてきたイオン源は、大電流用と小電流用のデュオプラズマトロン型イオン源が2台である。老朽化した大電流用イオン源の交換とともに、現状よりも高い中性子発生強度を目的として、新しくイオン源を設計・製作し試験を行なった。試験は那珂研究所の粒子入射試験装置(ITS-2M)にて水素を用いておこなった。

今回の設計に当たっては、既設の電源を用いることが前提となるためイオン生成部に投入するパワーが制限されており、高効率のイオン生成方式が必要となった。そこで今回設計したイオン源は、核融合炉中性粒子入射加熱装置等で実績のあるバケット型を採用した。

今回設計したイオン源は、小さな体積のプラズマ生成部から大電流密度のイオンビームを生成することを目的とし、プラズマ生成部表面積と体積の比率、またアノードとカソードの面積の比率を最適化した設計を行なった。

また、FNS においては D-T 反応による中性子の発生量を増大させるために、イオンビームに含まれる H^+ (D^+) イオンの比率 (プロトン比) を増大させる必要がある。プロトン比を制御するために、プラズマ生成室周囲に設置している永久磁石の位置・強度を変更することの出来る構造とした。

本報告では、イオン源の構造について述べた後、プラズマ生成・イオン引き出しに関する設計検討について述べ、水素を用いた試験の結果について報告する。

2.イオン源構造

2.1 イオン生成部

図2-1にFNS用重水素イオン源の断面図を示す。プラズマ生成部は無酸素銅製で直径120mm、高さ100mmの円筒形である。プラズマ生成部の側壁・天板及びプラズマ電極支持枠にはサマリウム-コバルト製の永久磁石が配置され、プラズマを閉じ込めるために10極のカスプ磁場を形成している。プラズマ電極支持枠内磁石及びアークチェンバー側壁磁石の配置を変更することによって、磁気フィルターを形成しアークチェンバー中のプラズマ密度勾配を変化させることが出来る。図2-2に磁気フィルター無しの際のアークチェンバー内中心軸(=ビーム軸)上の磁束密度分布を示す。x=0(天板内壁上)の近傍では天板に配置された磁石によって強い磁場が形成されるがすぐに減衰し、アークチェンバーの広い範囲で無磁場領域が形成されている事が分かる。この時のプラズマ電極近傍での磁場強度BIは約1.4 Gauss・cmである。プラズマ電極支持枠中の磁石配置を変更して弱いフィルター磁場配位にした時の磁束密度分布を図2-3に、さらにアークチェンバー側壁の磁石配置を変更して、強いフィルター磁場配位にした時の磁束密度分布を図2-4に示す。プラズマ電極近傍での磁場強度BIは弱いフィルター磁場配位で約115 Gauss・cm、強いフィルター磁場配位で約334 gauss・cmである。

アークチェンバーの天板には2本の同軸型フィラメント導入端子用ポートが設置され、ウィルソンシール構造によって、容易に同軸型フィラメント導入端子が交換できるようになっている。フィラメント導入端子の先には直径φ1.2mm、長さ110mmのタングステンフィラメントが取り付けられている。天板部にはさらに2つのφ6mmポートが設けてあり、ガス供給及び、イオン源内ガス圧の測定用として使用した。

2.2 引き出し部

プラズマ生成部で生成された水素イオンは、引き出し電極系から引き出される。電極系は、プラズマ電極・減速電極・接地電極の3枚電極系にて構成されている。それぞれの電極には引き出し孔が1つ設けられている。プラズマ電極は無酸素銅製で電極孔径はφ12mm、孔部の厚さは4.0mmである。このプラズマ電極は挿り鉢状のプラズマ電極支持枠の底部中心に設置されている。支持枠のプラズマ電極を囲む面にはアークチェンバー側壁の磁石と対応した位置に永久磁石が配置されて、カスプ磁場を形成している。これによってプラズマの閉じ込めはより強力になっている。プラズマ電極には最大50kVの電位が印加される。減速電極には、引き出されたイオンによってビームライン内で生成される電子の逆流を防ぐために、-5~-7kVの電位が印加される。プラズマ電極-減速電極間距離は8.9mm、減速電極-接地電極間距離は4.5mmである。これらの3枚の電極及びプラズマ電極支持枠には水冷用の銅パイプがロウ付けされており、長時間連続運転が可能となっている。

3. 設計検討

3.1 プラズマ生成に関する検討

3.1.1 全イオン損失面積

多極磁場型プラズマ生成部における全イオン損失面積 S_L は次のように書ける。

$$S_L = S_A + S_F + K \beta S_p$$

この時 S_A はアノード損失面積、 S_F はカソード面積であり、 S_p はプラズマ電極の面積である。係数 β はプラズマ電極中で実際にプラズマに接して損失となる面積の割合を示し、 K はプラズマ電極近傍でのプラズマ密度勾配に関する換算係数である。ここで $K=0.3$ とする。この値は負イオン源における磁気フィルターによって形成されるプラズマの密度勾配に等しい。又プラズマ電極上に形成されるラインカスプも換算する必要がある。

アノード損失面積は、カスプ部の全長 L_C とイオンのラーマー半径との積で近似できる。すなわち、

$$S_A = 2 L_C (M_i v_i / eB)$$

ここで B はアークチェンバー内壁表面での磁界である。イオンがチェンバー内壁に衝突する速度 v_i はイオン音速 C_s と等しいので、

$$v_i = C_s = (kTe / M_i)^{1/2}$$

となる。ここで $B = 1.1 \text{ kG}$, $L_C = 120 \text{ cm}$, $Te = 5 \text{ eV}$ とすると

$$S_A = 49 \text{ cm}^2$$

である。

カソード面積は、直径 1.2 mm ϕ 、長さ 16 cm のフィラメントを2本使うとすると、おおよそ

$$S_F = 12 \text{ cm}^2$$

プラズマ電極実効損失面積は

$$K \beta S_p = 0.3 \times 0.5 \times 6 \times 6 \times \pi = 17 \text{ cm}^2$$

よって全イオン損失面積は、

$$S_L = 78 \text{ cm}^2$$

プラズマ閉じ込めの目安となる、イオン損失特性長 V_p / S_L は

$$V_p / S_L = 707 \text{ cm}^3 / 78 \text{ cm}^2 = 9.06 \text{ cm}$$

である。

3.1.2 イオン生成

単位時間当たりのイオン生成レート I_+ は以下のように与えられる

$$I_+ = e n_p n_0 \langle \sigma v \rangle_1 V_p + e n_e n_0 \langle \sigma v \rangle_2 V_p \quad \dots (3.1)$$

ここで、

- I_+ : イオン生成レート
- n_e : 熱電子の密度
- n_p : 一次電子の密度
- n_0 : 中性ガス密度
- $\langle \sigma v \rangle_1$: 1次電子によるイオン化の rate coefficient
- $\langle \sigma v \rangle_2$: 熱電子によるイオン化の rate coefficient

一方、イオンはプラズマシースを通してイオン音速をもって損失すると仮定して、イオンの損失量は次式のように与えられる。

$$I_+ = 1/2 e n_e C_S S_L = 1/2 e n_e (kT_e / M_i)^{1/2} S_L \quad \dots (3.2)$$

次に、一次電子電流は、

$$I_e = (e n_p / \tau_e) V_p + e n_p n_0 \langle \sigma v \rangle_3 V_p \quad \dots (3.3)$$

で与えられる。ここで、

- τ_e : 1次電子の保持時間
- $\langle \sigma v \rangle_3$: 1次電子減速の rate coefficient

また、1次電子の保持時間 τ_e は次式で与えられる。

$$\tau_e = 4V/v_e A_a \quad \dots\dots (3.4)$$

v_e : 1次電子の速度
 A_a : 1次電子の実効損失面積 $\sim S_A + K \beta S_p$
 V : 放電容器の体積

(3.1) 式に (3.2), (3.3) 式を代入して整理すると、イオン生成レート I_+ は

$$I_+ = f \frac{n_0 \langle \sigma v \rangle_1}{1 / \tau_e + n_0 \langle \sigma v \rangle_3} I_e \quad \dots\dots (3.5)$$

$$f = \frac{1}{1 - \frac{2 V_p n_0 \langle \sigma v \rangle_2}{(kT_e / M_i)^{1/2} S_L}} \quad \dots\dots (3.6)$$

となる。

(3.4) 式に、 $v_e = 4.9 \times 10^8$ cm/s (70eV), $A_a = 66$ cm², $V = 1250$ cm³ を代入すると1次電子の保持時間 τ_e は

$$\tau_e = 0.15 \times 10^{-6} \text{ (s)}$$

となる。また、 $V_p = 707$ cm³, $n_0 = 1.08 \times 10^{14}$ cm⁻³ (0.4Pa), $T_e = 5$ eV, $S_L = 78$ cm²,

$\langle \sigma v \rangle_2 = 3 \times 10^{-10}$ cm³/s を (6)式に代入すると、 f は 1.367 となる。

次に、 $\langle \sigma v \rangle_1 = 3 \times 10^{-8}$ cm³/s, $\langle \sigma v \rangle_3 = 3 \times 10^{-8}$ cm³/s を(3.5)に代入すると、イオン生成レートは以下ようになる。

$$I_+ = 0.45 I_e$$

プラズマ電極近傍でのプラズマ密度勾配を考慮すると、150 mA/cm² の水素正イオンビームを引き出すためには 0.5 A/cm² の飽和イオン電流密度のソースプラズマが必要であると考えられる。この場合の全イオン電流は、

$$I_+ = 0.5 \text{ (A/cm}^2\text{)} \times S_L = 0.5 \times 78 = 39 \text{ A}$$

となるので、必要な1次電子電流は、

$$I_e = 39 / 0.45 = 87 \text{ A}$$

である。

アーク放電電流は、1次電子電流とカソードに流入するイオン電流の和であり、以下の式で表される。

$$I_{\text{arc}} = I_e + I_i = I_e + \alpha (m_e / M_i)^{1/2} I_e \quad \dots\dots (3.7)$$

ここで係数 α は無次元数であり、この場合およそ2.9をとる。よって必要なアーク放電電流は、

$$87 \times (1+0.0677) = 93 \text{ A}$$

となる。

3.1.3 運転ガス圧

安定なアーク放電を生成するためには、カソード近傍にカソードシースが形成され、次に示すラングミュア条件を満足しなければならない。

$$J_i > \alpha (m_e / M_i)^{1/2} J_e \quad \dots\dots (3.8)$$

ここで、 J_i はイオン電流密度、 J_e は電子電流密度である。

J_i 及び J_e は、 $J_i = I_i / S_L$, $J_e = I_e / S_F$ と表せるから、これらの式と式(5)を式(8)に代入して以下のような中性ガス密度の条件が導かれる。

$$n_0 > \frac{S_L \alpha (m_e / M_i)^{1/2}}{S_F f \tau_e \langle \sigma v \rangle_1} \frac{1}{(1 - \alpha (m_e / M_i)^{1/2}) \frac{S_L \langle \sigma v \rangle_3}{f S_F \langle \sigma v \rangle_1}} \quad \dots\dots (3.9)$$

ここで f は n_0 の関数であるが、今考えている低いガス圧では $f = 1.3$ を与えるとする。
式(9)をこのイオン源の数値で計算すると

$$n_0 > 1.14 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

となり、安定なアーク放電を行うには 0.42 Pa (3.16 mTorr)以上のガス圧が必要であると考えられる。

3.1.4 プロトン比

プロトン比 G に関するスケーリング則は奥村他の文献[1]より

$$G = \frac{0.23 V_p / S_L}{(1+0.23 V_p / S_L)}$$

ここで V_p はプラズマの体積であり、 S_L は全イオン損失面積である。このイオン源に関するそれらの数値、 $V_p = 707$ 、 $S_L = 78$ を代入すると、プロトン比は、

$$G = 0.68$$

と予想される。

3.2 引き出し部

引き出し部は単孔・1段加速系を用いる。引き出し孔径は $\phi 12 \text{ mm}$ で引き出し面積は 1.13 cm^2 となる。引き出し電圧は 50 kV とする。これらの条件を基に2次元ビームシミュレーションコード(BeamOrbit)で計算したビーム軌道とエミッタンス図の例を図3-1、3-2に示す。この例では、ビーム電流 114 mA 、発散角は約 10 mrad となっている。この計算ではイオン温度をゼロと仮定しているが、実際には水素正イオンの温度はかなり高い($\sim 5 \text{ eV}$)ため、ビームの発散角は 10 mrad 以上になると考えられる。

4.実験装置

試験は那珂研究所の粒子入射試験装置(ITS-2M)にて水素を用いておこなった。直径約 1.7m の真空容器とそれに接続された長さ約 5.7m のビームラインを、排気速度 2200l/min のターボ分子ポンプを 3 台用いて真空排気している。また、排気速度 10000l/min のクライオポンプも設置されており状況により使用した。

イオン源は真空容器のビームラインに正対する位置に設置され、高電圧架台よりプラズマ生成用電力及び水素ガスを供給した。ビームラインには独立した水素ポンプが接続されており、このポンプからビームラインに水素ガスを流すことによって、プラズマ生成室のガス圧を変えることなくビームラインのガス圧を変化させる事が出来る。

引き出されたイオンの電流値と発散角は、接地電極から 1471 mm に設置された 2 次元マルチチャンネルカロリメーターで熱的に測定される。ただしこのカロリメーターに長時間イオンビームを照射するとカロリメーターが溶融するので、連続運転時のビーム電流値はカロリメーターで測定せずに、加速電源の電流値としている。

プロトン比はドップラーシフトした水素原子のバルマーアルファ光を利用した分光計測[2]によって測定した。

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を変化させたときのアーク電流—電圧特性を示す。この時のイオン源内ガス圧は 1.3 Pa である。アークパワー 6.3 kW まで安定な放電が維持されていることが確認された。フィラメント電圧の低いときには、そのアーク特性からアーク放電が高インピーダンスであり、フィラメント電圧が 7.5 V の時に低インピーダンス放電となっていることがわかる。

図 5-2,3 にイオンビーム電流（全イオン電流）のアークパワー効率を示す。図 5-2 はアークチェンバー内に磁気フィルターをつけていない時の結果であり、図 5-3 はプロトン比向上のために磁気フィルター配位にしたときの結果である。磁気フィルター配位の時、アークパワー 3 kW でイオン電流は約 130 mA が得られた。重水素ビームに換算すると、質量比のみを考慮した場合で約 92 mA となる。

イオン電流はアークパワーに比例して増大し、そのアーク効率は、磁気フィルター無しの場合で 67 mA/kW、磁気フィルター付きで 47 mA/kW である。磁気フィルター付きの方がアーク効率は低くなっている原因として、磁気フィルターによってアークチェンバー内のプラズマの密度勾配が大きくなり、プラズマ電極近傍でのイオン電流が減少している為であると考えられる。放電可能ガス圧は、0.43 Pa である。これは 3 章イオン生成に関する検討で予想した値 0.42 Pa とよく一致している。

5.2 ビーム引き出し

5.2.1 ビーム光学

イオン源下流に設置したマルチチャンネルカロリメーターで測定したイオンビームの発散角とビーム電流値の関係を図 5-4 に示す。空間電荷効果によるイオンビームの発散を抑制するために、真空容器に直接水素ガスを導入しビームドリフト空間のガス圧を 0.05 Pa に保っている。図に於いて、黒丸は垂直方向の、白丸は水平方向の発散角である。加速電流を変化させても最小発散角はほぼ同じ約 10 mrad であった。

最小の発散角を与える最適電流値を引き出し電圧（ビームエネルギー）の関数として示したものが図 5-5 である。引き出し電圧の約 1.6 乗に比例して最適電流値が増加する。3/2 乗則からのずれは、電流値が増大するとプロトン比が増加し、等価質量が減少するためである。

図 5-5 における 2 つの結果の差は、磁気フィルターの有無による差である。磁気フィルターを付けるとプロトン比が増加するために等価質量が小さくなり最適ビーム電流値が増加するためである。

5.2.2 空間電荷効果

引き出されたイオンビームは自身の電荷によって反発し発散する。図 5-6 に真空容器（ビーム輸送領域）の水素ガス圧とビーム発散角の関係を示す。ビーム輸送領域でイオンビームが水素ガスと衝突することによってビームプラズマが生成され空間電荷効果は抑制される。0.05 Pa 程度から低いガス圧で、ビームの発散角は増大している。一方ガス圧が高くなりすぎると、ガス分子との衝突による散乱でビーム発散角は増大する。0.1 Pa 以上のガス圧領域でのビーム発散角の増大は、この散乱によるものと考えられる。

5.2.3 プロトン比

水素イオンビーム中には、水素原子イオン H_1^+ 以外に、 H_2^+ 、 H_3^+ の水素分子イオンや H_2O^+ などの不純物イオンが含まれる。このビームのイオン組成比を、ドップラーシフトした水素原子のバルマーアルファ光を利用した分光計測[2] で測定した。

イオン源から引き出された水素イオンは、真空容器内の水素ガスによって解離、中性化された後に励起され発光する。このとき発する光の大部分はバルマーアルファ ($H\alpha$) 光である。速度 v をもったイオンが放出するドップラーシフト光を角度 θ から見るとき、観測される光の波長 λ は、

$$\lambda = \gamma \cdot (1 - \beta \cos \theta) \lambda_0 \quad \dots\dots (5.1)$$

$$\beta = v/c, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

で表せる。ここで c は光速、 λ_0 は速度 0 のビームが発する光の波長である。図 5-7 にフィルター磁場有り、引き出し電圧 40kV のドップラーシフトスペクトルの一例を示す。この時の真空

容器のガス圧 P_{vac} は 0.05 Pa、イオン源からビーム観測点までに存在する水素ガス線密度は 0.2×10^{16} 個 / cm^2 である。集光レンズとビームとのなす角度 θ は 110° なので、高速粒子の光は長波長側にシフトする。図 5-7 で左端の大きなピークはドップラーシフトしていない $H\alpha$ 光で、ビームプラズマ中の水素原子がビームによって励起して発する光である。その長波長側（右側）に見える 4 本のピークは、イオン源から引き出されたイオンの発する光で、短波長側から順に、不純物 (H_2O^+ など)、 H_3^+ 、 H_2^+ 、 H_1^+ 、に対応する。これら 4 つのピークの面積比を求め、これらをそれぞれのイオンの解離、中性化断面積（水素ガス線密度の関数）、水素原子の励起・発光断面積を考慮した係数 [2] で補正すると、ビームのイオン組成比が求められる。図 5-7 の場合、プロトン比（水素イオン H_1^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ に対する H_1^+ の割合）は 88.2%、不純物量（すべてのイオンに対する不純物の割合）は 2.0% となる。アークチェンバー内に磁気フィルターを設置することによってプロトン比を向上させることが出来る。磁気フィルターを設置すると前述したようにアーク効率が低下する。その為に最適なビーム電流を得るために大きなアークパワーを投入する必要がある、これによって水素原子の解離が進むものと考えられる。さらにプラズマ電極近傍で水素分子イオン (H_2^+ 、 H_3^+) が生成されると、これらの分子イオンはプロトンに解離する間もなくビームとして引き出されてしまうので、その結果ビーム中のプロトン比は下がってしまう。しかしながら磁気フィルターを設置することによって、プラズマ電極近傍は低速電子のみになるので、水素分子イオンの生成を押さえる事ができ、結果としてプロトン比が向上する。図 5-8 にアークチェンバー内の磁場強度と水素イオン種比率の関係を示す。磁場強度の増加に従って、プロトン比が増加していることが分かる。

5.2.4 不純物量

フィラメント交換等のイオン源・ビームラインのメンテナンスの為にイオン源を大気解放した後は、ビーム中には大量の軽元素不純物（主として大気中の水分に起因する H_2O 、 H_3O 、 OH 、 O ）が含まれる。単にイオン源を真空排気するだけではイオン源表面に吸着した不純物を減衰させるには、長時間の排気が必要となる。アーク放電及びビーム引き出しを行うことによって、水素放電の還元作用及びスパッタリングによって、不純物の減衰時間を短くすることが出来る。図 5-9 にイオン源及びビームラインを約 12 時間大気解放した後にイオン源を連続運転したときのビームに含まれる不純物量の時間変化を示す。

運転開始直後には 10% 以上の不純物がビームに含まれていたが、その後急激に減少する。しかしながら 1% 台まで減少させるには、2 日以上連続運転が必要であった。

5.3 フィラメント寿命評価

熱電子放出用として 1.2 mm ϕ のタングステンフィラメントを用いて、15 時間の定格連続運転 (540keV, >100mA) を行った後、フィラメントの損耗量を測定した。

重量の減少は

$$2.599 \text{ g} \rightarrow 2.573 \text{ g} \quad (\text{減少量は } 0.026 \text{ g} \cdots 1\%)$$

であった。

ここで、フィラメントは直径 90% (重量で 81%) まで使用可能であり、局所的に放電が集中しないと仮定すれば、予想される寿命は

$$19 \times 15 \text{ hours} = 285 \text{ hours}$$

となる。

一週間あたりの運転時間を 40 時間とすると、フィラメント交換の頻度は 7 週毎となる。

6.まとめ

今回、FNS 用新型イオン源を設計製作し、試験を行った。その結果、イオン電流量・プロトン比・アーク効率等で、設計要求を満足する結果を得ることが出来た。表1に設計値と実験で得られた結果をまとめる。

表1 実験結果のまとめ

	設計値 (D ⁺)	設計値 (H ⁺)	実験結果 (H ⁺)
ビームエネルギー	50 keV	←	50 keV
ビーム電流(Total)	>67 mA	>95 mA	130 mA
ビーム電流(Proton)	>42 mA	>60 mA	101 mA
イオン種	D ⁺	H ⁺	H ⁺
ビーム発散角	<17 mrad	←	13 mrad
プロトン比	>65%	←	80 %
パルス幅	DC	←	DC
アークパワー	5 kW	←	3 kW

実験結果から、重水素運転時のビーム電流を質量比から予想すると、全ビーム電流は約 92mA、重水素イオンビーム電流は約 71mA となり、設計値を十分満足する。

今後、FNS ビームラインへ取り付け、重水素での運転を行う必要があるが、その際ビームの発散が課題として残る。空間電荷効果の実験結果から分かるように、ビーム輸送領域のガス圧が低いと大電流ビームは発散する。FNS のビームラインに取り付ける際には、可能な限り偏向磁石にイオン源を近づけるか、何らかの収束機構が必要である。

謝辞

本実験において、装置の運転・保守などに協力いただいた原子力エンジニアリング(株)の阿部宏幸氏に深く感謝します。また、有意義な議論や助言を頂いた NBI 加熱研究室のみなさまに感謝いたします。

参考文献

- [1] Y.Okumura et al., ; Rev.Sci.Instrum. 55,1(1984)
 [2] 奥村義和、小原祥裕、柴田猛順 ; JAERI-M 9653 (1981)

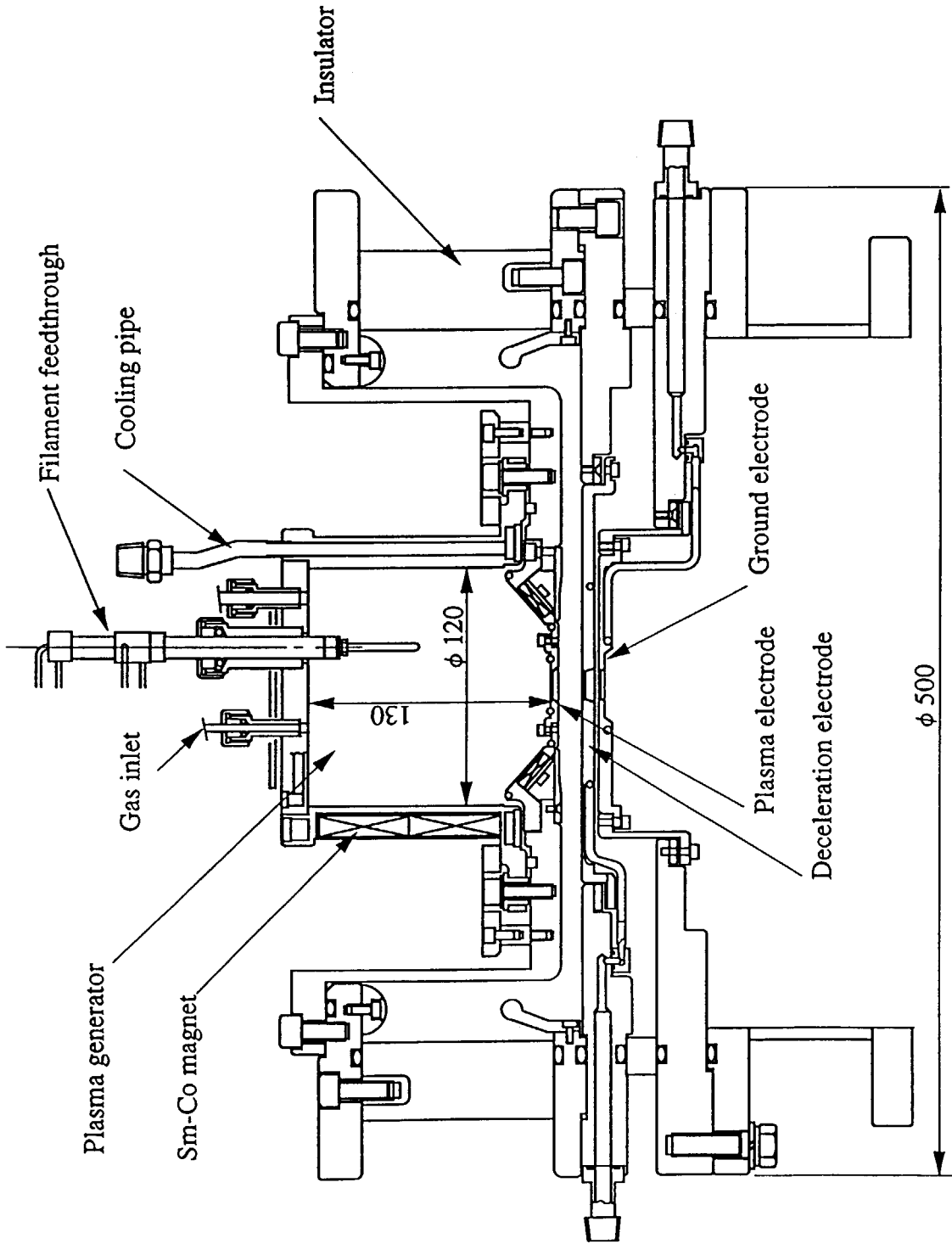


図 2-1 FNS 用バケット型イオン源断面図

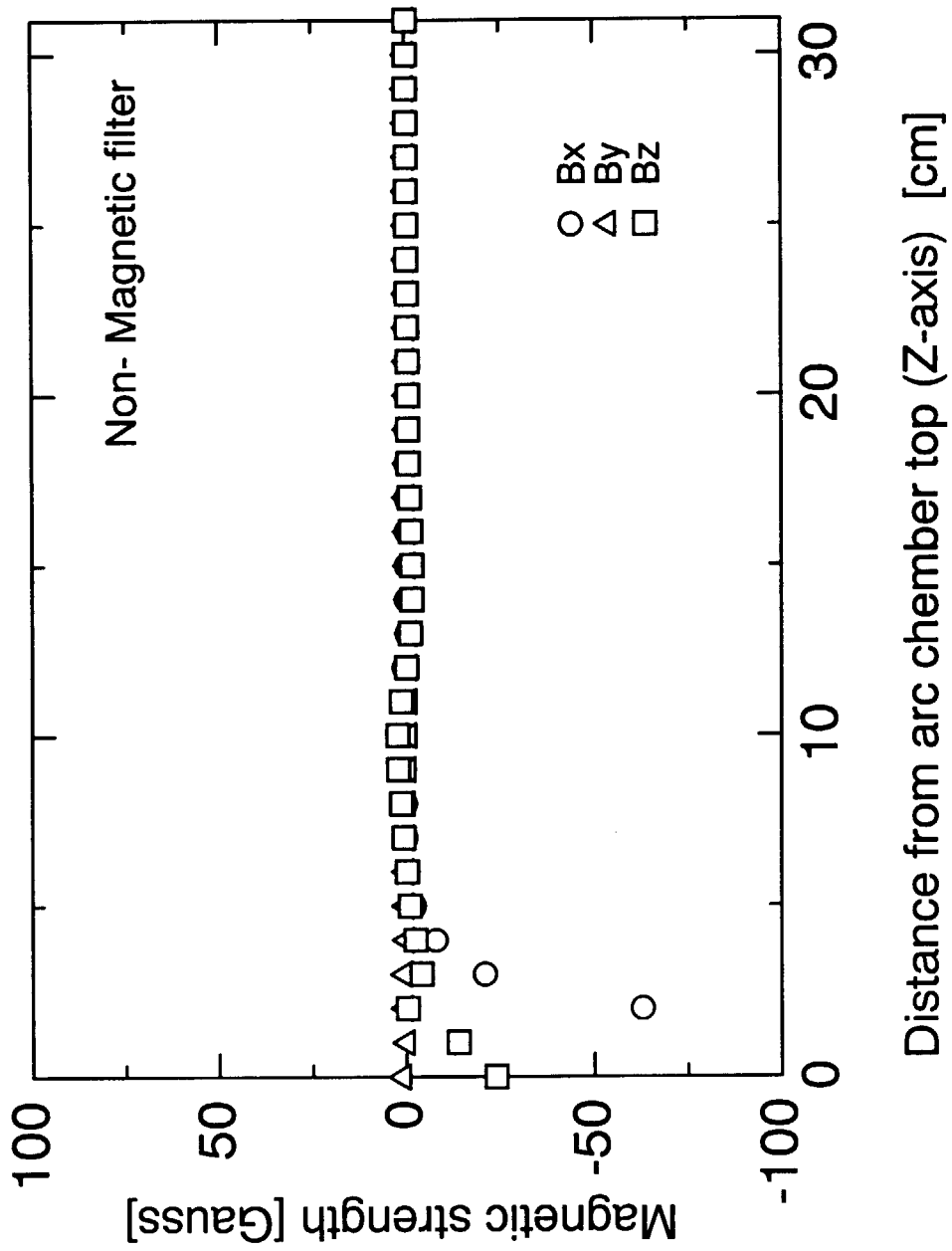


図2-2 アークチェンバー内磁束密度分布 (磁気フィルター無し)

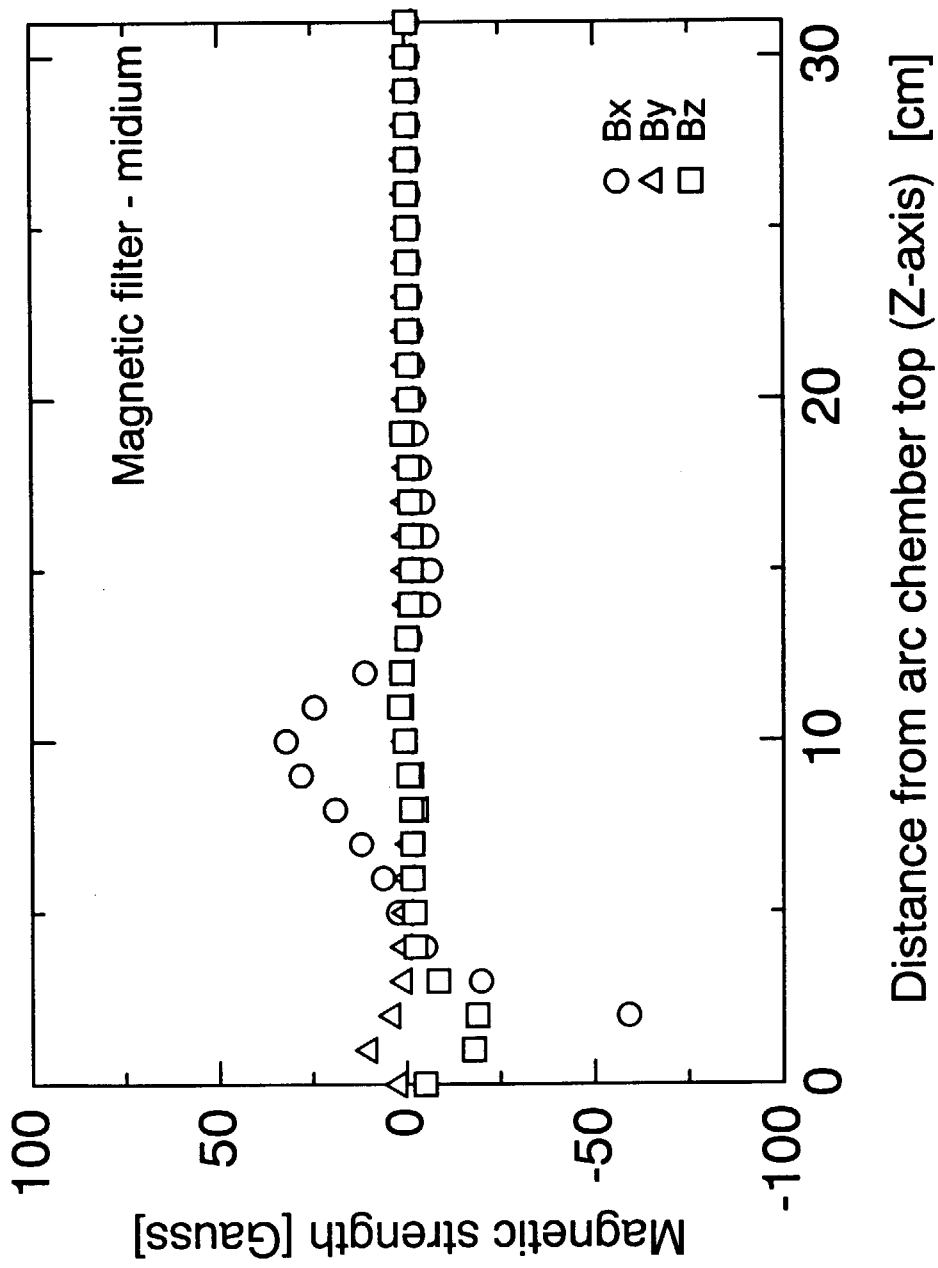


図2-3 アークチェンバー内磁束密度分布 (弱磁気フィルター配位)

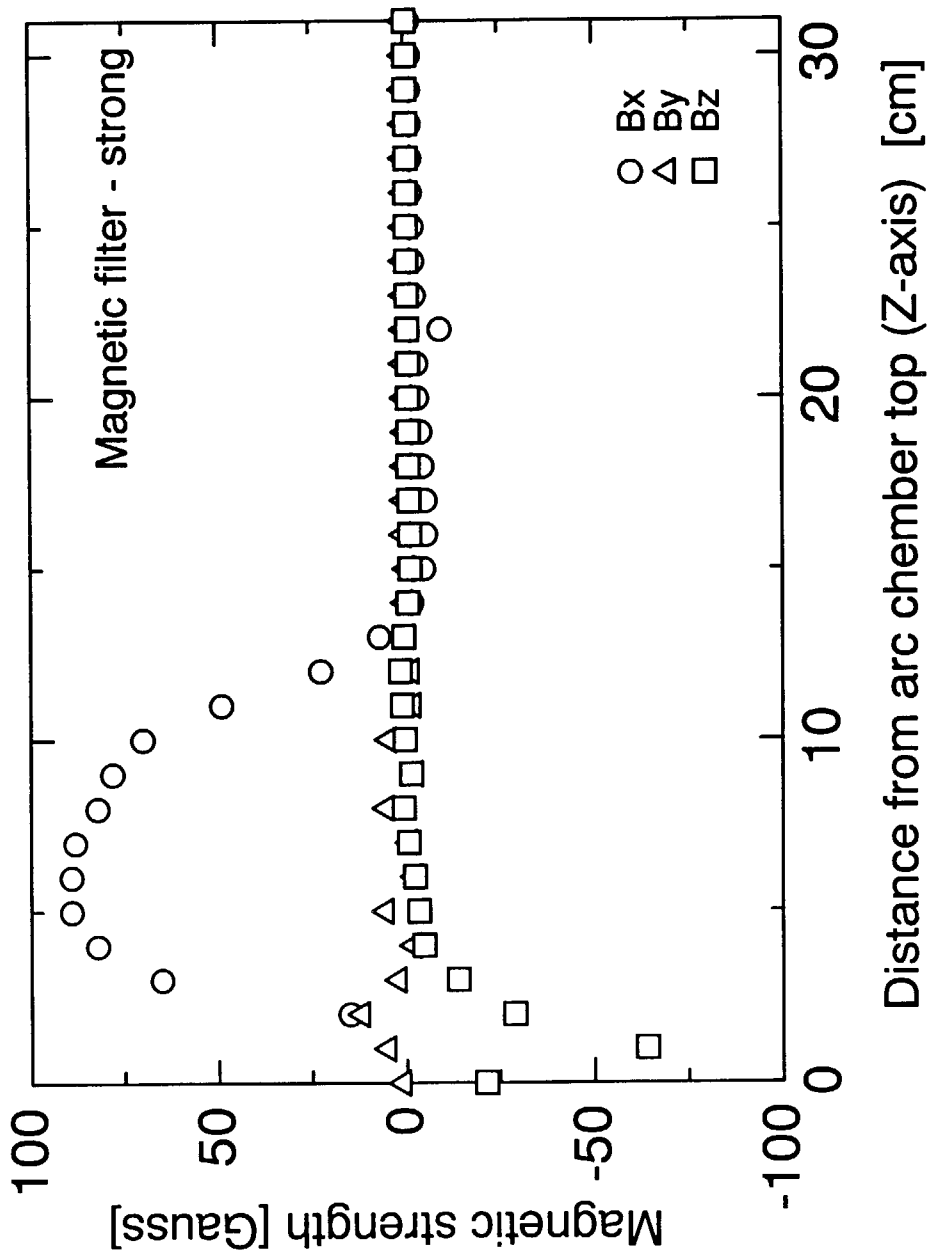


図2-4 アークチェンバー内磁束密度分布 (強磁気フィルター配位)

**** HIGH BRIGHTNESS ION SOURCE FOR FAST NEUTRON SOURCE ****

Current Density = 1.5000E+02 (mA/cm²)
 Total Current = 1.1114E-01 (A)
 Perveance = 9.9405E-09 (A/V**1.5)
 Minimum Potential = -1.5453E+03 (V) AT Z = 2.4304E-02 (m)
 Divergence (RMS) = 5.8906E-01 (Deg)
 Electron Temperature = 0.0000E+00 (eV)
 Ion Temperature = 0.0000E+00 (eV)

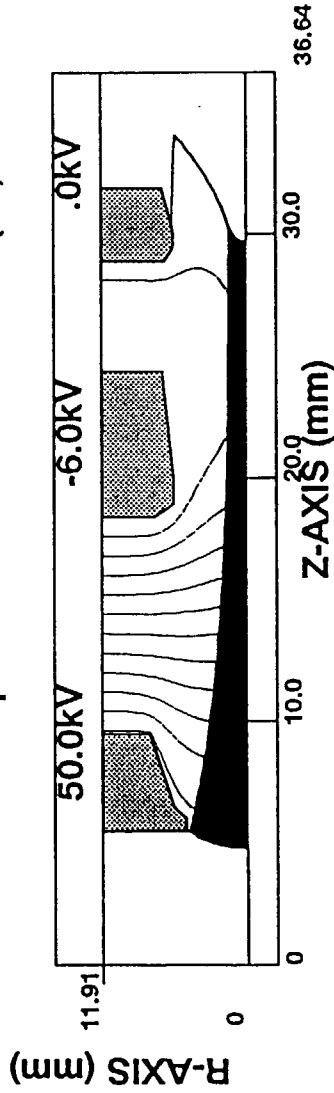


図3-1 ビーム軌道計算結果の一例

EMITTANCE DIAGRAM

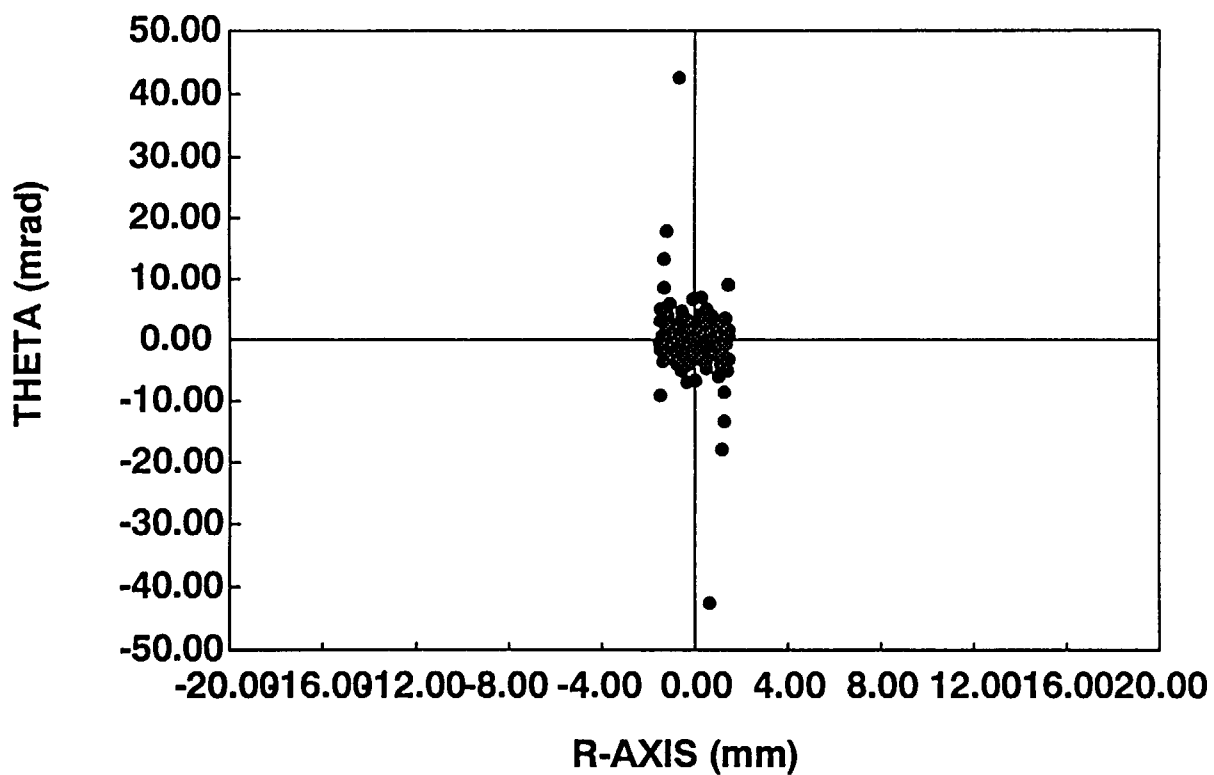


図3-2 エミッタンス計算結果の一例

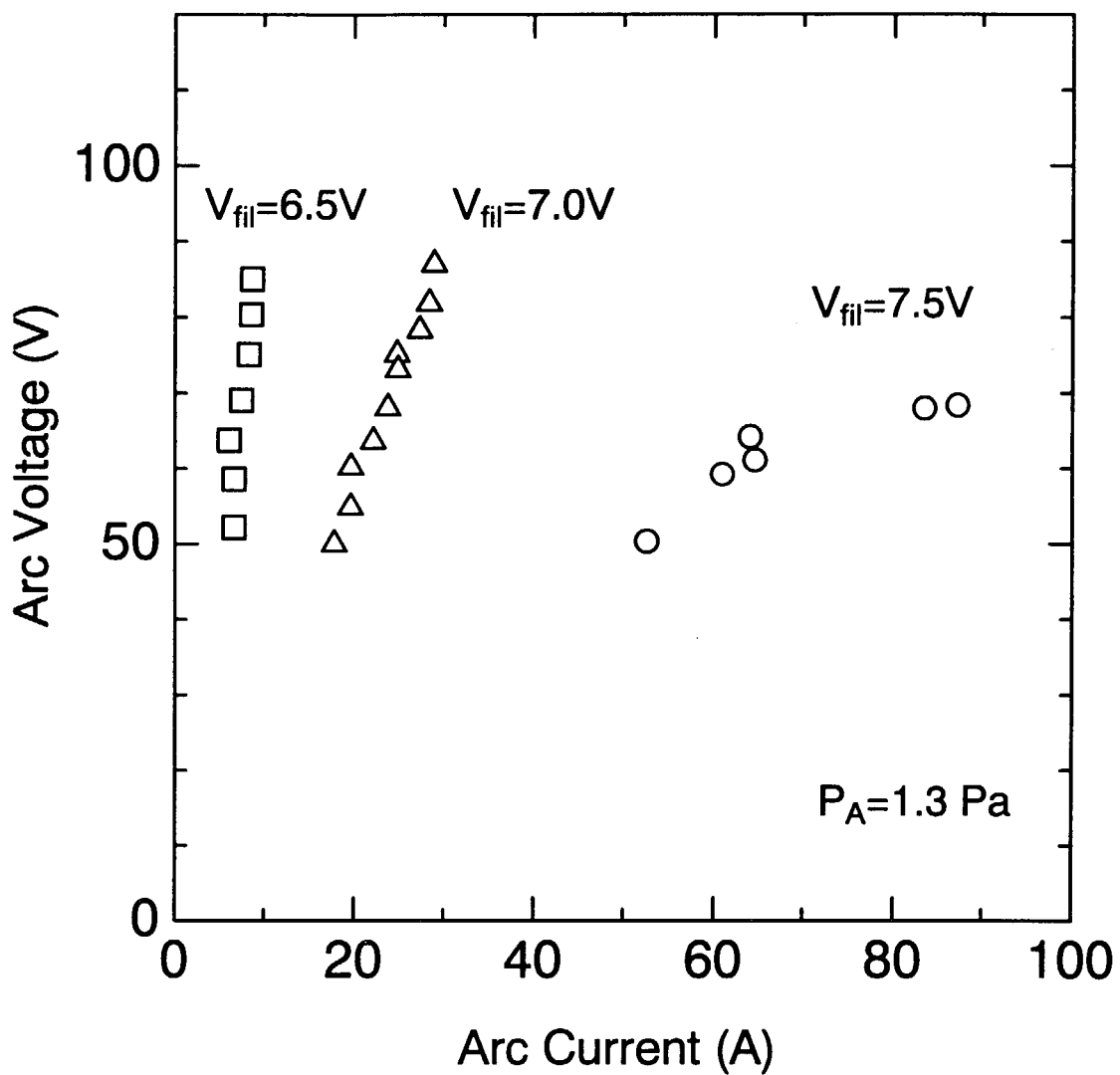


図5-1 アーク電流－電圧特性

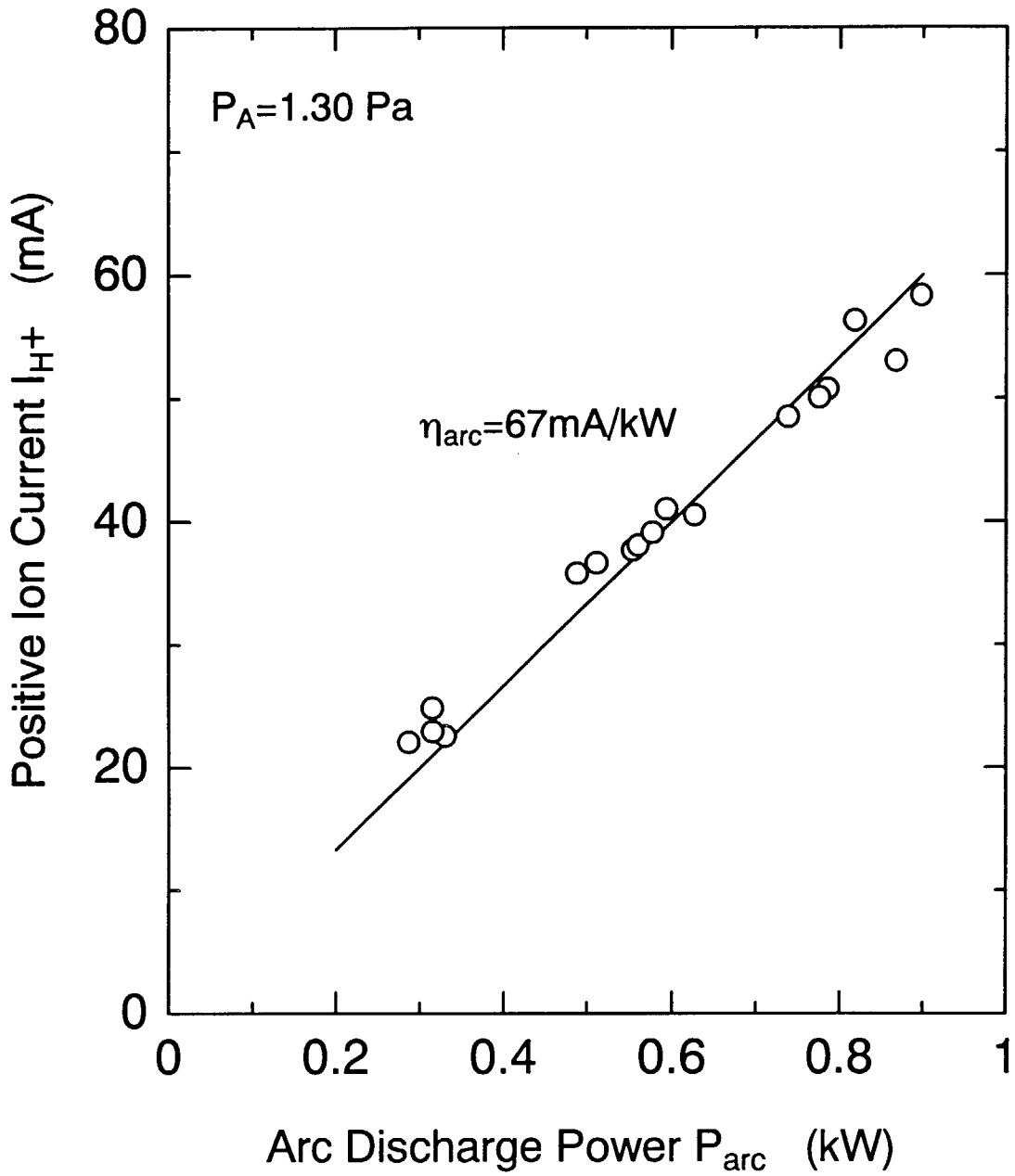


図 5-2 イオンビーム電流のアークパワー特性
(磁気フィルター無し)

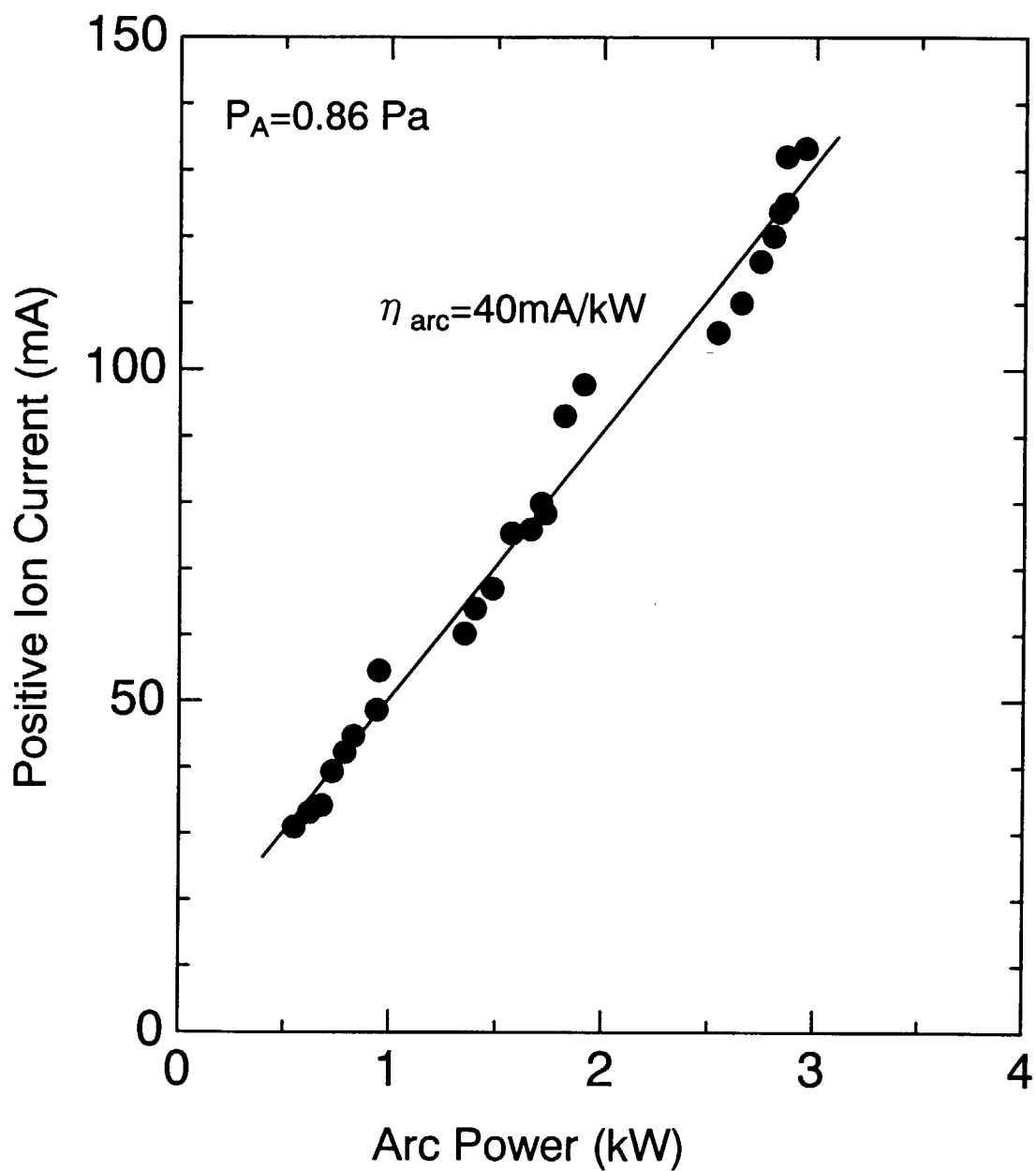


図 5-3 イオンビーム電流のアークパワー特性
(強磁気フィルター)

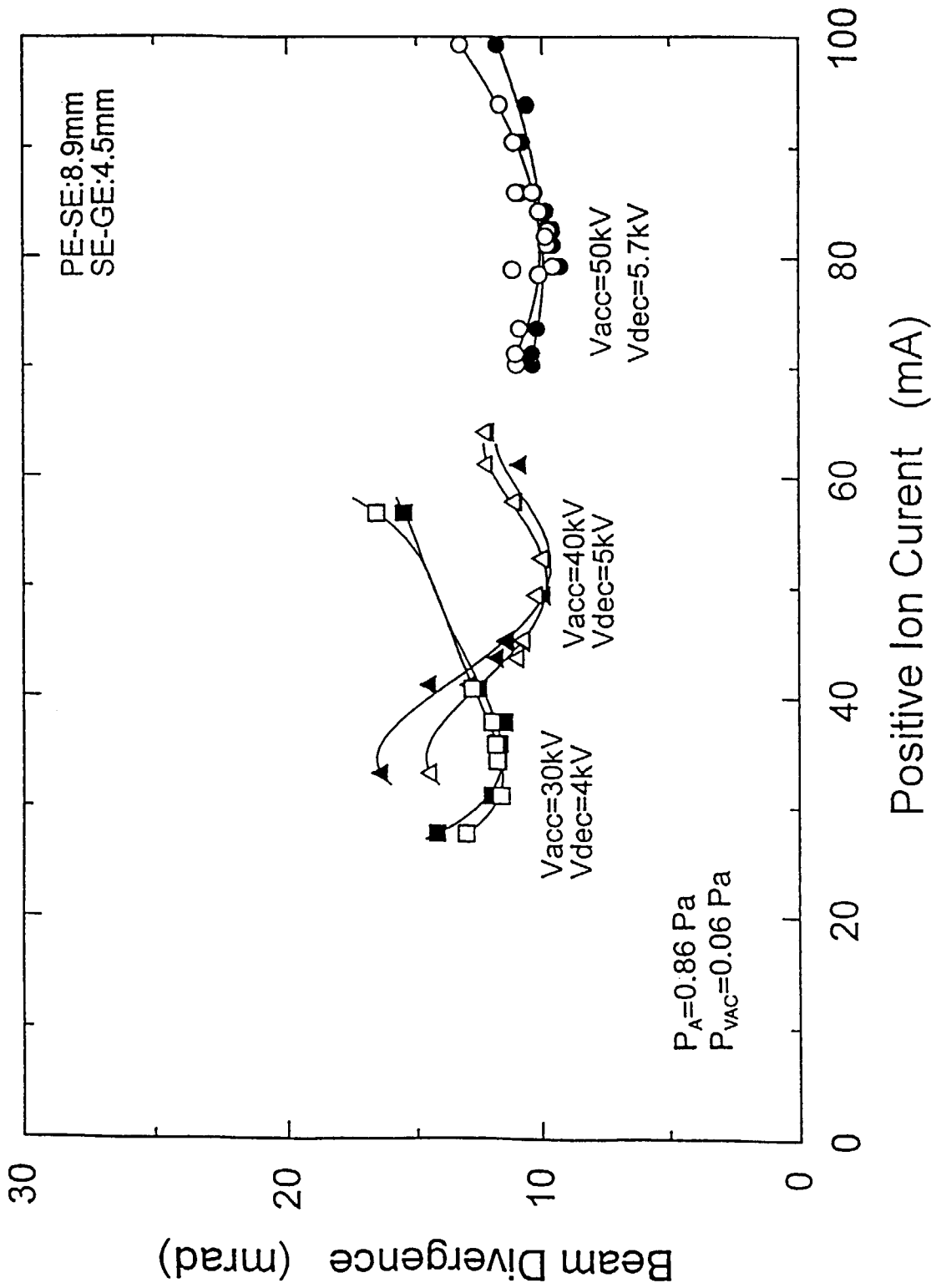


図 5-4 イオンビーム発散角のビーム電流特性

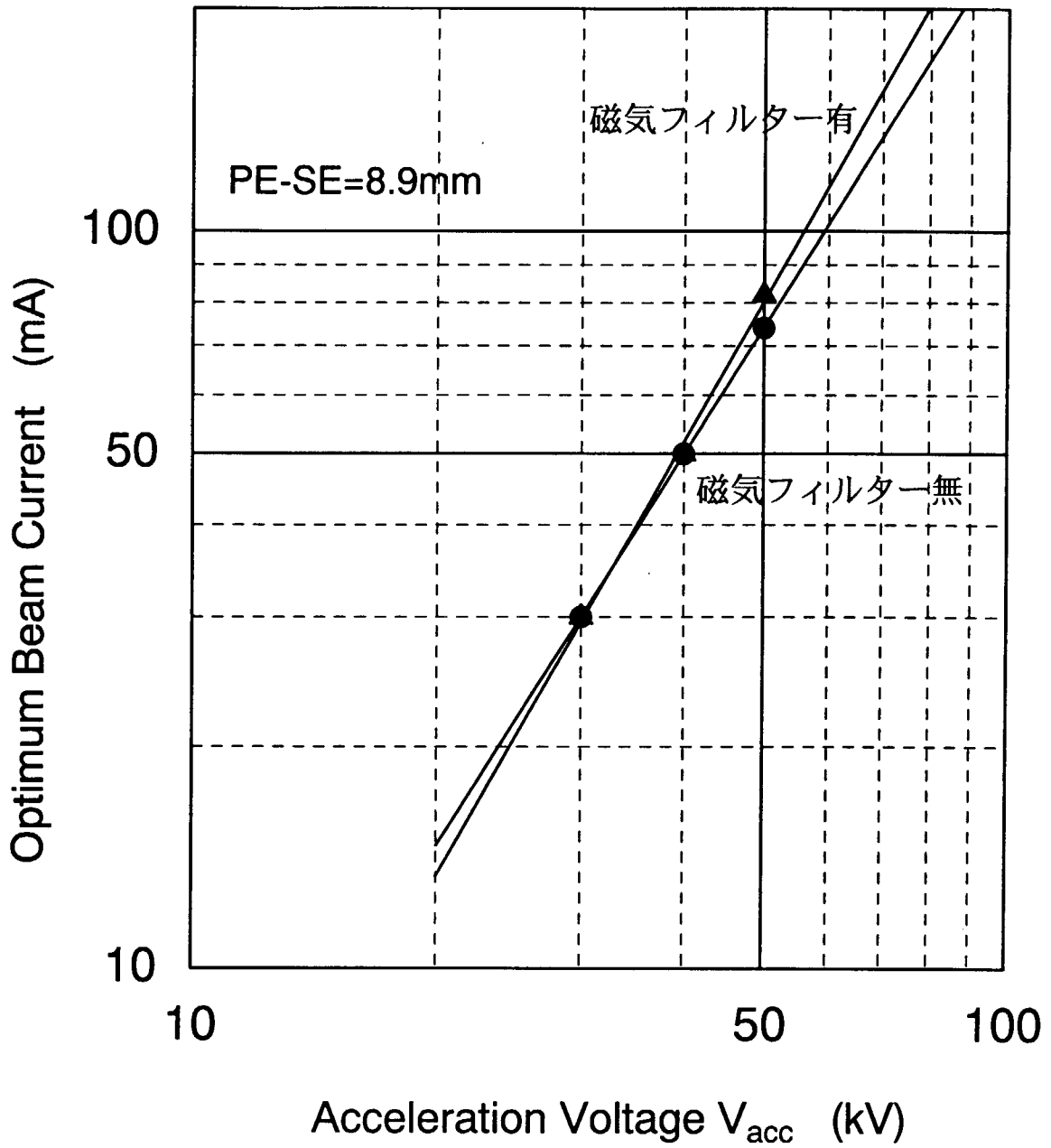


図 5-5 イオンビーム電流のビームエネルギー特性

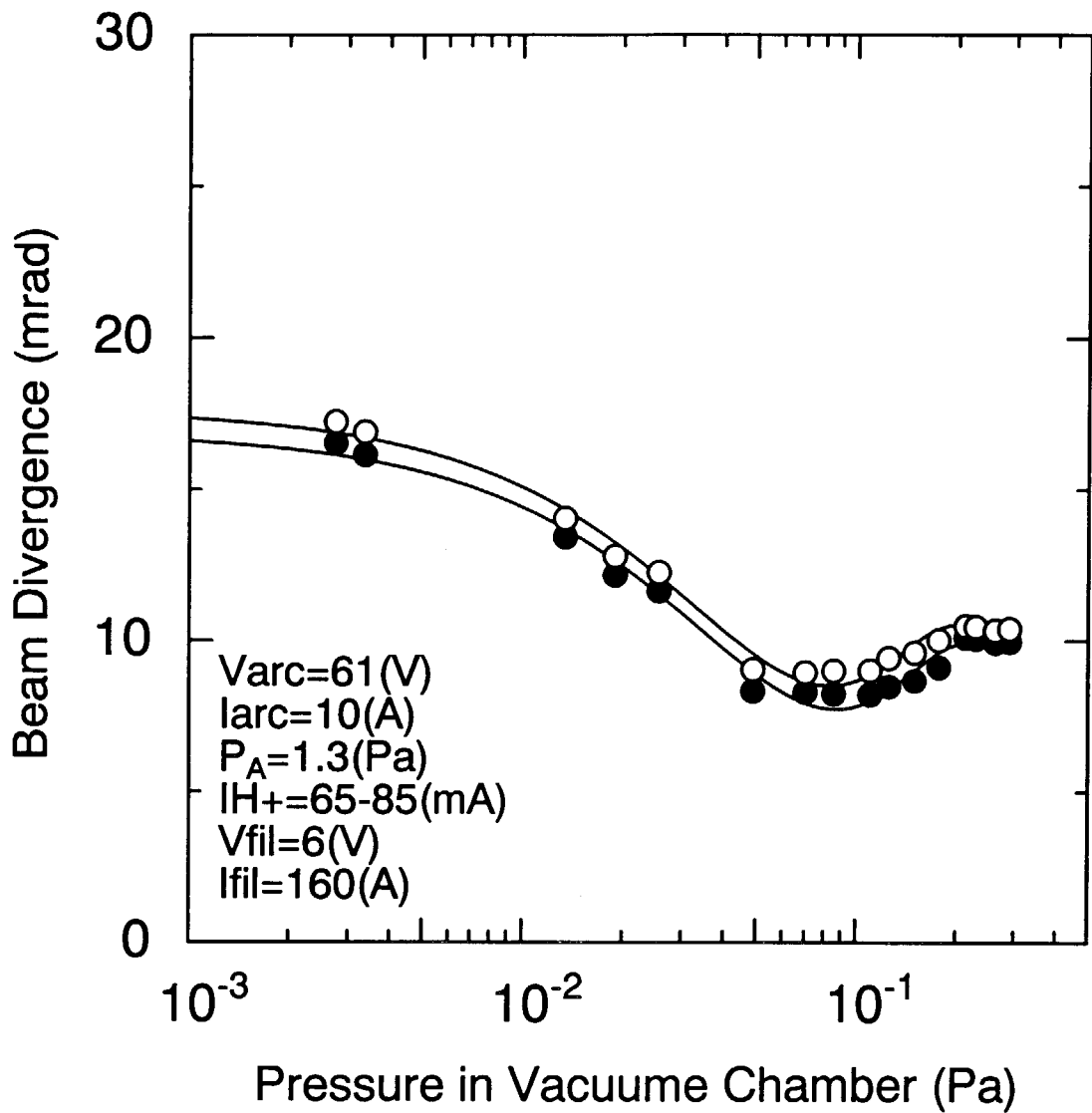


図 5-6 イオンビーム発散角のビームラインガス圧特性

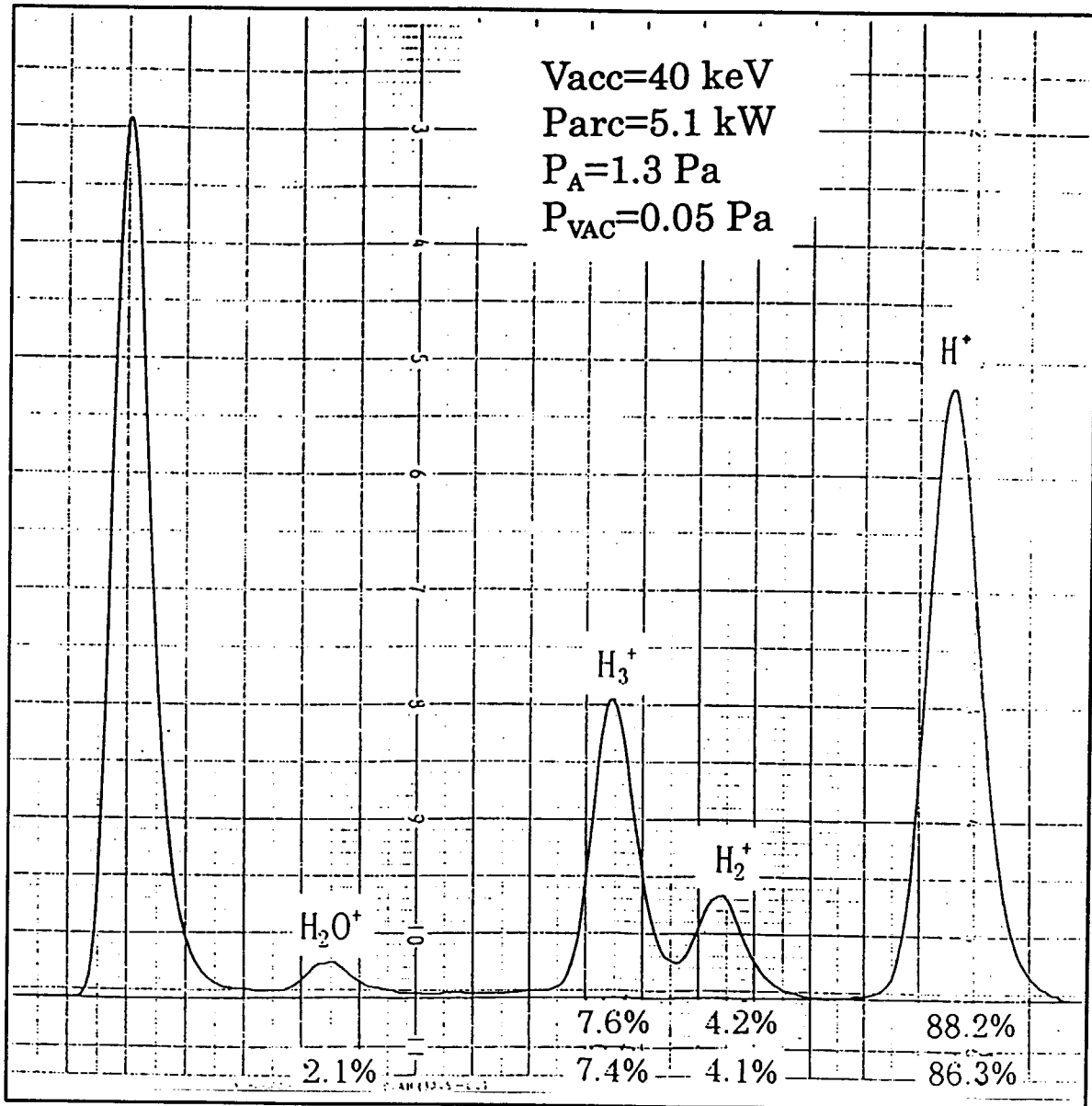


図5-7 ドップラーシフトスペクトルの一例

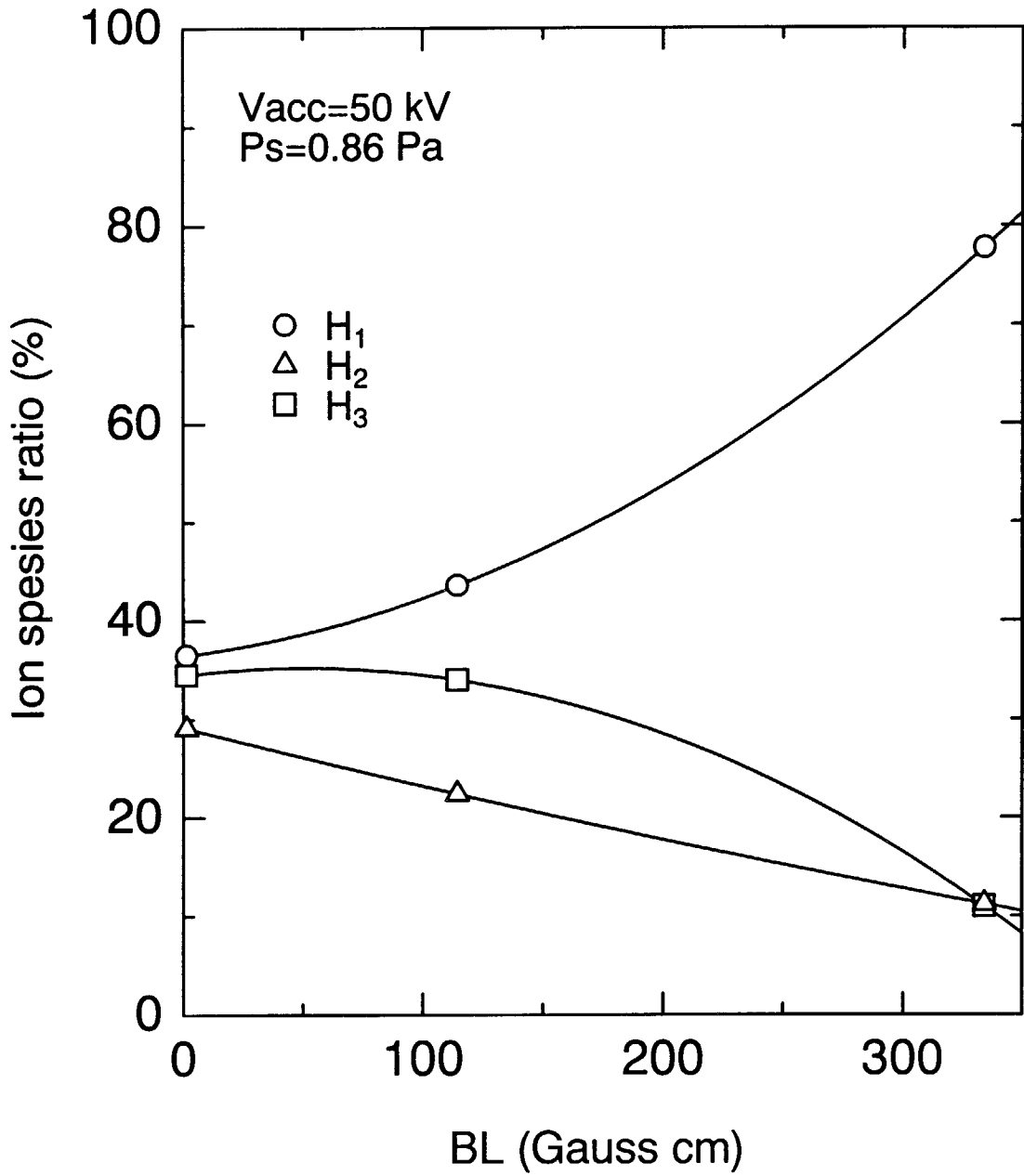


図5-8 プラズマ生成室内の磁場強度に対する
引き出された水素イオンビームプロトン比の変化

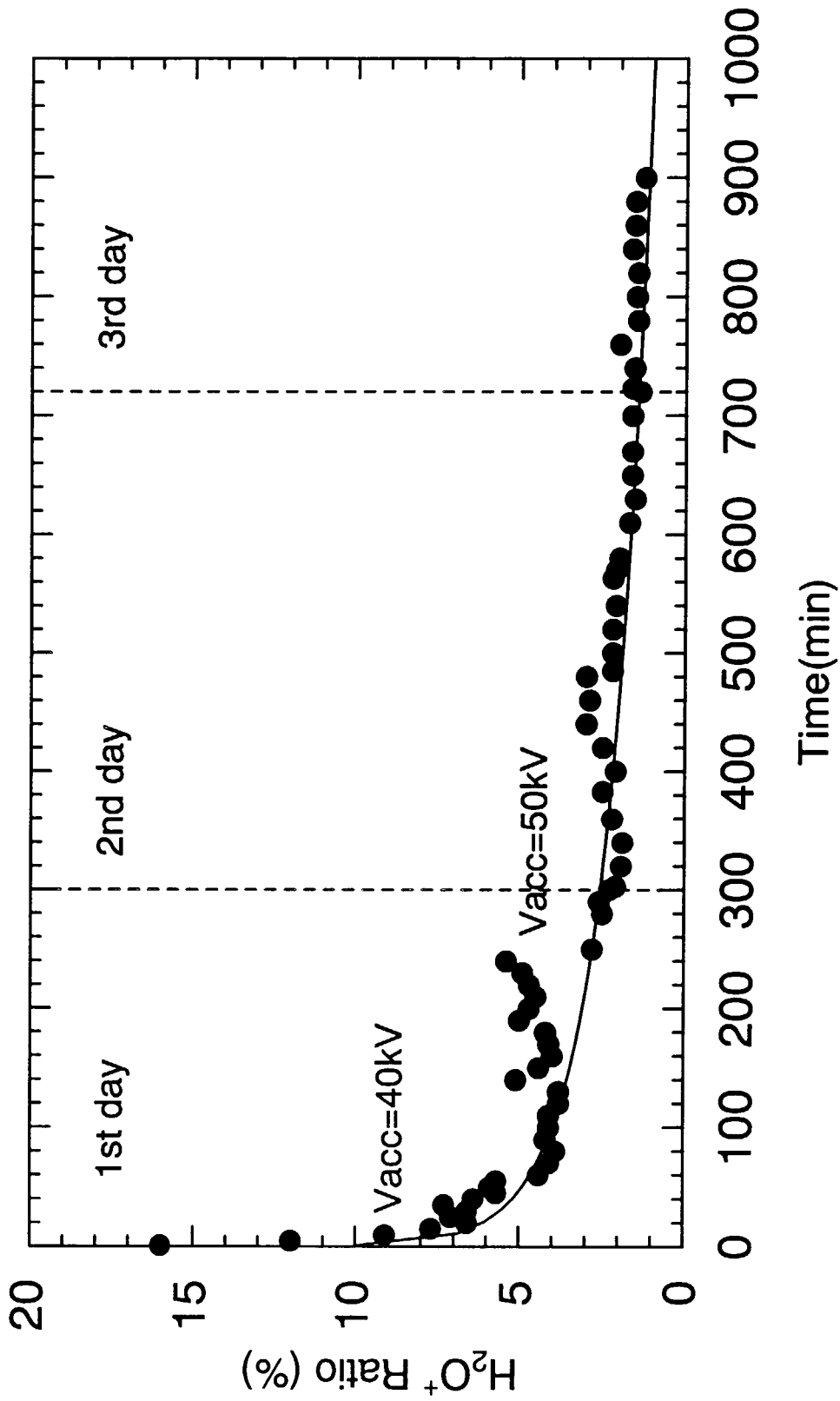


図5-9 イオン源連続運転時におけるビームに含まれる不純物割合の時間変化

This is a blank page.

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	
光束度	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ない。

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 = 10⁴ 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

FNS用バケット型イオン源の開発