

JAERI - M  
93-132

PGフィルターを持つ体積生成型負イオン源による  
大電流水素負イオンビームの生成

1993年7月

田中 政信・花田磨砂也・井上多加志・奥村 義和

JAERI-M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。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

PGフィルターを持つ体積生成型負イオン源による大電流水素負イオンビームの生成

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部  
田中政信・花田磨砂也・井上多加志・奥村義和

(1993年6月3日受理)

次期核融合装置のための中性粒子入射装置(NBI)では、体積生成型負イオン源を用いて大面積の均一な大電流ビームを生成する必要がある。このためには、負イオン源において、負イオン生成に必要なフィルター磁場を一様にするのが要求される。そこで、プラズマ電極(PG)に電流を流すことによって均一なフィルター磁場を発生できるPGフィルターを採用した。本実験では、PGフィルター使用時において初めてセシウムを添加し、最大7Aの負イオン電流を得た。このときの、アーク放電電力は35KW(70V, 500A)であり、負イオン生成効率が外部フィルターを凌ぐことを確認した。またJT-60U用負イオン源で要求される0.3Paの低ガス圧運転条件では、設計性能を越える4.4A(16mA/cm<sup>2</sup>)の負イオンビームの生成に成功した。更に、セシウム添加時の最適フィルター強さ、電極熱負荷となる電子電流、フィルター磁場によるビームの偏向等について調べ、PGフィルターを使用する大型負イオン源の設計指針を得た。

Production of High Current  $H^-$  Beams in a Cesium Seeded Volume  
Negative Ion Source Equipped with PG Filter

Masanobu TANAKA, Masaya HANADA, Takashi INOUE  
and Yoshikazu OKUMURA

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

(Received June 3, 1993)

For neutral beam injectors of fusion reactors, it is required to produce uniform high current  $H^-$  beams with large cross section. To realize this requirement, we have developed a large volume-production type negative ion source equipped with a uniform electromagnetic filter called PG filter, where a transverse magnetic field is generated by the current flowing in a plasma grid (PG). In this experiment, we tested PG filter with cesium for the first time and obtained maximum  $H^-$  beam current of 7A ( $26\text{mA}/\text{cm}^2$ ) at an arc power of 35kW (70V, 500A). This efficiency of  $H^-$  production is better than that of external filter and other type of filters. At a very low filling pressure (0.3Pa) in the negative ion generator,  $H^-$  beam of 4.4A ( $16\text{mA}/\text{cm}^2$ ) was produced. It satisfies the design value of the negative ion source for JT-60U. Investigated were the optimum magnetic filter strength in a cesium seeded condition, the extracted electron current that gives electrodes heat load and the beam bending angle by the magnetic filter field, which are useful for the design of future large negative ion sources.

Keywords: PG Filter, Neutral Beam Injector, Negative Ion Source, JT-60U,  
Cesium

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 実験装置 .....	2
3. フィルター磁場解析 .....	3
4. 実験結果 .....	4
4.1 負イオン生成効率 .....	4
4.2 最適フィルター強さ .....	5
4.3 バイアス電圧依存性 .....	6
4.4 電子漏れ率 .....	7
4.5 PGフィルター磁場によるビームの偏向 .....	7
4.6 負イオンビーム電流密度分布 .....	8
5. まとめ .....	9
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Setup .....	2
3. Analysis of Magnetic Field .....	3
4. Experimental Results .....	4
4.1 Efficiency of Negative Ion Production .....	4
4.2 Optimum Filter Strength .....	5
4.3 Dependence of $H^-$ Beam Current on Bias Voltage .....	6
4.4 Electron Leak Factor .....	7
4.5 $H^-$ Beam Bending Angle by Magnetic Field of PG Filter .....	7
4.6 Profile of $H^-$ Beam Current Density .....	8
5. Conclusion .....	9
Acknowledgment .....	10
References .....	11

## 1. 緒 言

現在、中性粒子入射装置 (NBI) 用水素負イオン源は大電流化、高エネルギー加速等の要素技術の開発を通して、JT-60U用負イオン源<sup>1)</sup>等、実用レベルの大型負イオン源を製作する段階にある。負イオン源の大型化にあたっての問題点の一つは、大面積の様な負イオンビームを生成することである。JT-60U負イオン源の負イオンビームの断面は長さ1.1m×幅0.45mであり、幅は従来最大であった10A負イオン源<sup>2)</sup>の約3倍の寸法である。このため、広い領域に渡って様な密度の負イオンを生成する必要がある。

現在研究されている多くの負イオン源では、プラズマ中で起こる衝突、解離等の過程によって負イオンを生成する方式の負イオン生成部が採用されている。このタイプの負イオン源は体積生成型負イオン源と呼ばれ、他の方式に比べ優れた多くの特徴を持っている<sup>3)</sup>。更に近年は、負イオン生成部にセシウムを添加することによって負イオン生成効率を高める技術<sup>4)</sup>が開発され、セシウム添加型体積生成負イオン源が研究の主流となっている。この方式の負イオン源の負イオン生成メカニズムには、負イオン生成部の空間で生成される体積生成と、セシウムが付着して仕事関数が低下した電極表面で生成される表面生成が考えられる。体積生成においては、水素の振動励起分子が1eV程度の低エネルギー電子と衝突し解離することによって負イオンが生成される<sup>3)</sup>。表面生成には電子エネルギーは関与しないが、生成された負イオンが電子と衝突して消滅する確率<sup>4)</sup>は電子温度の上昇とともに高くなる。すなわち負イオン生成領域では生成効率を高くするためにも、消滅確率を下げるためにも電子温度を1eV程度に低くすることが重要である。このため負イオン生成部では、磁場によって高エネルギー電子の軌道を曲げ、低エネルギー電子だけを拡散によって透過させる磁気フィルターを使用する。この磁気フィルターを作るために、従来はビームを引き出すプラズマ電極の両端に永久磁石を設置する方式 (外部フィルター)<sup>5)</sup>や永久磁石を埋め込んだ多数のロッドをプラズマ中に挿入する方式 (ロッドフィルター)<sup>5)</sup>を採用していた。ところが大型負イオン源では、外部フィルターを用いた場合、永久磁石の間隔が広すぎるため磁場の様性が悪く、負イオン密度が不均一となる恐れがある。また、ロッドフィルターの場合は、多数のロッドを使用することによって磁場の様性は改善されるが、ロッド表面でのプラズマの損失が大きいため負イオンの生成効率が他の方式より悪い。この問題を解決するために考案されたのがPGフィルターである。PGフィルターとは、プラズマ電極 (PG) に電流を流すことによってフィルター磁場を発生させる方式である。外部フィルターでは、電極の中心付近の磁場が周辺より弱くなるが、PGフィルターでは、永久磁石による磁場に電流による磁場を重ね合わせることによって、電極の中心付近から端部まで様な強さの磁場を形成することができる。又、電流を変えることによって容易にフィルター強さを最適な強さに調整できる。以前のPGフィルター実験<sup>6)</sup>では、体積生成型負

イオン源にセシウムを添加しない状態において、PGフィルターによって外部フィルタより高い負イオン生成効率を得るとともに、最大3.4Aの負イオンビームの生成を達成した。また、フィルターの強さと負イオン生成効率の関係についても検討がなされた。近年は、体積生成型負イオン源に微量のセシウムを添加することによって負イオン生成効率を高める技術が、高い負イオン電流密度を得るには不可欠な技術となっていたが、PGフィルターを使ったイオン源では未検討であった。

JT-60UではPGフィルター及びセシウムを使用した負イオン源を使用する予定であり、この方式の負イオン源で設計性能を達成できることを実証することは急務であった。そこで、本実験では、まず以下の事項を実施した。

(1) PGフィルターの場合にも、セシウム添加によって外部フィルタと同等以上の高い負イオン電流密度が得られることを実証する。

(2) 負イオンビームのストリッピングロスを減らすため要求される0.3Pa程度の低ガス圧運転で、 $14\text{mA/cm}^2$ 以上の高い負イオン電流密度(JT-60U用負イオン源の設計性能)を達成する。

また、NBIの設計に関連する基本的な特性を把握するために、次の検討を行った。

(3) セシウム添加したときの最適フィルター強さを添加しない場合と比較検討する。

(4) 外部フィルタのみの場合と比較して、電極熱負荷となる電子電流や漏れ電子の増加がないか検討する。

(5) フィルター磁場によるビームの偏向角とフィルター磁場強さの関係を調べる。

(6) 負イオンビームのビーム電流密度分布を調べ、分布の一様性を良くする方法について検討する。

## 2. 実験装置

実験に使用した10A負イオン源<sup>2)</sup>の構成を図1に示す。負イオン生成部は、長さ48cm幅24cm深さ15cmの銅製の真空容器の周囲にプラズマ閉じ込め用磁石を配置した多極磁場型プラズマ源である。プラズマはタングステンフィラメントを熱陰極とした直流アーク放電により生成した。フィラメントは真空容器の左右の壁のポートを使って片側4本ずつ、合計8本を設置した。フィラメントの断面の直径は1mmである。負イオンを生成するための磁気フィルターはプラズマ電極PGに流す電流 $I_{PG}$ 及び永久磁石(断面寸法 $10 \times 20\text{mm}$ )によって形成した。以前のPGフィルター実験<sup>6)</sup>と比べて磁石によるフィルター強さを弱くし(約150Gcm)、全フィルター磁場のうちのPGフィルターの占める割合を高くしている。これは、JT-60U用負イオン源のPGの中心付近では磁石によるフィルター強さが非常に

イオン源にセシウムを添加しない状態において、PGフィルターによって外部フィルタより高い負イオン生成効率を得るとともに、最大3.4Aの負イオンビームの生成を達成した。また、フィルターの強さと負イオン生成効率の関係についても検討がなされた。近年は、体積生成型負イオン源に微量のセシウムを添加することによって負イオン生成効率を高める技術が、高い負イオン電流密度を得るには不可欠な技術となっていたが、PGフィルターを使ったイオン源では未検討であった。

JT-60UではPGフィルター及びセシウムを使用した負イオン源を使用する予定であり、この方式の負イオン源で設計性能を達成できることを実証することは急務であった。そこで、本実験では、まず以下の事項を実施した。

(1) PGフィルターの場合にも、セシウム添加によって外部フィルターと同等以上の高い負イオン電流密度が得られることを実証する。

(2) 負イオンビームのストリッピングロスを減らすため要求される0.3Pa程度の低ガス圧運転で、 $14\text{mA/cm}^2$ 以上の高い負イオン電流密度(JT-60U用負イオン源の設計性能)を達成する。

また、NBIの設計に関連する基本的な特性を把握するために、次の検討を行った。

(3) セシウム添加したときの最適フィルター強さを添加しない場合と比較検討する。

(4) 外部フィルターの場合と比較して、電極熱負荷となる電子電流や漏れ電子の増加がないか検討する。

(5) フィルター磁場によるビームの偏向角とフィルター磁場強さの関係を調べる。

(6) 負イオンビームのビーム電流密度分布を調べ、分布の一様性を良くする方法について検討する。

## 2. 実験装置

実験に使用した10A負イオン源<sup>2)</sup>の構成を図1に示す。負イオン生成部は、長さ48cm幅24cm深さ15cmの銅製の真空容器の周囲にプラズマ閉じ込め用磁石を配置した多極磁場型プラズマ源である。プラズマはタングステンフィラメントを熱陰極とした直流アーク放電により生成した。フィラメントは真空容器の左右の壁のポートを使って片側4本ずつ、合計8本を設置した。フィラメントの断面の直径は1mmである。負イオンを生成するための磁気フィルターはプラズマ電極PGに流す電流 $I_{PG}$ 及び永久磁石(断面寸法 $10\times 20\text{mm}$ )によって形成した。以前のPGフィルター実験<sup>6)</sup>と比べて磁石によるフィルター強さを弱くし(約150Gcm)、全フィルター磁場のうちのPGフィルターの占める割合を高くしている。これは、JT-60U用負イオン源のPGの中心付近では磁石によるフィルター強さが非常に



弱いことを模擬するためである。また負イオン生成効率を高めるため、210°C程度に加熱したオープンから真空容器内部に微量のセシウムを導入した。負イオンを引き出し加速する電極は、プラズマ電極 (PG)、引き出し電極 (EXG)、電子抑制電極 (ESG)、接地電極 (GG) の4枚からなっている。各電極には直径9mmのビーム引き出し孔が434個ある。電極の基本構造は、JT-60U用負イオン源の設計構造と同様であり、大きさはほぼ5つの電極セグメントのうちの1セグメント分に相当する。PGと負イオン生成部の間には、バイアス電圧 $V_b$ が、印加されている。PGとEXGの間に引き出し電圧 $V_{ext}$ が、ESGとGGの間に加速電圧 $V_{acc}$ が、印加され、トータル加速電圧 $V_{tot} = V_{ext} + V_{acc}$ に相当するエネルギーの負イオンビームが生成される。負イオンと共に引き出された電子は、磁場で曲げられEG及びESGに衝突し加速ギャップには漏れださないようにEXG内部に永久磁石を設置している。負イオンビーム電流 $I_H^-$ はマルチチャンネルカロリメータで熱的に測定した。

### 3. フィルター磁場解析

PGフィルターによるフィルター磁場配位及びフィルターの強さ(磁場の積分値)等を調べるために、磁場解析コード(eleorbit)<sup>7)</sup>を使って磁場解析を行った。PGフィルターを使用した場合及び永久磁石による外部フィルターの場合の磁場配位のベクトル図を、図2に示した。40eVの高速電子の軌道も同時に示した。外部フィルターで使用したフィルター磁石は断面寸法が10×40mm、極性はフィルター磁石の上にあるプラズマ閉じ込め用磁石と同極性であり、磁石だけで十分なフィルター強さが得られる。PGフィルターの場合は、外部フィルターの場合の半分の10×20mmのフィルター磁石を使用し、極性も閉じ込め磁石と逆にした。このため磁石のみによるフィルター強さは、電流によるフィルターに比べかなり弱い。負イオン生成部中心での最大磁束密度 $B$ はPGフィルター電流 $I_{PG}=2kA$ に対して91Gであるが、このうち磁石のみによる磁束密度は約24%(22G)である。PGの上方16mmにおけるフィルター磁場方向(X方向)の磁束密度分布を図3(a)に示した。図2及び図3(a)より、両者のフィルター磁場のX方向の一樣性を比較する。外部フィルターの場合、ビーム引き出し領域の周辺部( $X=75mm$ )においては、磁束密度は中心部の2.4倍もあり、また磁場の方向も電極を横切る方向を向いており一樣性が悪い。PGフィルターの場合、周辺部の磁束密度は中心部の1.3倍であり、電極を横切る磁場もなく、外部フィルターより一樣性が改善されている。電子軌道については、PGフィルターの場合電子が横方向にフィルター磁場にそって運動するため外部フィルターの場合より電子が負イオン生成部全体に良く散らばっている。

弱いことを模擬するためである。また負イオン生成効率を高めるため、210℃程度に加熱したオープンから真空容器内部に微量のセシウムを導入した。負イオンを引き出し加速する電極は、プラズマ電極 (PG)、引き出し電極 (EXG)、電子抑制電極 (ESG)、接地電極 (GG) の4枚からなっている。各電極には直径9mmのビーム引き出し孔が434個ある。電極の基本構造は、JT-60U用負イオン源の設計構造と同様であり、大きさはほぼ5つの電極セグメントのうちの1セグメント分に相当する。PGと負イオン生成部の間には、バイアス電圧 $V_b$ が、印加されている。PGとEXGの間に引き出し電圧 $V_{ext}$ が、ESGとGGの間に加速電圧 $V_{acc}$ が、印加され、トータル加速電圧 $V_{tot} = V_{ext} + V_{acc}$ に相当するエネルギーの負イオンビームが生成される。負イオンと共に引き出された電子は、磁場で曲げられEG及びESGに衝突し加速ギャップには漏れださないようにEXG内部に永久磁石を設置している。負イオンビーム電流 $I_H$ はマルチチャンネルカロリメータで熱的に測定した。

### 3. フィルター磁場解析

PGフィルターによるフィルター磁場配位及びフィルターの強さ(磁場の積分値)等を調べるために、磁場解析コード (eleorbit)<sup>7)</sup> を使って磁場解析を行った。PGフィルターを使用した場合及び永久磁石による外部フィルターの場合の磁場配位のベクトル図を、図2に示した。40eVの高速電子の軌道も同時に示した。外部フィルターで使用したフィルター磁石は断面寸法が10×40mm、極性はフィルター磁石の上にあるプラズマ閉じ込め用磁石と同極性であり、磁石だけで十分なフィルター強さが得られる。PGフィルターの場合は、外部フィルターの場合の半分の10×20mmのフィルター磁石を使用し、極性も閉じ込め磁石と逆にした。このため磁石のみによるフィルター強さは、電流によるフィルターに比べかなり弱い。負イオン生成部中心での最大磁束密度 $B$ はPGフィルター電流 $I_{PG}=2kA$ に対して91Gであるが、このうち磁石のみによる磁束密度は約24%(22G)である。PGの上方16mmにおけるフィルター磁場方向(X方向)の磁束密度分布を図3(a)に示した。図2及び図3(a)より、両者のフィルター磁場のX方向の一樣性を比較する。外部フィルターの場合、ビーム引き出し領域の周辺部( $X=75mm$ )においては、磁束密度は中心部の2.4倍もあり、また磁場の方向も電極を横切る方向を向いており一樣性が悪い。PGフィルターの場合、周辺部の磁束密度は中心部の1.3倍であり、電極を横切る磁場もなく、外部フィルターより一樣性が改善されている。電子軌道については、PGフィルターの場合電子が横方向にフィルター磁場にそって運動するため外部フィルターの場合より電子が負イオン生成部全体に良く散らばっている。

図3(b)には、負イオン生成部中心でのビーム軸方向（Y方向）の磁束密度分布を示した。PGフィルターの場合、PGの両側で電流による磁場の極性が反転するためPG付近と引き出しギャップの磁場が外部フィルターよりかなり低くなっている。

負イオン生成部中心のフィルター磁束密度をY方向にフィラメントの位置(Y=76mm)からPG表面まで積分した値B<sub>l</sub>及びPG近傍の最大磁束密度B<sub>MAX</sub>とI<sub>PG</sub>の関係を図4に示した。この関係を式で表すと以下のようなになる。

$$B_l = 225 I_{PG} + 145 \quad \cdots \quad (1)$$

$$B_{MAX} = 34.4 I_{PG} + 22 \quad \cdots \quad (2)$$

外部フィルターの場合は、B<sub>l</sub>は640Gcmであり、PGフィルターのI<sub>PG</sub>=2.2kAに相当し、B<sub>MAX</sub>は83GでありI<sub>PG</sub>=1.8kAに相当する。

## 4. 実験結果

### 4.1 負イオン生成効率

セシウム添加時のアーク電流I<sub>arc</sub>と負イオンビーム電流I<sub>H<sup>-</sup></sub>の関係を図5に示した。PGフィルター強さを最適化することによって、ガス圧0.7Pa、アーク電流500A（アークパワー35kW）において最大7Aのビーム電流を得た。I<sub>arc</sub>に対する負イオンビームの生成効率は外部フィルターを越える効率である。また、ビーム電流値はほぼアーク電流に比例して増加している。PGフィルター使用時に十分なセシウム効果が得られることを初めて確認することができた。又、JT-60U用負イオン源で要求される0.3Paの低ガス圧運転条件では、最大4.4Aのビーム電流を得た。この電流は、JT-60Uイオン源の5つの電極セグメントのうちの1セグメント分の設計電流値に等しい。図6は、図5の負イオンビーム電流を電流密度に換算して示したものである。ガス圧0.7Paにおいて得られた最大電流密度は25.5mA/cm<sup>2</sup>である。ガス圧0.3Paでの電流密度は、JT-60U負イオン源の目標性能（14mA/cm<sup>2</sup>）を越える16mA/cm<sup>2</sup>に達している。

図3(b)には、負イオン生成部中心でのビーム軸方向（Y方向）の磁束密度分布を示した。PGフィルターの場合、PGの両側で電流による磁場の極性が反転するためPG付近と引き出しギャップの磁場が外部フィルターよりかなり低くなっている。

負イオン生成部中心のフィルター磁束密度をY方向にフィラメントの位置(Y=76mm)からPG表面まで積分した値B<sub>l</sub>及びPG近傍の最大磁束密度B<sub>MAX</sub>とI<sub>PG</sub>の関係を図4に示した。この関係を式で表すと以下のようなになる。

$$B_l = 225 I_{PG} + 145 \quad \cdots \quad (1)$$

$$B_{MAX} = 34.4 I_{PG} + 22 \quad \cdots \quad (2)$$

外部フィルターの場合は、B<sub>l</sub>は640Gcmであり、PGフィルターのI<sub>PG</sub>=2.2kAに相当し、B<sub>MAX</sub>は83GでありI<sub>PG</sub>=1.8kAに相当する。

## 4. 実験結果

### 4.1 負イオン生成効率

セシウム添加時のアーク電流I<sub>arc</sub>と負イオンビーム電流I<sub>H<sup>-</sup></sub>の関係を図5に示した。PGフィルター強さを最適化することによって、ガス圧0.7Pa、アーク電流500A（アークパワー35kW）において最大7Aのビーム電流を得た。I<sub>arc</sub>に対する負イオンビームの生成効率は外部フィルターを越える効率である。また、ビーム電流値はほぼアーク電流に比例して増加している。PGフィルター使用時に十分なセシウム効果が得られることを初めて確認することができた。又、JT-60U用負イオン源で要求される0.3Paの低ガス圧運転条件では、最大4.4Aのビーム電流を得た。この電流は、JT-60Uイオン源の5つの電極セグメントのうちの1セグメント分の設計電流値に等しい。図6は、図5の負イオンビーム電流を電流密度に換算して示したものである。ガス圧0.7Paにおいて得られた最大電流密度は25.5mA/cm<sup>2</sup>である。ガス圧0.3Paでの電流密度は、JT-60U負イオン源の目標性能（14mA/cm<sup>2</sup>）を越える16mA/cm<sup>2</sup>に達している。

## 4. 2 最適フィルター強さ

### 4. 2. 1 水素ガス圧力依存性

セシウム添加時のPGフィルター電流  $I_{PG}$  と負イオンビーム電流の関係を図7に示した。負イオン生成部のガス圧  $P_A$  をパラメータとして、0.3から1.1 Paまで変化させた。 $I_{H^-}$  が最大となる最適フィルター電流  $I_{PG_0}$  は、ガス圧が低くなるにつれて低下する。しかし、 $I_{PG}$  による  $I_{H^-}$  の変化は急峻でなく、特に  $I_{PG}$  の高い側の変化は緩やかである。 $I_{PG}$  が  $I_{PG_0}$  より20%程度高い場合でも、 $I_{H^-}$  は最大値より10%程度しか低くならない。最適フィルター電流とガス圧の関係をセシウムを添加した場合としない場合について比較した結果が図8である。 $P_A=1.1$  Pa程度のガス圧では、セシウム添加による変化は小さいが、0.7 Pa以下の低ガス圧ではセシウムを添加した場合の方が20%程度低くなっている。この原因について以下のように推定した。セシウムは、電離電圧が3.9eVと非常に低い。従って、4eV程度のプラズマ中の熱平衡電子でも衝突によって電離を起こすことができ、電離の際に電子はエネルギーを失い電子温度が低下する。また、電離によって発生する電子も熱平衡状態の電子温度より低い。水素ガス圧が低くなった場合、プラズマの電子温度は高くなるため、セシウムを電離できる電子の割合が増加する。すなわち、上記過程による電子温度の低下の影響が大きくなる。このため、0.7 Pa以下の低ガス圧では、負イオン生成領域の電子温度を十分に低くするために必要なフィルター強さが、セシウムによって低下すると推定される。

### 4. 2. 2 アークパワー依存性

セシウム添加時のPGフィルター電流  $I_{PG}$  と負イオンビーム電流の関係を図9に示した。負イオン生成部のアーク放電電流  $I_{arc}$  をパラメータとして、100Aから450Aまで変化させた。 $I_{H^-}$  が最大となる最適フィルター電流  $I_{PG_0}$  はアークパワーの上昇に従って増加した。図10には、 $I_{PG_0}$  と  $I_{arc}$  の関係を示した。セシウムを添加した場合としない場合の差は小さい。 $P_A=1.1$  Pa程度のガス圧ではアークパワーによらずセシウムの影響による  $I_{PG_0}$  の変化は少ないと考えられる。

### 4. 2. 3 引き出し電流を考慮した最適フィルター強さ

負イオン生成部から引き出される電子は、引き出し電極に衝突し熱負荷となり、パワーロスとなる。したがって、電極熱負荷やパワーロスを考慮すると、電子電流を適切な量に抑えるようにフィルター強さを決める必要がある。電子電流は引き出し電流から負イオン電流を引いたものであるので、引き出し電流  $I_{ext}$  と負イオンビーム電流  $I_{H^-}$  の比によって

相対的な電子電流の量を評価することができる。JT-60Uでは、引き出し電極の熱負荷及び電源容量の制限のため  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  を3.6以下に抑えなければならない。 $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  とバイアス電圧  $V_b$  の関係をPGフィルタの場合と外部フィルタの場合について比較した結果を図11に示した。外部フィルタとフィルタ強さ  $B_1$  が等しくなる  $I_{\text{PG}}$  は2.2kAである。PGフィルタの場合は  $I_{\text{PG}}$  を2.9kAまで上げフィルタ強さを外部フィルタより強くしても、外部フィルタの場合と比較して  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  が高く、 $V_b$  の上昇による  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  の低下も少ない。この原因は、PGフィルタではPGのビーム引き出し孔付近の磁場が弱いため、電子が引き出され易いためであると思われる。しかし、 $I_{\text{PG}}$  を2.9kAに増加した場合、 $V_b=2\text{V}$  程度の適切なバイアス電圧において  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  を2.6程度まで低くすることができた。すなわち、引き出し電極の熱負荷を低くするために  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  を低く抑える必要が有る場合、フィルタ強さを  $I_{\text{H}^-}$  が最大となるフィルタ強さより高くする必要が有る。

図12には、 $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  と  $I_{\text{PG}}$  の関係をガス圧  $P_A$  をパラメータとして示した。圧力とフィルタ電流が低いほど  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  が高くなっている。図8において示した  $I_{\text{H}^-}$  が最大となるフィルタ強さ  $I_{\text{PG}_0}$  での  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}$  の値は0.5Pa以下では4以上となり、JT-60U用負イオン源での限界値(3.6)をこえている。そこで、ここでは、JT-60U用負イオン源の条件を満たす  $I_{\text{ext}}/I_{\text{H}^-}=3$  となるフィルタ強さを最適フィルタ強さ  $I_{\text{PG}_s}$  と定義し、図13に  $I_{\text{PG}_s}$  と  $P_A$  の関係を示した。 $I_{\text{PG}_s}$  は図8の  $I_{\text{PG}_0}$  より20~40%程度高いが、 $I_{\text{PG}_s}$  に対応する  $I_{\text{H}^-}$  は最大値と比較して5~15%程度しか低下しない。すなわち、 $I_{\text{PG}}$  を高くすることによって10%前後の  $I_{\text{H}^-}$  の低下で引き出し電流  $I_{\text{ext}}$  を負イオン電流  $I_{\text{H}^-}$  の3倍以下に抑えることができた。

#### 4.3 バイアス電圧依存性

負イオンビーム電流  $I_{\text{H}^-}$  及びイオン飽和電流密度  $J_{\text{is}}$  とバイアス電圧  $V_b$  の関係を図14に示す。 $J_{\text{is}}$  は、セシウム無しの時にラングミュアプローブにより測定した。プローブの位置は、PGの中央部の上方17mmである。セシウムを添加した場合もしない場合も、 $V_b$  を上昇することによる  $I_{\text{H}^-}$  の低下は小さい。これに対し  $V_b$  による  $J_{\text{is}}$  の低下は大きく、 $V_b \geq 5\text{V}$  で2分の1以下に低下した。すなわち、プラズマ密度の低下による  $I_{\text{H}^-}$  の低下は少ない。図15には、 $I_{\text{PG}}$  を変化させた時の特性の変化を示した。 $I_{\text{PG}}$  が高いほど  $J_{\text{is}}$  は低く、また、 $I_{\text{H}^-}$  が低下し始めるバイアス電圧  $V_{bc}$  も下がった。しかし、 $V_b = V_{bc}$  での  $J_{\text{is}}$  の値は80~100mAであり、 $I_{\text{PG}}$  による変化は少ない。この事に関して考察すると以下のように説明される。まず、 $I_{\text{H}^-}$  はバイアス電圧がPG近傍のプラズマの空間電位  $V_s$  より高くなった時に負イオンが電界によりPGに吸引されるために低下すると考えられ、 $V_{bc}$  は  $V_s$  にほぼ等しいと推定される。 $I_{\text{PG}}$  が上昇すると電子温度の低下等のため  $V_s$  も低下すると考えられる。従っ

て、 $V_s$ にほぼ等しい $V_{bc}$ も $I_{PG}$ の上昇にともなって低下し、一方 $V_b = V_{bc} = V_s$ での $J_{is}$ は $I_{PG}$ によってあまり変化しないと考えられる。また、 $V_{bc}$ と $I_{PG}$ の関係を図16に示した。セシウムの有無に関係なく、 $I_{PG}$ が高くなるにつれ $V_{bc}$ が低下する傾向に有ることがわかる。

#### 4. 4 電子漏れ率

PGフィルターの場合、図3の様に引き出しギャップにおけるフィルター磁場が外部フィルターより弱いため、電子の加速ギャップへの漏れが心配された。そこで、これについて調べるため、次式で $k$ という値を定義する。

$$k = (I_{acc} - I_H) / (I_{ext} - I_H) \quad \cdots (3)$$

ここで、分母はPGから引き出された全電子電流にほぼ等しく、分子は加速ギャップに漏れ加速される電子電流に接地電極への衝突やストリッピングのため計測されなかった負イオンビーム電流を足したものである。ビームの発散が良くストリッピングもない場合、分子は漏れ電子電流に等しく $k$ は電子漏れ率となる。 $k$ と $I_{PG}$ の関係を図17に示した。 $k$ は0.02~0.07程度と小さく、外部フィルターの場合<sup>8)</sup>(0.05程度)とほぼ同じである。また、 $I_{PG}$ が低くなるほど、むしろ $k$ は低下しており、フィルター磁場の低下により電子の漏れが増える傾向は見られない。この結果から判断すると、引き出し電極の磁石によって電子の漏れは十分に抑えられており、プラズマ生成部のフィルター磁場により漏れ電子を抑える必要はないと考えられる。 $I_{PG}$ の上昇と共に $k$ が大きくなったのは、電子の漏れが増えるのではなく、引き出し電流が低下し $k$ の分母が小さくなったためである。

#### 4. 5 PGフィルター磁場によるビームの偏向

PGフィルターにより発生する加速管内の磁場及び接地電極より更に下流の磁場によりビームが偏向される。実験では、カロリメータによってビーム中心位置を測定することによって磁場によるビームの変位量 $s$ を求め、変位量 $s$ とイオン源からカロリメータまでの距離 $l$ (1.85m)より偏向角 $= s/l$ を算出した。図18に、 $I_{PG}$ とビームの偏向角 $\omega$ の関係を示した。 $I_{PG} = \pm 2.9\text{kA}$ に対して $\pm 20\text{mrad}$ 程度の偏向角が観測され、また偏向角は $I_{PG}$ にほぼ比例した。図19には $I_{PG} = 2\text{kA}$ の時のフィルター磁場のY方向分布を接地電極の下流50cm程度まで計算した結果を示す。偏向角の理論計算値は、次式の様に図19で求められる磁場の積分値から容易に算出できるが、図18の様に計算値は実験値の約2.1倍もある。

$$\omega = (e/2MV)^{0.5} \int Bdy \quad \dots (4)$$

(e:電子の電荷, M:水素原子の質量, V:加速電圧, B:磁束密度, y:ビームの軸方向の位置座標)

この原因の一つは、測定結果から偏向角を求める際の誤差である。イオン源出口よりカロリメータまでの間(約1.85m)、ビームは偏向された方向に直進するとして偏向角を求めたが、実際には出口より下流50cm程度までビームは偏向される。これを考慮すると、偏向角は15%程度大きくなる。しかし、この変化は計算値と実験値の差よりはるかに小さい。考えられるもう一つの原因は、ビームの中性化である。計算によれば接地電極より下流の磁場によるビームの偏向が全偏向の4分の3程度もあり、接地電極より下流で中性化したビームが理論通りに曲がらなかったことが計算値と実験値の大きな相違の一因と考えられる。同図に、中性化の効果を考慮した計算値も示したが、これは上記の測定誤差を考慮しても実験値の約1.6倍である。中性化の効果を算出する際にガス圧としてビームラインの電離真空計の測定値(0.057Pa)を用いたが、ビームが実際に中性化する接地電極近傍のガス圧は測定値より高いと考えられ、中性化の影響がもっと大きいと思われる。ビームの偏向に対する中性化の影響が大きいと、中性化の有無によりビームの偏向角に相違が生じ、磁場に垂直な方向のビームの発散角が大きくなる可能性があり、NBIのビームラインの設計において考慮が必要である。しかし、加速管とビームラインのコンダクタンスから判断して計算値と実験値が一致するほど(測定値の3.5倍程度)実際のガス圧が高くなり得ないので、中性化の他にも未だ何らかの原因があると思われる。

#### 4. 6 負イオンビーム電流密度分布

上下方向(プラズマ生成部の長手方向即ちフィルター磁場に垂直な方向)のイオンビーム分布およびプラズマ生成部のイオン飽和電流密度の分布を図20に示した。ビームの分布は、ビームの水平方向(短手方向即ちフィルター磁場方向)の中心でカロリメータにより測定したものである。J<sub>is</sub>はセシウム無しの条件で、PGとの距離が17mmの位置に真空容器上方から挿入したラングミュアプローブによって測定した。同図の縦軸の値は、各データをZ=0の中心の値で規格化した値である。セシウムを添加しない場合のビーム分布は上方に大きな偏りがあり、一様性が非常に悪い。傾きの符号はJ<sub>is</sub>の傾きと一致しているが、偏りの大きさは、J<sub>is</sub>より大きい。ビームの上方の最大値は中心の値の1.7倍であるが、J<sub>is</sub>の最大値は中心の値の1.5倍以下である。セシウムを導入した場合ビーム分布一様性は改善されるが、それでもまだビーム上方の最大値は中心の値より20%程度高い。また、ビームの偏りは、フィルター磁場と相関関係があり、フィルター磁場の方向を反転さ



せた場合は、同図の  $I_{PG} = -2.9\text{kA}$  のビーム分布の様にビーム分布傾きの符号も反転する。また、圧力が低下するとビーム分布の偏りは小さくなる傾向にある。したがって、ビーム分布の偏りは、磁場に関係したアーク放電の不均一に起因していると思われるが、電子の  $\nabla B \times B$  ドリフトにより推定されるプラズマ分布の傾きの符号と測定したビーム分布及び  $J_{is}$  分布の傾きの符号は逆であった。

プラズマ生成部の主放電領域のアーク放電の一様性を調べるために、上下方向の各位置にある2本のフィラメントに流れ込むアーク電流の合計を測定した結果を図21に示した。セシウム無しでの分布の傾きの符号はビームの傾きと一致し、平均値に対して $\pm 10\%$ 程度の偏りである。セシウムを添加した場合、一様性が改善された。このことから、ビーム分布の偏りの要因の一つはアーク放電の偏りであると思われる。

図22は、ビーム電流密度の2次元分布を等高線図で示したものである。ビーム電流密度の高い上方の位置では、下方の位置と比較して水平方向のビームの発散が小さくなっている。これは、負イオン生成部の上下の位置の負イオン密度が異なるため、ビームの発散が最小になる最適パービアンスが上下の位置で異なっているためと思われる。上下方向の各位置での水平方向のビーム電流の積分値を示したのが図23である。水平方向の中心のビーム電流密度の分布も比較して示した。積分値の分布の偏りは中心のビーム電流密度分布より小さくなっているが、分布の傾向は同じである。すなわち、2次元分布を考慮してもビーム分布は上方に偏りを持つと言える。

負イオン生成部の一番上方に設置したフィラメントの1本だけには通電しないようにしてアーク放電分布を調整することによって、ビームの偏りを補正した結果を図24に示した。ビーム分布はほぼ上下の差がなくなるほど改善された。すなわち、フィラメントの配置やフィラメントに流れるアーク電流を調整し、アーク放電電流分布を変えることによってビーム分布の偏りを補正できる。

## 5. まとめ

(1) PGフィルター使用時にも十分なセシウムの効果が得られることを確認した。外部フィルターの場合を凌ぐ負イオン生成効率を得るとともに、JT-60U負イオン源の設計性能(0.3Paの低ガス圧で $14\text{mA/cm}^2$ の電流密度)を越える性能( $16\text{mA/cm}^2$ )を達成した。JT-60U負イオン源に対する明るい見通しを得ることができた。

(2) 負イオン生成効率が最高となる最適フィルター強さは、セシウム添加時においてガス圧が0.3~1.1Paの範囲でガス圧の低下にほぼ比例して増加した。0.7Pa以下の低ガス圧での最適フィルター強さは、セシウムを添加した場合、添加しない場合より20%程度低くなっ

せた場合は、同図の  $I_{PG} = -2.9\text{kA}$  のビーム分布の様にビーム分布傾きの符号も反転する。また、圧力が低下するとビーム分布の偏りは小さくなる傾向にある。したがって、ビーム分布の偏りは、磁場に関係したアーク放電の不均一に起因していると思われるが、電子の  $\nabla B \times B$  ドリフトにより推定されるプラズマ分布の傾きの符号と測定したビーム分布及び  $J_{is}$  分布の傾きの符号は逆であった。

プラズマ生成部の主放電領域のアーク放電の一様性を調べるために、上下方向の各位置にある2本のフィラメントに流れ込むアーク電流の合計を測定した結果を図21に示した。セシウム無しでの分布の傾きの符号はビームの傾きと一致し、平均値に対して $\pm 10\%$ 程度の偏りである。セシウムを添加した場合、一様性が改善された。このことから、ビーム分布の偏りの要因の一つはアーク放電の偏りであると思われる。

図22は、ビーム電流密度の2次元分布を等高線図で示したものである。ビーム電流密度の高い上方の位置では、下方の位置と比較して水平方向のビームの発散が小さくなっている。これは、負イオン生成部の上下の位置の負イオン密度が異なるため、ビームの発散が最小になる最適パービアンスが上下の位置で異なっているためと思われる。上下方向の各位置での水平方向のビーム電流の積分値を示したのが図23である。水平方向の中心のビーム電流密度の分布も比較して示した。積分値の分布の偏りは中心のビーム電流密度分布より小さくなっているが、分布の傾向は同じである。すなわち、2次元分布を考慮してもビーム分布は上方に偏りを持つと言える。

負イオン生成部の一番上方に設置したフィラメントの1本だけには通電しないようにしてアーク放電分布を調整することによって、ビームの偏りを補正した結果を図24に示した。ビーム分布はほぼ上下の差がなくなるほど改善された。すなわち、フィラメントの配置やフィラメントに流れるアーク電流を調整し、アーク放電電流分布を変えることによってビーム分布の偏りを補正できる。

## 5. まとめ

(1) PGフィルター使用時にも十分なセシウムの効果が得られることを確認した。外部フィルターの場合を凌ぐ負イオン生成効率を得るとともに、JT-60U負イオン源の設計性能(0.3Paの低ガス圧で $14\text{mA/cm}^2$ の電流密度)を越える性能( $16\text{mA/cm}^2$ )を達成した。JT-60U負イオン源に対する明るい見通しを得ることができた。

(2) 負イオン生成効率が最高となる最適フィルター強さは、セシウム添加時においてガス圧が0.3~1.1Paの範囲でガス圧の低下にほぼ比例して増加した。0.7Pa以下の低ガス圧での最適フィルター強さは、セシウムを添加した場合、添加しない場合より20%程度低くなっ

た。また、最適フィルター強さはアークパワーの上昇にほぼ比例して増加した。

(3) フィルター強さによる負イオン電流の変化は急峻ではなく、フィルター強さを最適値より20%程度高くしても、負イオン電流は10%程度しか低下しなかった。

(4) PGフィルターの問題点の一つはPGのビーム引き出し孔付近の磁場が非常に弱くなることである。このため外部フィルターに比べて引き出し電流が多く、バイアス電圧による引き出し電流の低下も小さかった。引き出し電流  $I_{ext}$  と負イオン電流  $I_H$  の比  $I_{ext}/I_H$  はガス圧の低下と共に上昇し、0.3Pa程度のガス圧でこの比を3以下に抑えるには、負イオン生成効率が最高となる最適フィルター強さより30%程度フィルターを強くしなければならなかった。

(5) バイアス電圧を上昇する際に負イオンビーム電流が低下し始めるバイアス電圧  $V_{bc}$  は、フィルター強さとともに低くなり、0V以下まで低下した。フィルター強さとともにPG近傍のプラズマの空間電位が低下することが原因であると推定される。

(6) 負イオン生成部より引き出された電子の加速ギャップへの漏れは数パーセント以下と小さく、外部フィルターの場合と変わらなかった。また、フィルター磁場を弱くした場合に電子の漏れが増加する傾向はなく、電子の漏れは引き出し電極の磁石によって十分抑えられた。

(7) PGフィルター磁場による負イオンビームの偏向角は、ほぼフィルター電流に比例し、最大±20mrad程度であった。しかし偏向角は理論値の半分程度であり、その原因の一つはビームの中性化と考えられる。中性化の影響により磁場に垂直な方向のビームの発散角が大きくなる可能性があり、NBIのビームラインの設計において考慮する必要がある。

(8) 負イオンビームのフィルター磁界に垂直な方向の電流密度分布には電子の  $\nabla B \times B$  ドリフトと逆方向の偏りが見られた。セシウム導入時には偏りは軽減されたが、偏りを完全に無くすには負イオン生成部のアーク放電分布をフィラメントにより調整する等の対策を要した。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をしていただいた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝いたします。また、終始激励していただいた島本進核融合工学部長、田村早苗那珂研究所長に感謝の意を表します。

た。また、最適フィルター強さはアークパワーの上昇にほぼ比例して増加した。

(3) フィルター強さによる負イオン電流の変化は急峻ではなく、フィルター強さを最適値より20%程度高くしても、負イオン電流は10%程度しか低下しなかった。

(4) PGフィルターの問題点の一つはPGのビーム引き出し孔付近の磁場が非常に弱くなることである。このため外部フィルターに比べて引き出し電流が多く、バイアス電圧による引き出し電流の低下も小さかった。引き出し電流  $I_{ext}$  と負イオン電流  $I_H$  の比  $I_{ext}/I_H$  はガス圧の低下と共に上昇し、0.3Pa程度のガス圧でこの比を3以下に抑えるには、負イオン生成効率が最高となる最適フィルター強さより30%程度フィルターを強くしなければならなかった。

(5) バイアス電圧を上昇する際に負イオンビーム電流が低下し始めるバイアス電圧  $V_{bc}$  は、フィルター強さとともに低くなり、0V以下まで低下した。フィルター強さとともにPG近傍のプラズマの空間電位が低下することが原因であると推定される。

(6) 負イオン生成部より引き出された電子の加速ギャップへの漏れは数パーセント以下と小さく、外部フィルターの場合と変わらなかった。また、フィルター磁場を弱くした場合に電子の漏れが増加する傾向はなく、電子の漏れは引き出し電極の磁石によって十分抑えられた。

(7) PGフィルター磁場による負イオンビームの偏向角は、ほぼフィルター電流に比例し、最大±20mrad程度であった。しかし偏向角は理論値の半分程度であり、その原因の一つはビームの中性化と考えられる。中性化の影響により磁場に垂直な方向のビームの発散角が大きくなる可能性があり、NBIのビームラインの設計において考慮する必要がある。

(8) 負イオンビームのフィルター磁界に垂直な方向の電流密度分布には電子の  $\nabla B \times B$  ドリフトと逆方向の偏りが見られた。セシウム導入時には偏りは軽減されたが、偏りを完全に無くすには負イオン生成部のアーク放電分布をフィラメントにより調整する等の対策を要した。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり有意義な討論をしていただいた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝いたします。また、終始激励していただいた島本進核融合工学部長、田村早苗那珂研究所長に感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) Y.Okumura, et al., " Negative Ion Based Neutraal Beam Injector for JT-60U" ,  
Proc.of 6th International Symposium on the Production and Neutralization of Negative  
Ions and Beams, Brookhaven National Laboratory, (1992)
- (2) Y.Okumura, et al., " A 10 Ampere Negative Ion Source for High Energy Neutraal Beam  
Injector " , Proc.of 16th Symposium on Fusion Technology,  
London UK(1990)
- (3) 奥村義和, " 核融合炉を目指した第電流イオン源の開発" ,核融合研究第60巻第5号  
p329(1988)
- (4) K.Plelec and Th.Sluyters, " Formation of Negative Hydrogen Ions in Direct Extraction  
Sources" , Rev.Sci.Instrum. 44 p1451 (1973).
- (5) T.Inoue, et al., " Multi-Ampere Negative Hydrogen Ion Source for  
Fusion Application" , Nuclear Instrument and Methods, B37/38 p111 (1989)
- (6) M.Hanada, et al., " A14cm x 36cm volume negative ion source producing  
multi-ampere H<sup>-</sup> ion beams" , Rev.Sci.Instrum. 61(1) p499 (1990)
- (7) Y.Ohara ,et al., " 3D comuputer simulation of the primary electron orbits in a magnetic  
multipole plasma source" , J.Appl.Phys. 61(4) p1323 (1987)
- (8) M.Hanada, M.Tanaka, et al., " Production of a Long Pulse Negative Ion Beam with  
Multi-Ampere" , Proc.of the 3rd Symposium on the Beam Engineering of Advanced  
Material Syntheses, p103 (1992)

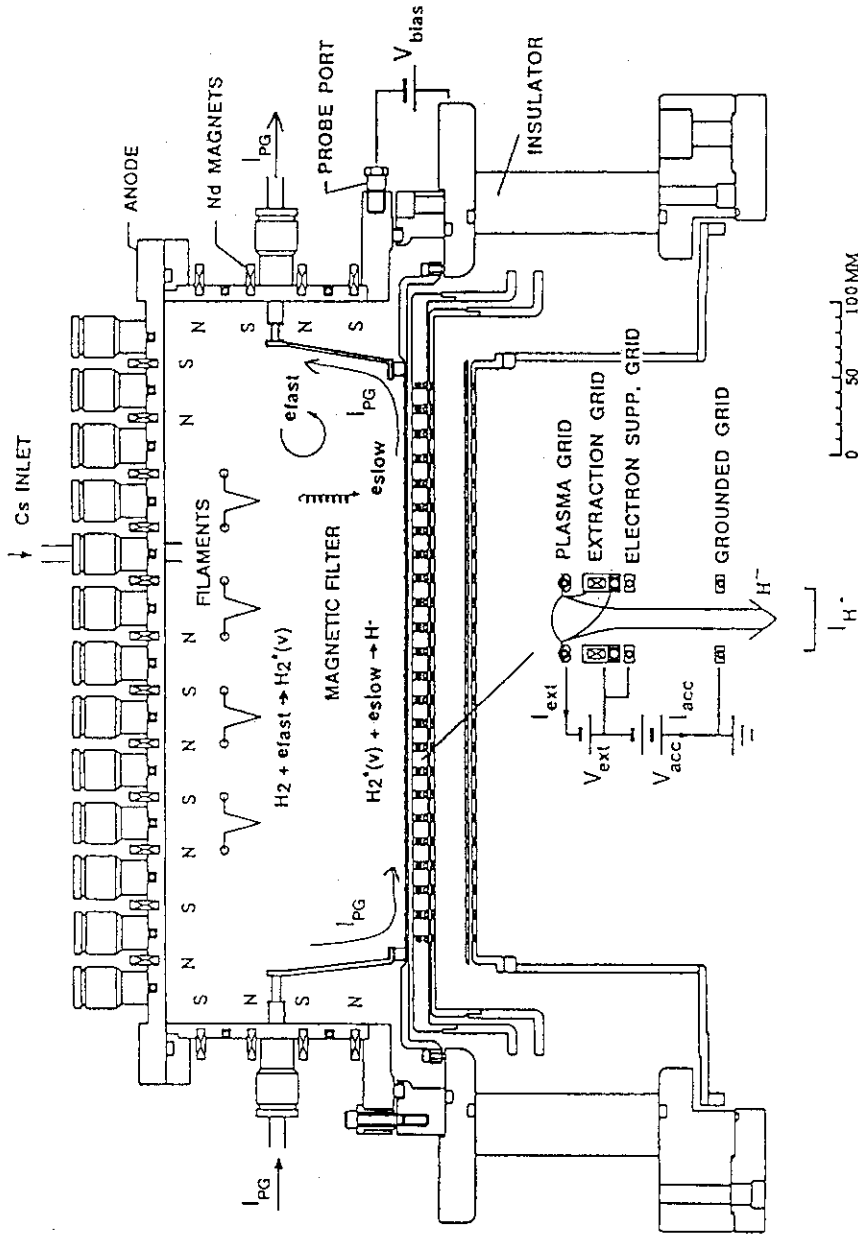
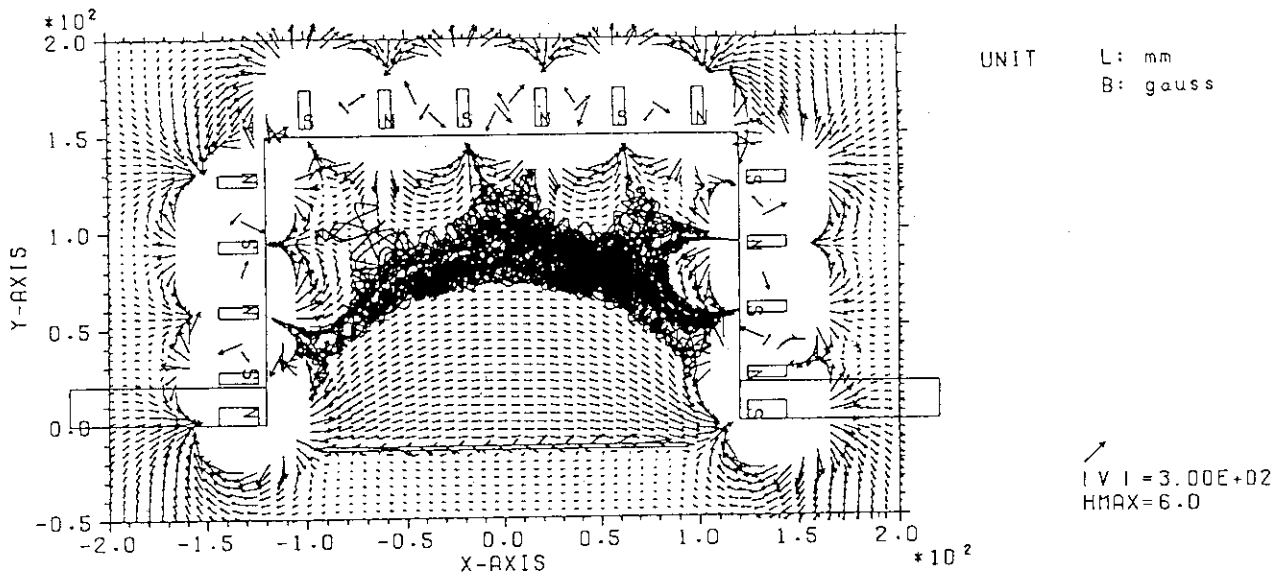
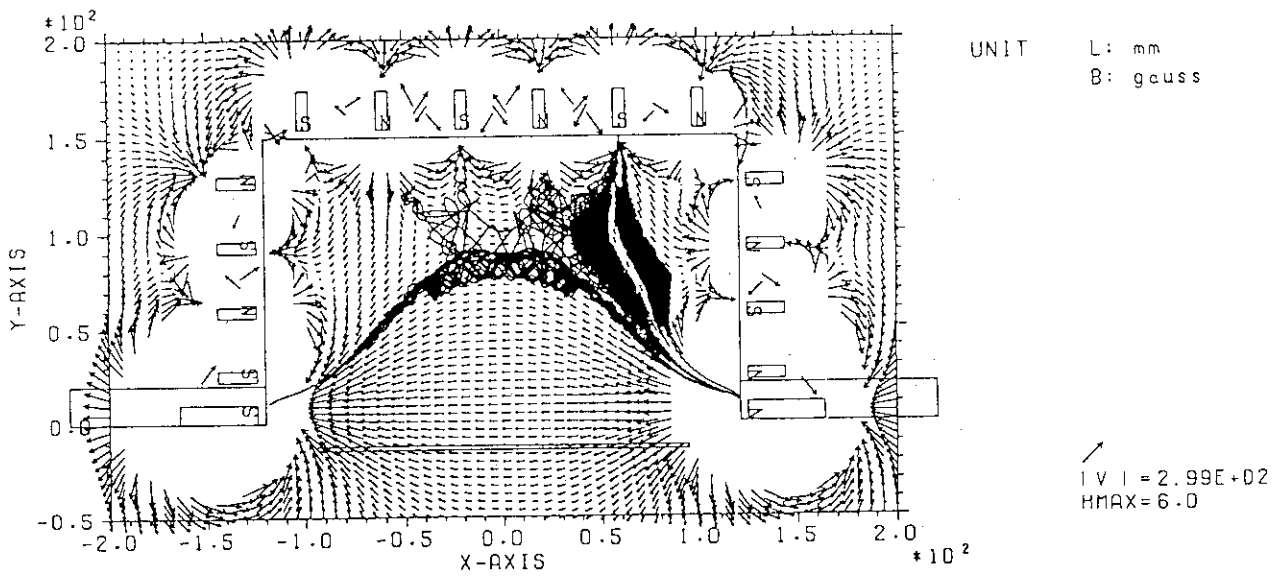


図1 10A負イオン源

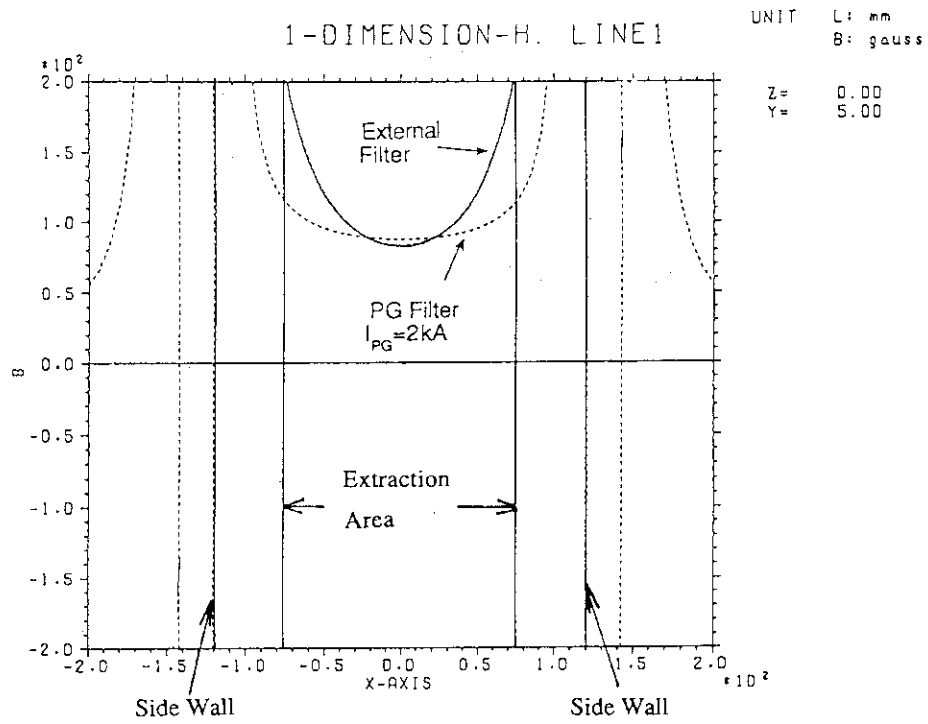


(a) PGフィルター ( $I_{PG} = 2kA$ )

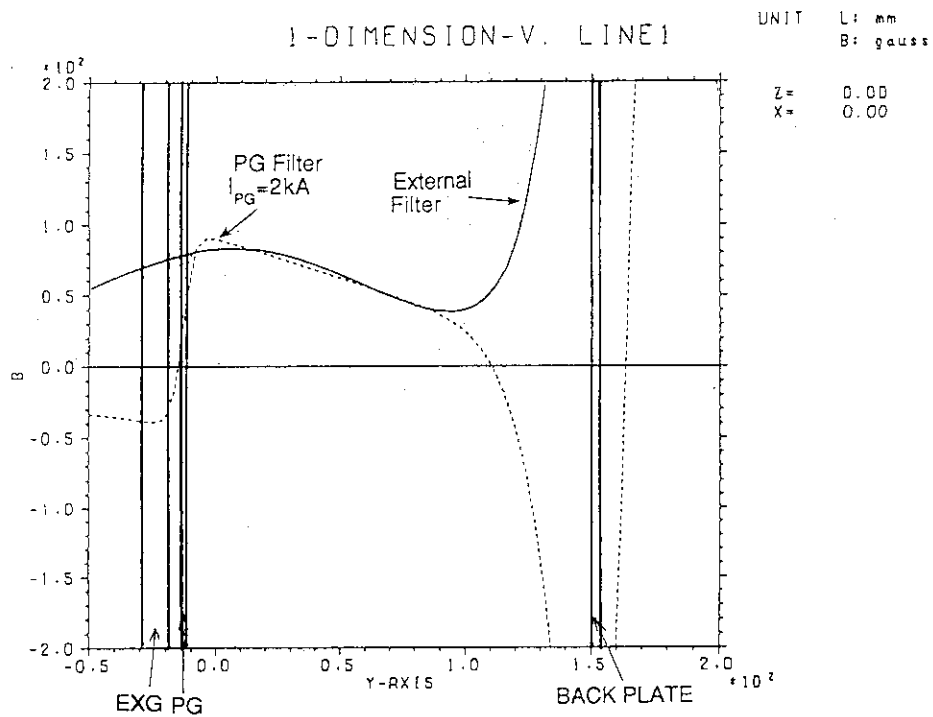


(b) 外部フィルター

図2 フィルター磁場ベクトル図及び電子軌道



(a) フィルター磁場方向の磁束密度分布



(b) ビーム軸方向の磁束密度分布

図3 PGフィルターと外部フィルターの磁束密度分布



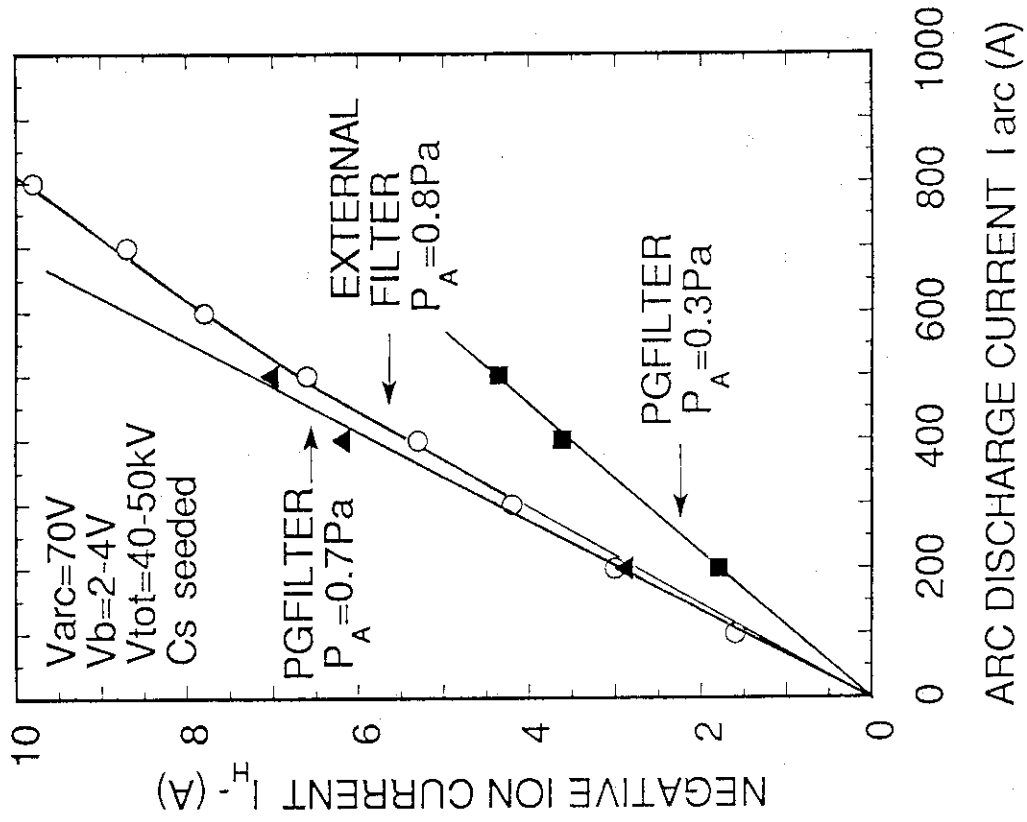


図5 負イオンビーム電流とアークパワーの関係

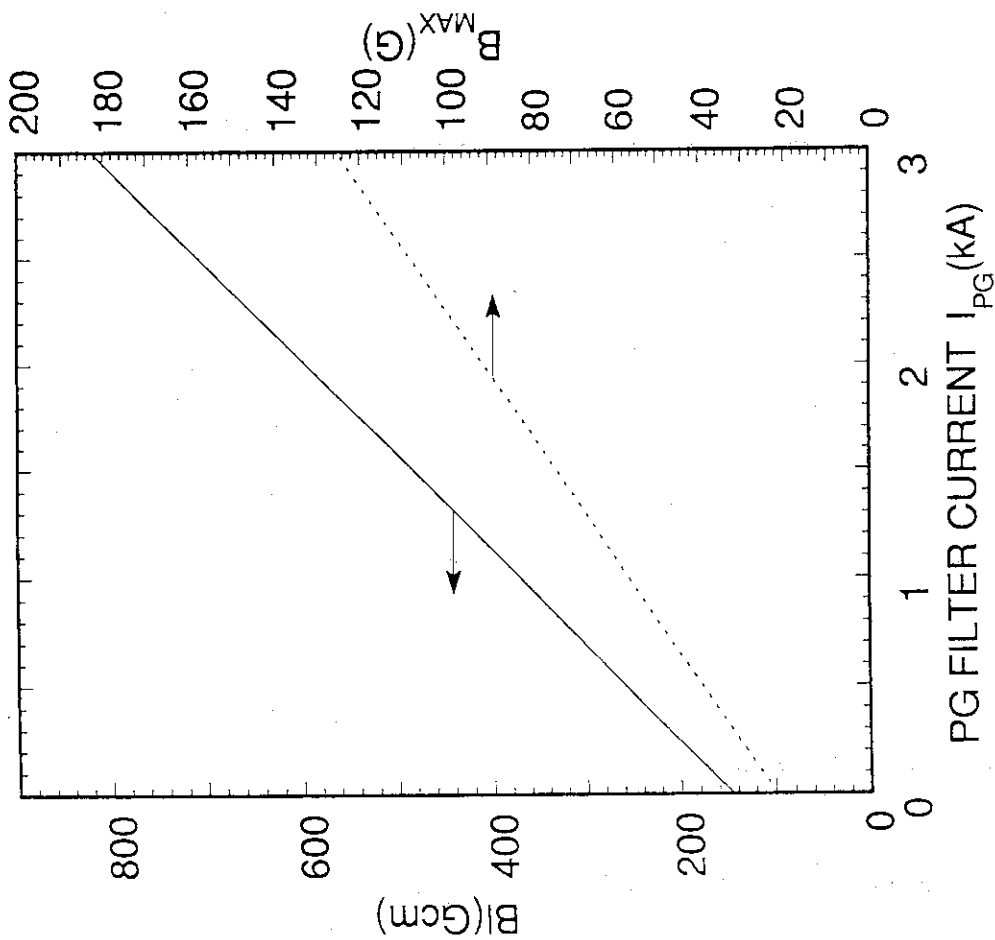


図4 PGフィルターの $B_1$ 及び $B_{MAX}$ と $I_{PG}$ の関係

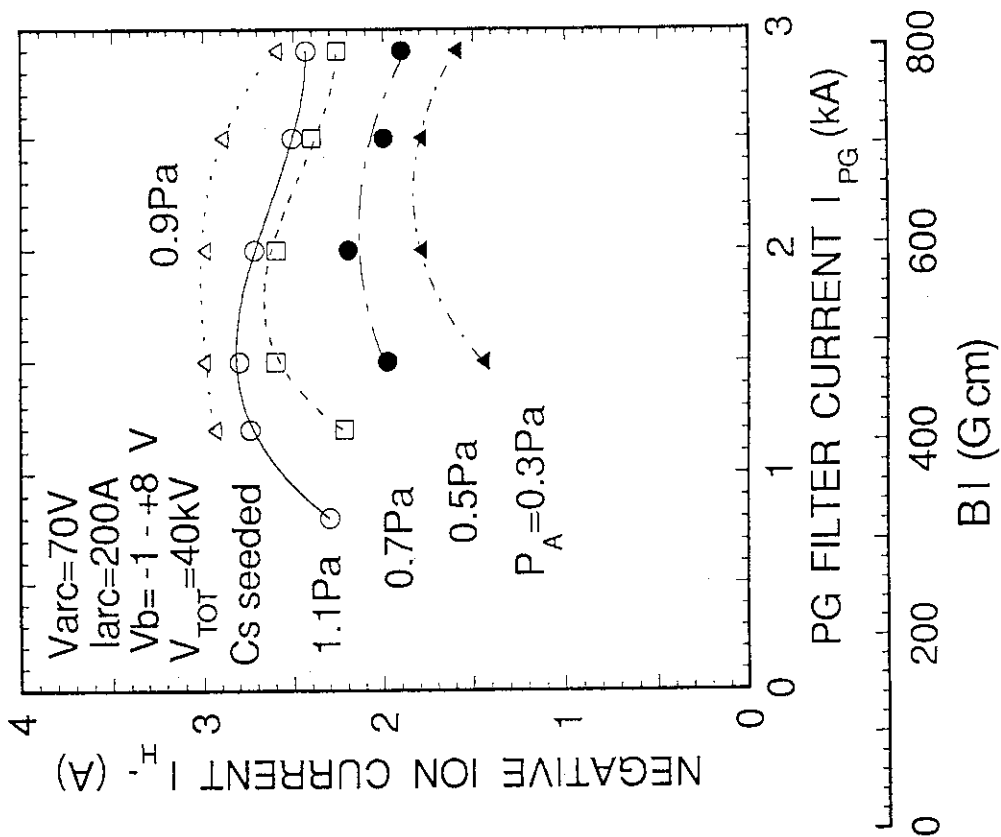


図7 ガス圧をパラメータとした負イオンビーム電流と  $I_{PG}$  の関係

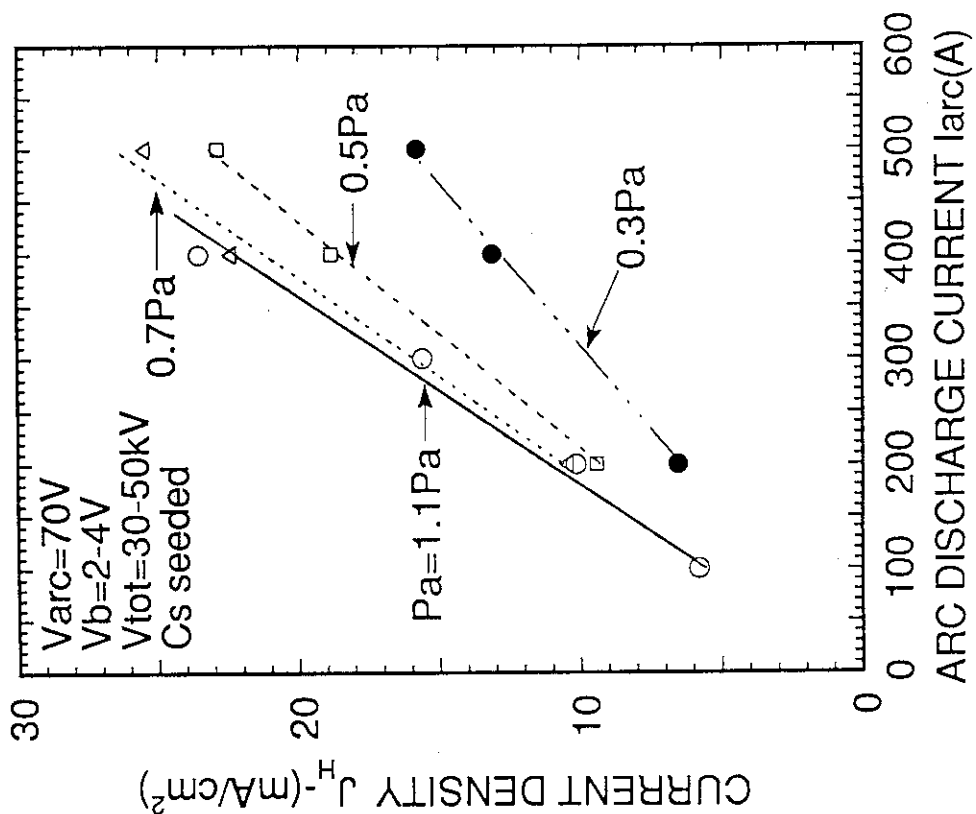


図6 負イオンビーム電流密度とアークパワーの関係

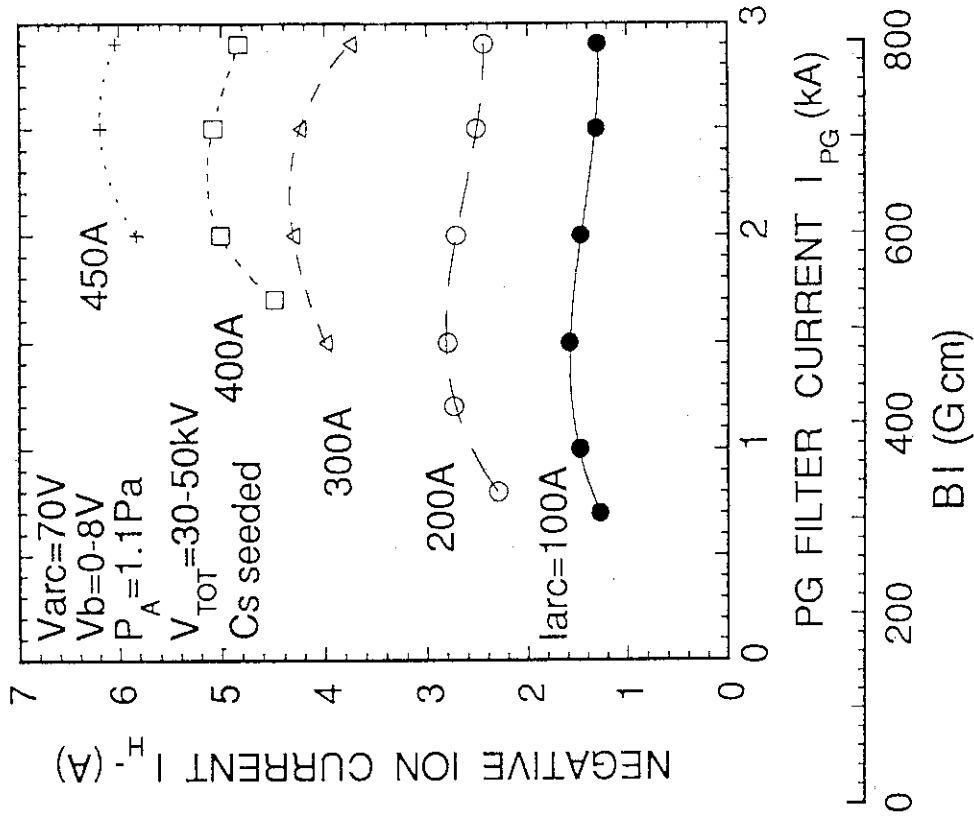


図9 アークパワーをパラメータとした負イオンビーム電流と  $I_{PG}$  の関係

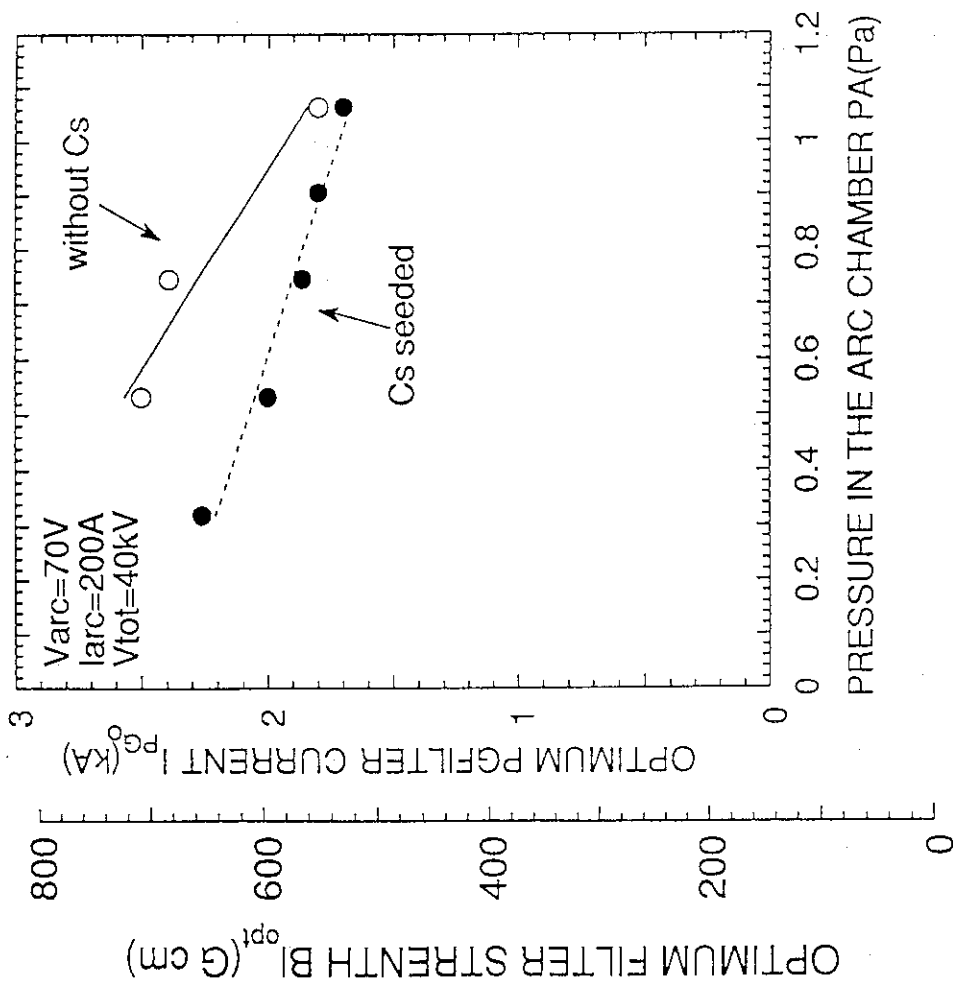


図8 最適フィルター強さとガス圧の関係

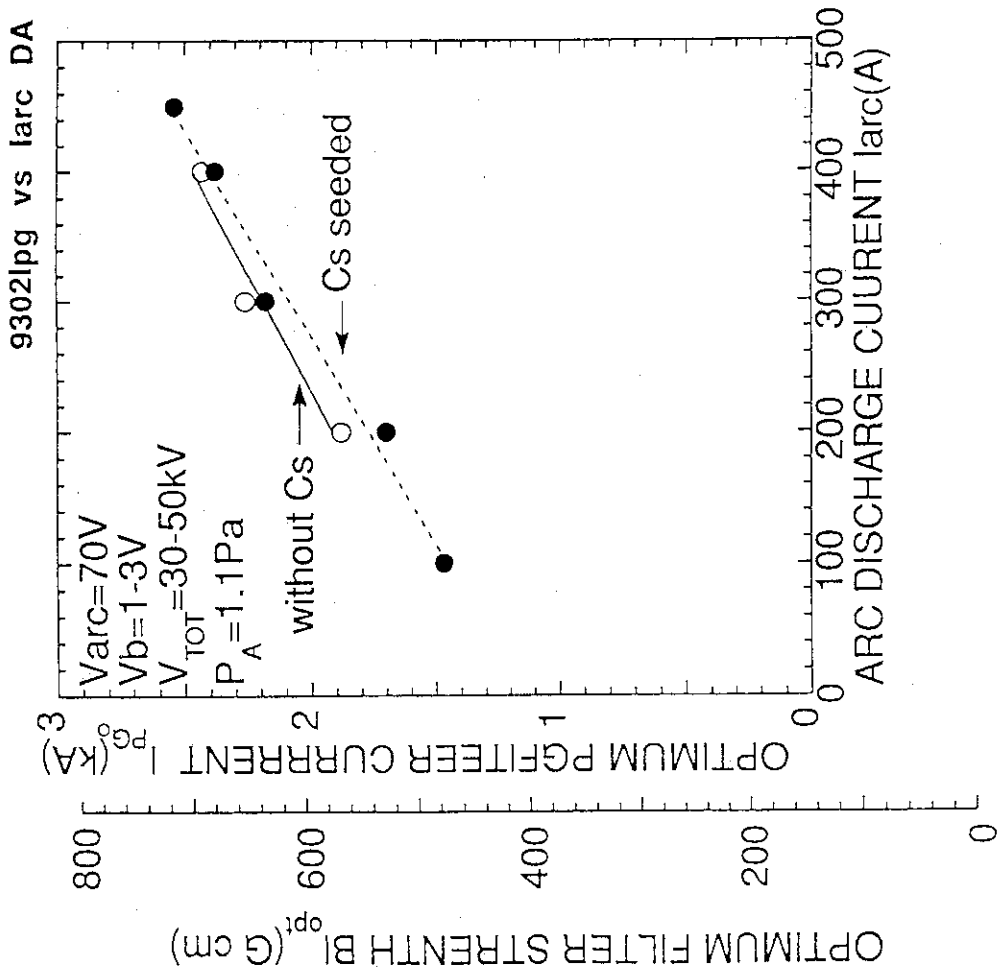
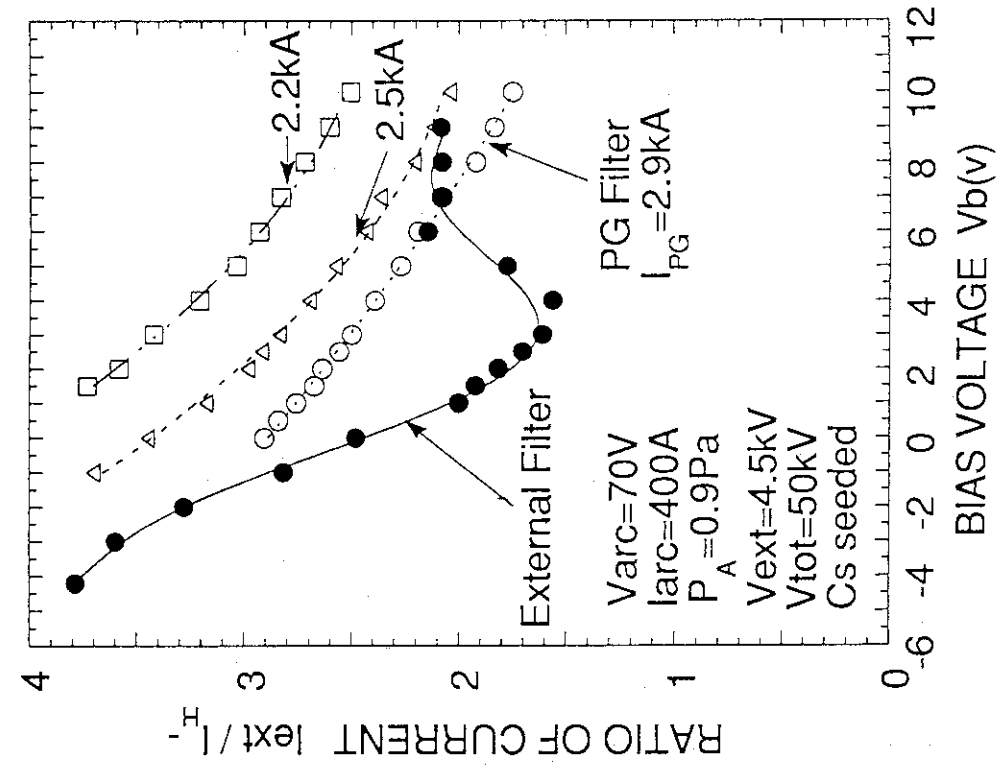


図10 最適フィルター強さとアークパワーの関係

図11 引き出し電流と負イオンビーム電流の比とバイアス電圧の関係

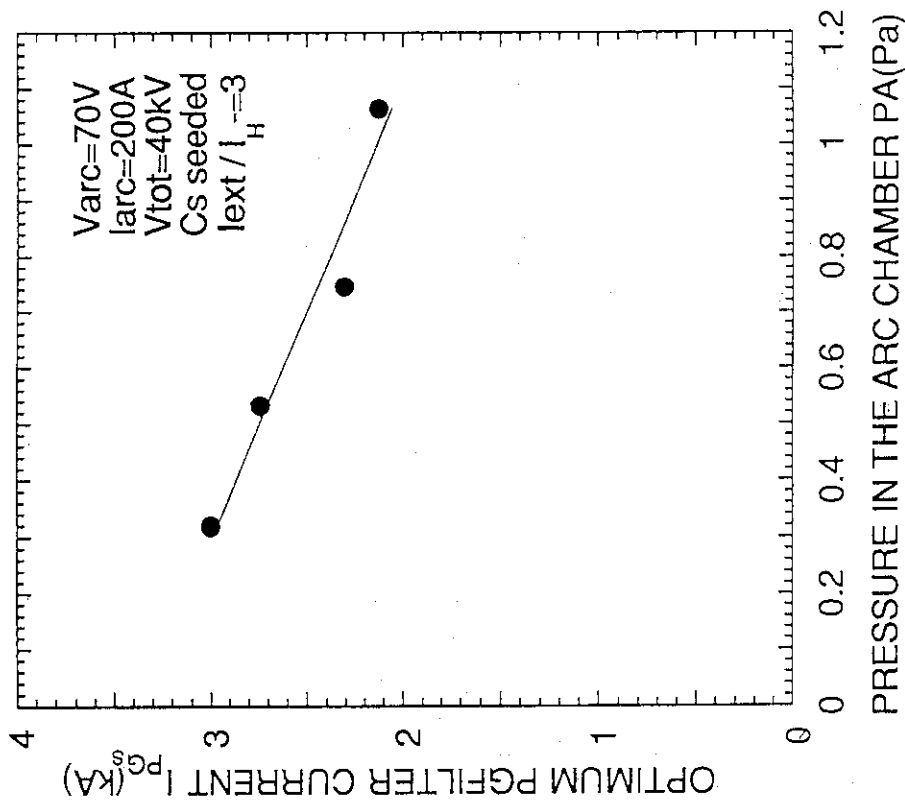


図13 引き出し電流を考慮した最適フィルター強さとガス圧の関係

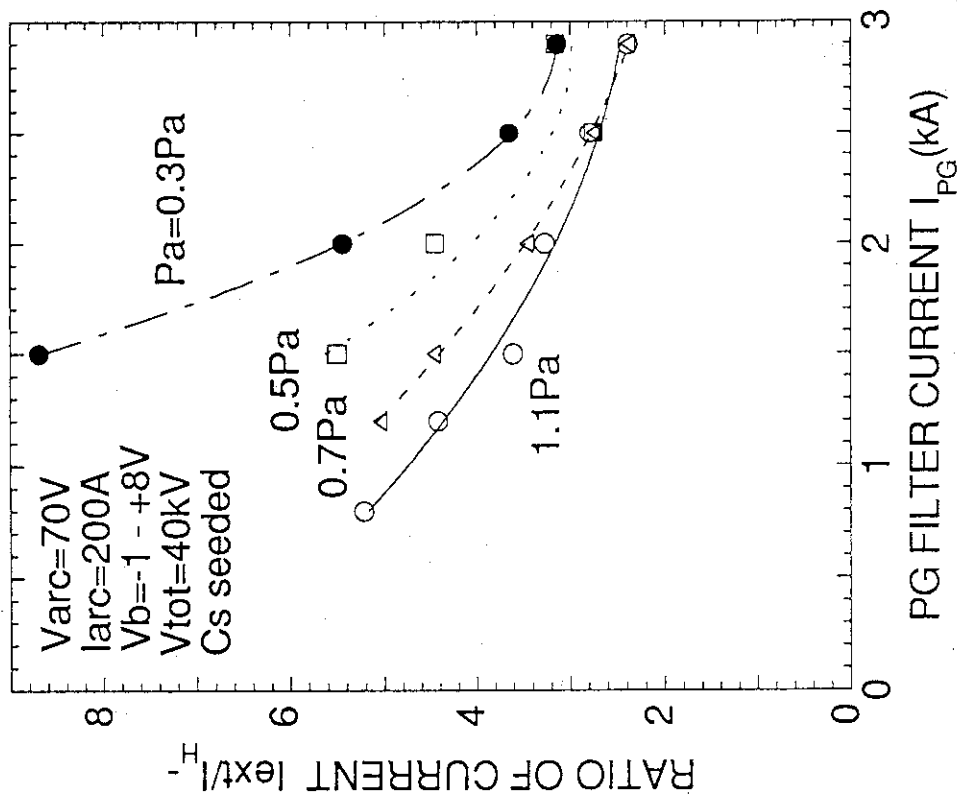


図12 引き出し電圧と負イオンビーム電流の比とフィルター強さの関係

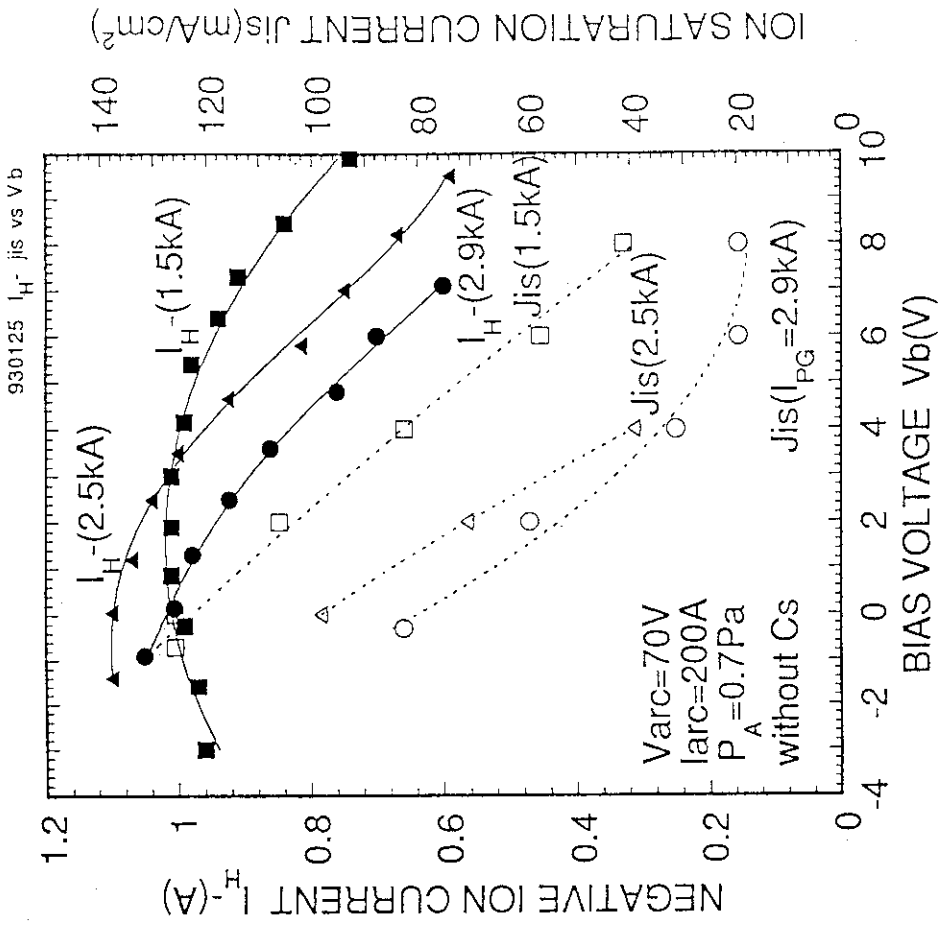


図14 負イオン電流及びイオン飽和電流密度とバイアス電圧の関係  
1 (Csを添加した場合としない場合の比較)

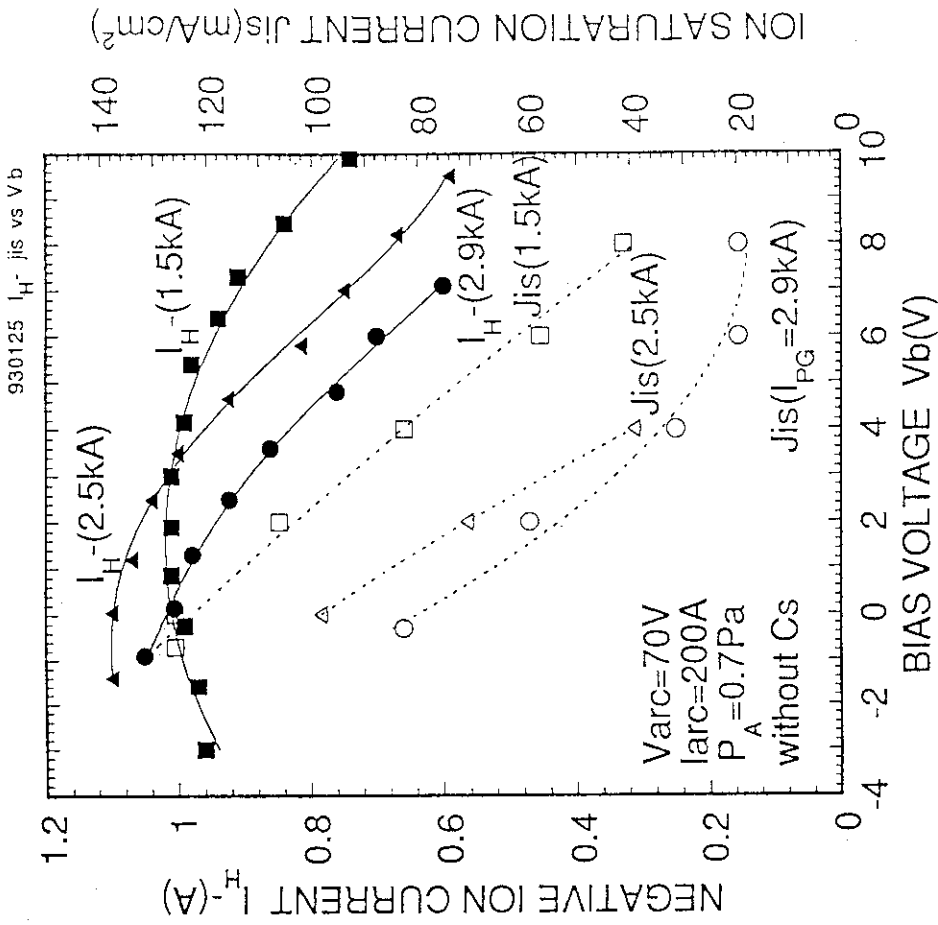


図15 負イオン電流及びイオン飽和電流密度とバイアス電圧の関係  
2 (フィルタースキームによる特性の変化)

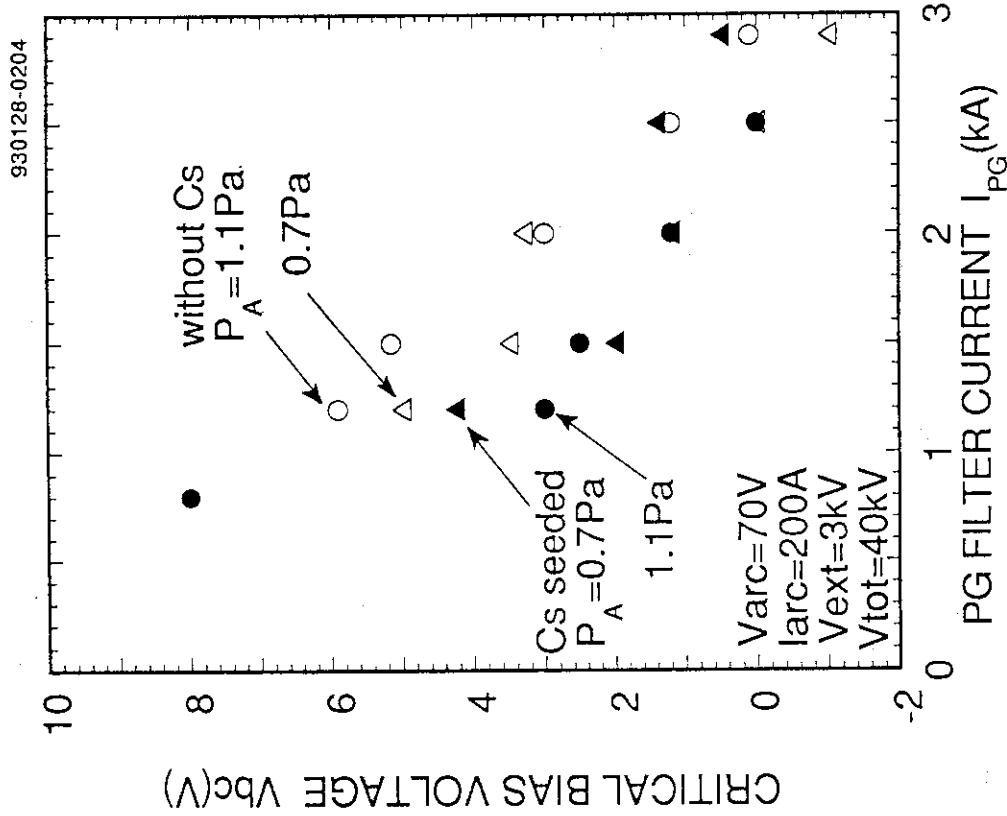


図16 負イオン電流が低下し始めるバイアス電圧とフィルタ一強さの  
の関係

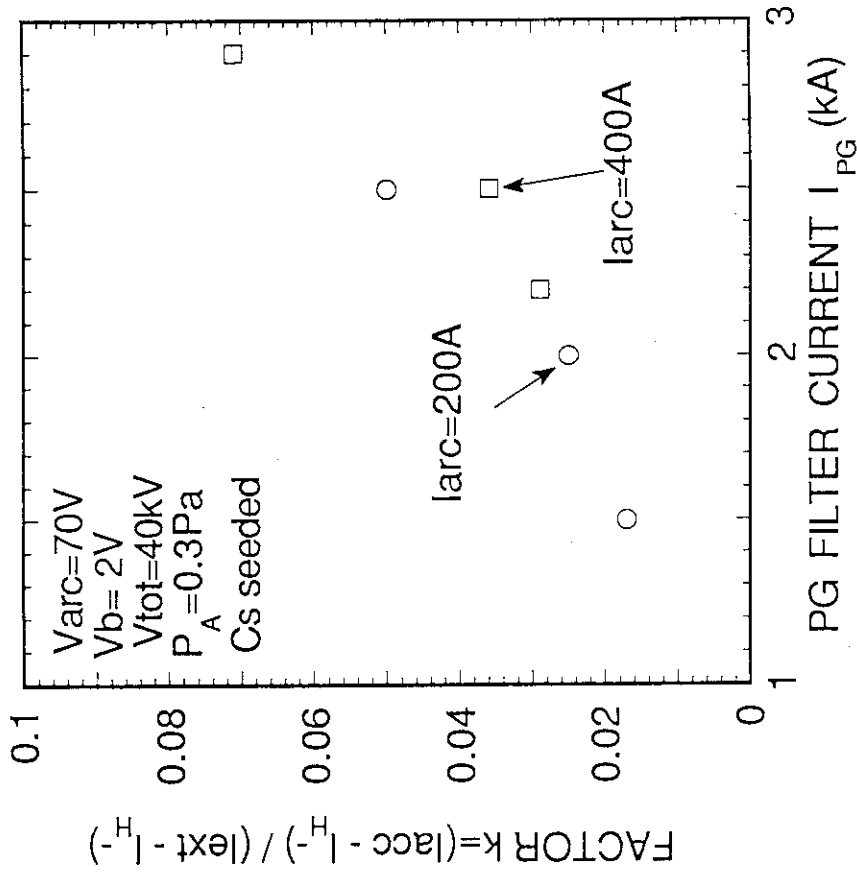


図17  $k = (I_{acc} - I_{H^-}) / (I_{ext} - I_{H^-})$  とフィルタ一強さの関係

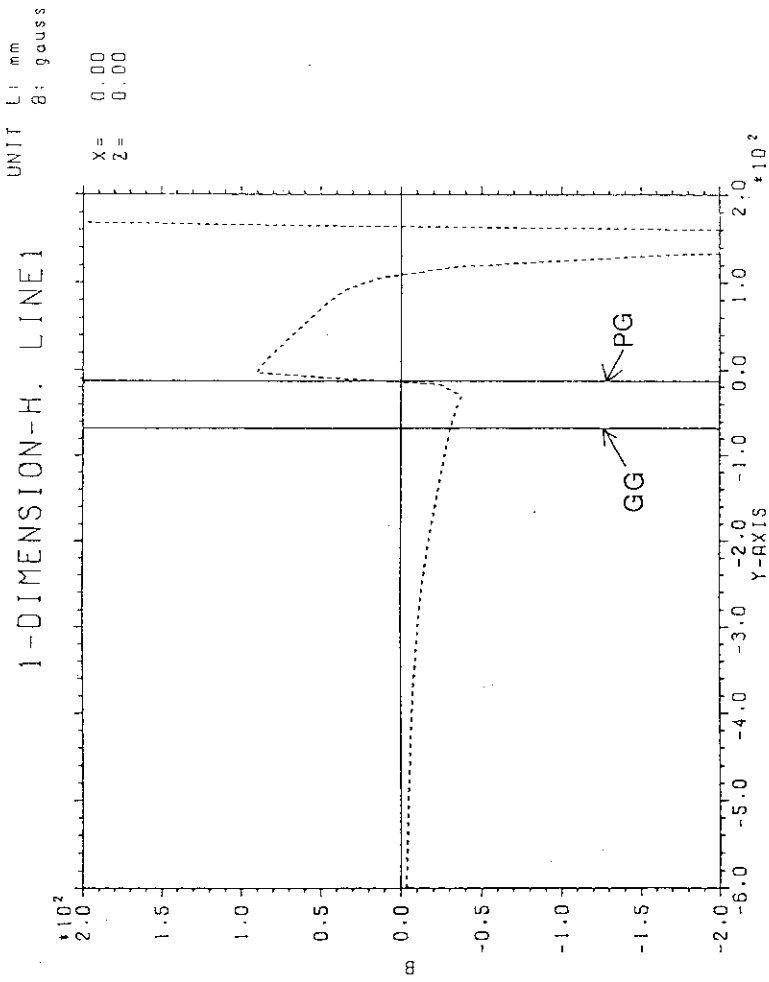


図19 PGフィルター磁場のビーム軸方向分布

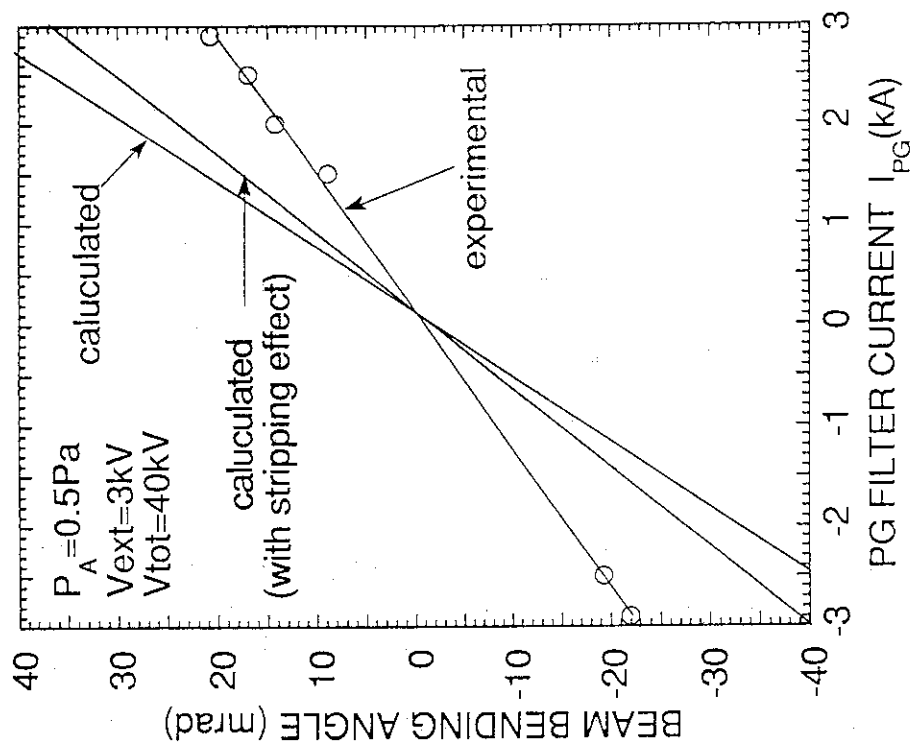


図18 フィルター磁場によるビームの偏向角とフィルター強さの関係



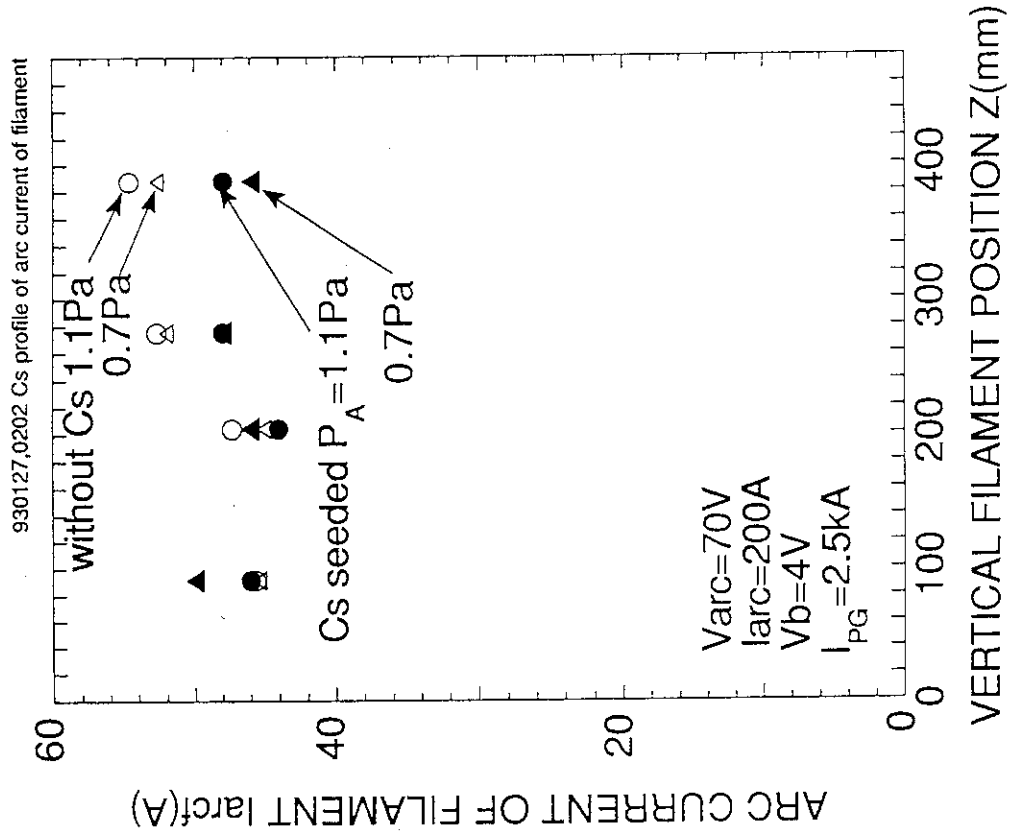


図21 フライメントに流れるアーク放電電流の長手方向分布

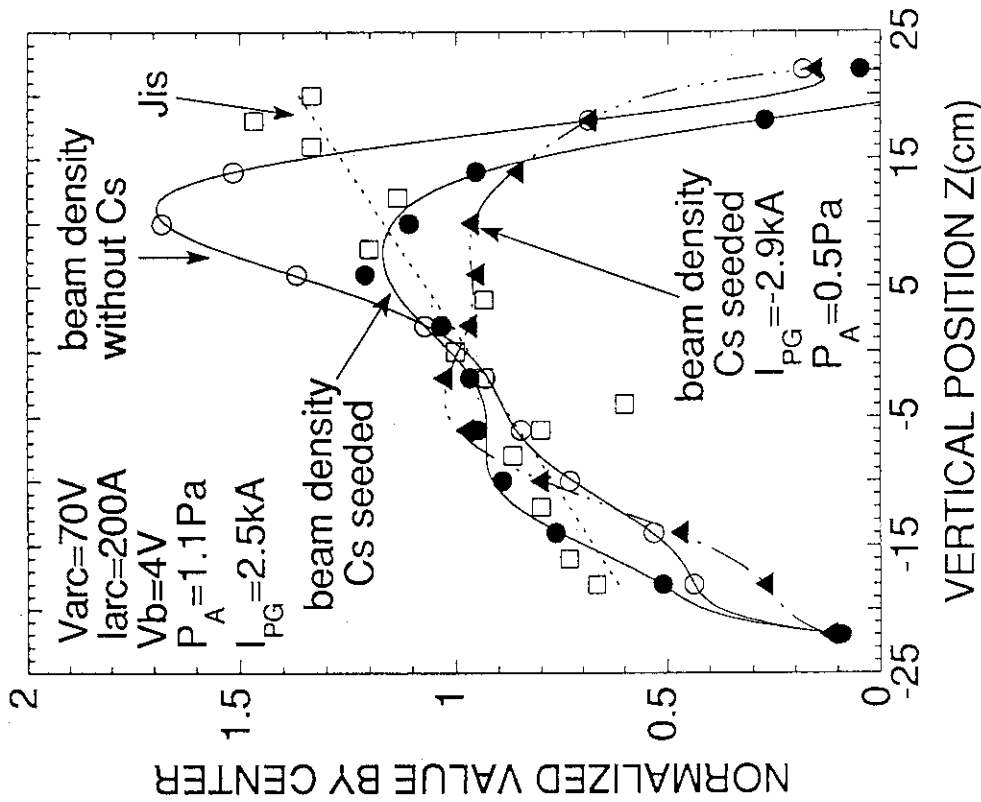


図20 負イオンビーム電流密度及びイオン飽和電流密度の長手方向分布

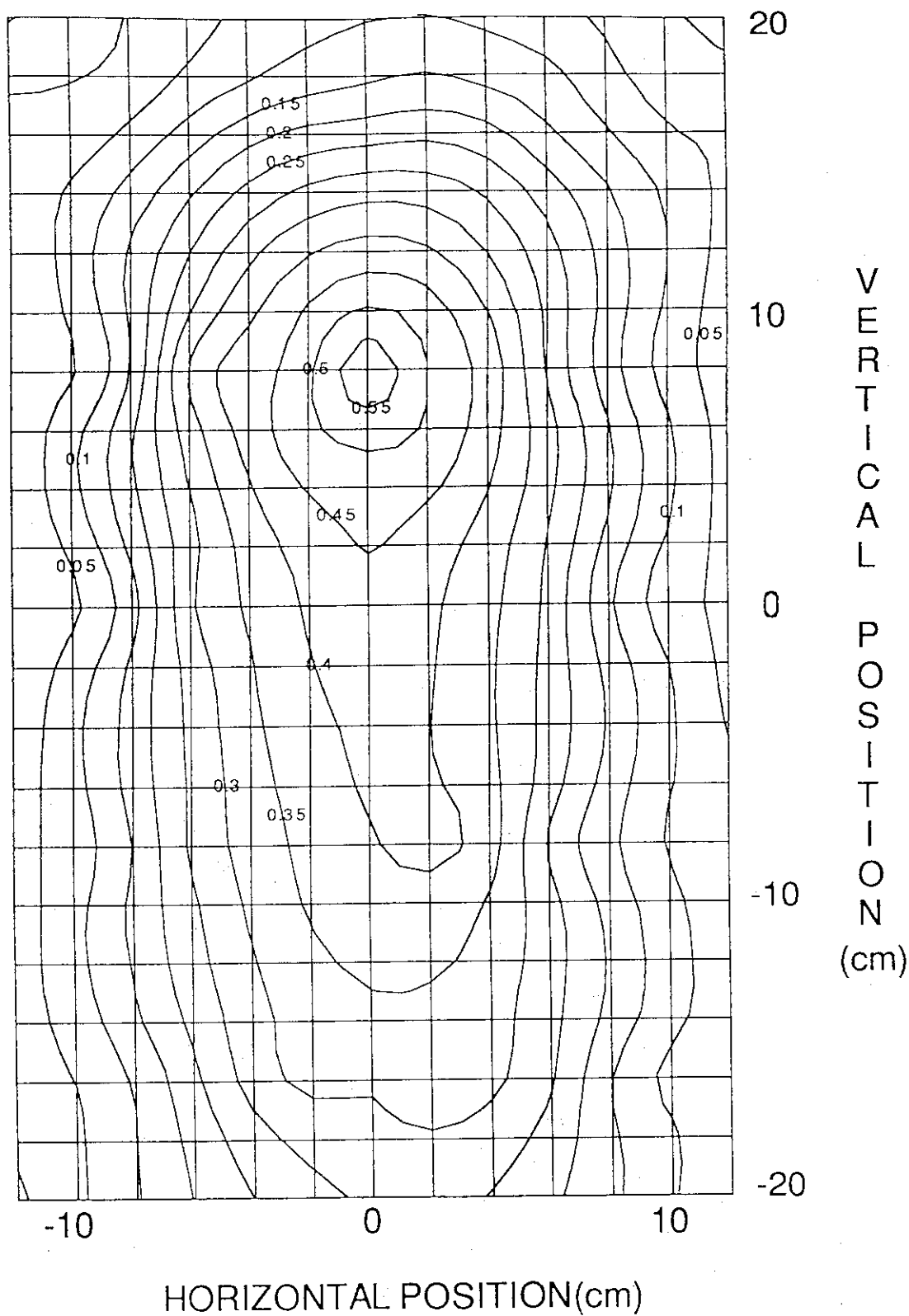


図22 負イオンビーム電流密度の2次元分布  
 (Varc=70V, Iarc=200A, Vb=-1.8V, P<sub>A</sub>=1.1P<sub>A</sub>, V<sub>ext</sub>  
 t=3KV, V<sub>tot</sub>=40KV)

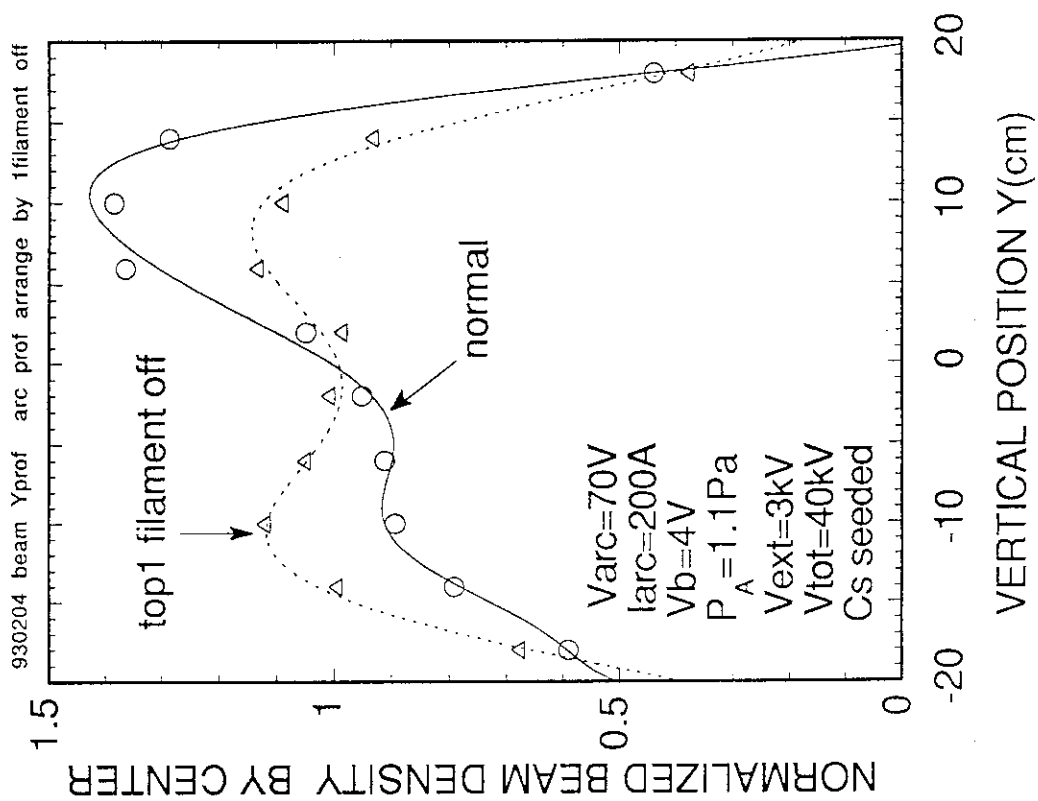


図24 負イオンビーム電流密度のフィラメントによる補正

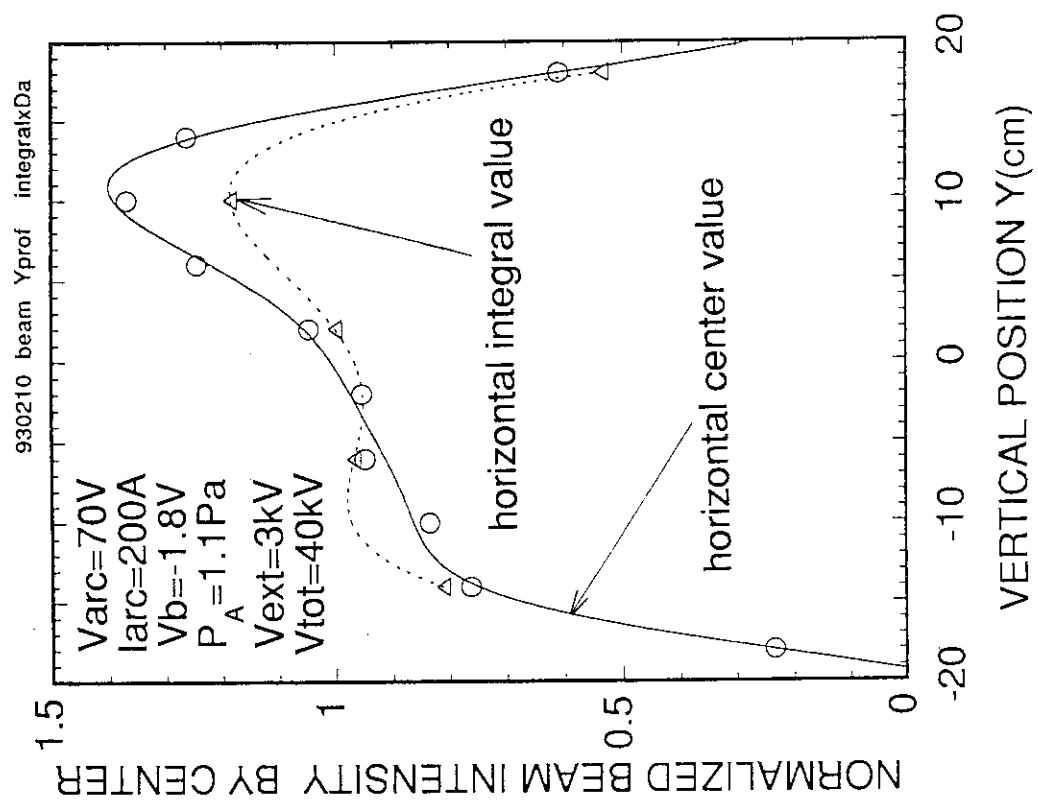


図23 負イオンビーム電流密度の短手方向積分値の長手方向分布