

JAERI - M

87-005

JFT-2M 中性粒子入射装置用バケツト型  
イオン源ソースプラズマ生成部の開発

1987年2月

柴田 孝俊・椋沢 稔・横山 堅二  
渋谷 俊広・本田 敦・椎名 富雄

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。  
入手の問合わせは、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, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

JFT-2M中性粒子入射装置用バケット型イオンソースプラズマ生成部の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

柴田孝俊・桃沢 稔・横山堅二

波谷俊広・本田 敦・椎名富雄

(1987年1月16日受理)

高性能トカマク開発試験装置（以下JFT-2M装置という）の追加熱装置である高加熱密度試験用中性粒子入射装置（以下NBI装置という）の高性能化のため、イオン源のソースプラズマ生成部をデュオピガトロン型からバケット型に改造し、プロトン比の向上とJFT-2Mトラスへの入射パワーの増大を図った。

本報告は、バケット型ソースプラズマ生成部の構造とその特性及び性能について報告するものである。

Development of Bucket Ion Source for  
JFT-2M Neutral Beam Injector

Takatoshi SHIBATA, Minoru KAZAWA, Kenji YOKOYAMA,  
Toshihiro SHIBUYA, Atsushi HONDA and Tomio SHIINA

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

(Received January 16, 1987)

Detailed description is given of a new Bucket Ion Source for NBI heating experiments on JFT-2M. The source is designed to achieve the high proton ratio ( $\sim 80\%$ ) as well as high power. Results of the performance test is also given.

Keywords: Bucket Ion Source, JFT-2M Neutral Beam Injector, Proton Ratio

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 各部の構造.....	1
2.1 水冷チェンバ及び上蓋.....	2
2.2 マグネット（永久磁石）及びマグネットホルダ.....	2
2.3 フィラメント及びチップ.....	2
2.4 フィラメント電流導入端子.....	3
2.5 冷却系.....	3
3. 特性及び性能.....	11
3.1 イオン源の特性.....	11
3.2 入射ビーム特性.....	11
4. おわりに.....	25
参考文献.....	25

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Construction of Each Component .....	1
2.1 Arc Chamber .....	2
2.2 Magnet and Magnet Holder .....	2
2.3 Filament and Chip .....	2
2.4 Filament Support .....	3
2.5 Cooling Line .....	3
3. Performance .....	11
3.1 Performance of Bucket Ion Source .....	11
3.2 Performance of Neutral Beam Injector .....	11
4. Conclusion .....	25
Appendix .....	25

## 1. はじめに

中性粒子入射加熱はプラズマを追加加熱するための信頼性の高い方法で、中間ベータ値トーラス装置（以下JFT-2装置という）の追加加熱装置として、昭和55年に第2期中性粒子入射加熱装置（本NBI装置）を建設し運転を開始した。当初NBI装置のイオン源は加熱工学第1研究室で研究開発された改良デュオピガトロン型イオン源4台が使用され、JFT-2トーラスへの入射パワーとして約1.5 MWを入射することができた。以来NBI装置は信頼性良く稼動し中性粒子入射加熱実験を順調に進めることができ、数々の成果を上げてきた。

一方実験と並行して入射パワーの増大を含めたNBI装置の性能の向上に関する検討を行ない、昭和57年にJFT-2装置がJFT-2M装置へ改造されたのを契機に、昭和58年に中性粒子ビームの入射時間を50 mSから200 mSへ延ばすための改装を行ない、入射時間のロングパルス化を図った。さらに、入射ビームの質を上げるために、デュオピガトロン型イオン源のソースプラズマ生成室の容積を約30%増加させてプロトン比の向上を図った。この試みはプロトン比を55%から60%に改善することができた。しかしイオン源からのビーム引出し電流が減少したために、JFT-2Mトーラスへの入射パワーとしては十分な値を得ることができなかった。

この問題を解決するために、昭和60年にソースプラズマ生成部をバケット型に改造することにし、高プロトン比のバケット型ソースプラズマ生成部の設計（プロトン比~80%）、製作を行ないNBI装置本体に取付けた。その結果、プロトン比が約80%、JFT-2Mトーラスへの入射パワーを1.5 MWから1.7 MWに増大させることができた。

## 2. 各部の構造

バケット型イオン源は、デュオピガトロン型イオン源に比べて構造がシンプルで、高いプロトン比が得られるという特徴がある。その原理は、線状のマグネット（永久磁石）をプラズマ生成室の外側に配置して、アノード電極であるプラズマ生成室の壁面内部に局所的なカスプ磁場（多極磁場）を作り、その表面磁場の強さを数kG程度に保ち、フィラメントから放出された電子を閉込める。

閉込められた電子はアノード電極に直線的に到達することができず、その有効飛行距離を増す。その間に中性の水素ガスとの衝突、電離をくりかえして多くの水素イオンを生成させる。

また、カスプ磁場は局所的な磁場であるため引出し電極付近では磁場の強さが数10G以下の低磁場の領域を広く得られるので、安定なプラズマ生成とイオンの引出しが行なえる。

図1に設計、製作したバケット型ソースプラズマ生成部の外観構造を示す。

## 1. はじめに

中性粒子入射加熱はプラズマを追加加熱するための信頼性の高い方法で、中間ベータ値トーラス装置（以下JFT-2装置という）の追加加熱装置として、昭和55年に第2期中性粒子入射加熱装置（本NBI装置）を建設し運転を開始した。当初NBI装置のイオン源は加熱工学第1研究室で研究開発された改良デュオピガトロン型イオン源4台が使用され、JFT-2トーラスへの入射パワーとして約1.5 MWを入射することができた。以来NBI装置は信頼性良く稼動し中性粒子入射加熱実験を順調に進めることができ、数々の成果を上げてきた。

一方実験と並行して入射パワーの増大を含めたNBI装置の性能の向上に関する検討を行ない、昭和57年にJFT-2装置がJFT-2M装置へ改造されたのを契機に、昭和58年に中性粒子ビームの入射時間を50 mSから200 mSへ延ばすための改装を行ない、入射時間のロングパルス化を図った。さらに、入射ビームの質を上げるために、デュオピガトロン型イオン源のソースプラズマ生成室の容積を約30%増加させてプロトン比の向上を図った。この試みはプロトン比を55%から60%に改善することができた。しかしイオン源からのビーム引出し電流が減少したために、JFT-2Mトーラスへの入射パワーとしては十分な値を得ることができなかった。

この問題を解決するために、昭和60年にソースプラズマ生成部をバケット型に改造することにし、高プロトン比のバケット型ソースプラズマ生成部の設計（プロトン比~80%）、製作を行ないNBI装置本体に取付けた。その結果、プロトン比が約80%、JFT-2Mトーラスへの入射パワーを1.5 MWから1.7 MWに増大させることができた。

## 2. 各部の構造

バケット型イオン源は、デュオピガトロン型イオン源に比べて構造がシンプルで、高いプロトン比が得られるという特徴がある。その原理は、線状のマグネット（永久磁石）をプラズマ生成室の外側に配置して、アノード電極であるプラズマ生成室の壁面内部に局所的なカスプ磁場（多極磁場）を作り、その表面磁場の強さを数kG程度に保ち、フィラメントから放出された電子を閉込める。

閉込められた電子はアノード電極に直線的に到達することができず、その有効飛行距離を増す。その間に中性の水素ガスとの衝突、電離をくりかえして多くの水素イオンを生成させる。

また、カスプ磁場は局所的な磁場であるため引出し電極付近では磁場の強さが数10 G以下の低磁場の領域を広く得られるので、安定なプラズマ生成とイオンの引出しが行なえる。

図1に設計、製作したバケット型ソースプラズマ生成部の外観構造を示す。



## 2.1 水冷チェンバ及び上蓋

水冷チェンバ及び上蓋は、アーク放電によって発生したソースプラズマを閉込めておくための真空容器で、非磁性体材料のステンレス鋼SUS 316を使用している。

水冷チェンバの寸法は、既設加速部のビーム引出し領域が185 mm $\phi$ であり、それとの整合性を考慮して内径290 mm、奥行256 mm（有効奥行242 mm）、厚さ6 mmの円筒型とした。その大気圧側の外壁には、ソースプラズマを閉込めるためのマグネット（永久磁石）を円周方向6段にわたって配置し、冷却のための冷却管（内径4.2 mm）を外壁面上に銀口一付けしてある。また、フィラメントに電流を供給するためのフィラメント電流導入端子16個（フィラメント8系統分）を円周方向22.5°の均等割りで取付けてある。

上蓋は、直径360 mm、厚さ7 mmの円形フランジ構造になっていて、水冷チェンバと同様にマグネットを同心円状に3周にわたって配置し、冷却のための冷却管が銀口一付けされている。また、チェンバ内の真空度を測定するための真空度測定ポートを中心にして、左右に水素ガス供給のためのガス供給ポートを配置した。

水冷チェンバと上蓋との真空シールは、バイトンOリングを使用し、組立て後の真空許容リーク量は $1.0 \times 10^{-8}$  Torr $\cdot$ ℓ/S以下とした。

図2に水冷チェンバと上蓋の組立て構造を、図3に上蓋の構造を示す。

## 2.2 マグネット（永久磁石）及びマグネットホルダ

マグネットは、カプス磁場を作って効率良くソースプラズマを閉込めるためのもので、水冷チェンバの円周方向に6段、上蓋の同心円上に3段にわたって配置してある。マグネットの材質は、サマリウム・コバルト製で、その断面形状は6 mm $\times$ 20 mm、エネルギー積18～20 MG $\cdot$ Oeのものを使用した。また、水冷チェンバには長さ40 mmのマグネットを144個、上蓋には長さ16 mm、40 mm、45 mmのマグネットを、それぞれ10個、10個、15個使用している。

図4に水冷チェンバ及び上蓋のマグネットの配置を示す。

マグネットホルダは、マグネットを支持固定するためのもので、水冷チェンバのマグネットホルダはステンレス鋼製のものを、上蓋のマグネットホルダは銅製のものを使用している。なお、上蓋用のマグネットホルダには冷却管を施し除熱できる構造になっている。

図5に上蓋用のマグネットホルダの構造を示す。

## 2.3 フィラメント及びチップ

フィラメントは、直熱型ダンステンフィラメント（純度99.95%以上）で長さ約200 mm、直径1.5 mmのものを8本配置した。なおその形状は、フィラメント電流が作る磁場を打消し合うような無誘導型が安定したアーク放電が得られやすく、今回取付けたフィラメントはV字型の形状のフィラメントを使用した。

チップは、フィラメント電流導入端子にフィラメントを支持固定するためのもので、チップと

フィラメント電流導入端子はネジ込み式、チップとフィラメントははめ込み式にして、チップの交換及びフィラメントの交換が容易にできる構造になっている。なお、チップは熱特性が良く高融点材料でなければならないため、モリブデンを使用した。

図6にフィラメントとチップの形状を示す。

## 2.4 フィラメント電流導入端子

フィラメント電流導入端子は、フィラメントを支持固定し、かつフィラメント電流を供給するためのもので、その中心導体の材料には無酸素銅を使用し、フィラメントから伝わってくる熱を除去するため同軸型水冷構造になっている。また、絶縁セラミックで水冷チェンバとの電氣的絶縁を施してある。

フィラメント電流導入端子単体での真空許容リーク量は、 $1.0 \times 10^{-9}$  Torr $\cdot$ ℓ/S以下で、冷却水量は2 ℓ/min以上（水圧2 kg/cm<sup>2</sup>・Gにて）になっている。なお、冷却水の接続はシンフレックスチューブを用いて16個直列に配管している。

図7にフィラメント電流導入端子の構造を示す。

## 2.5 冷却系

冷却系は、フィラメントの加熱、アーク放電によって発生した熱を除去するためのもので、水冷チェンバ、上蓋及び上蓋用マグネットホルダには銅製の冷却管（内径4.2mm）を施し、フィラメント電流導入端子は同軸型水冷構造として除熱を行なっている。

冷却系統と冷却水量（圧力6 kg/cm<sup>2</sup>・Gにて）は

- |                  |            |
|------------------|------------|
| ① 水冷チェンバ         | 10 ℓ/min以上 |
| ② 上蓋、上蓋用マグネットホルダ | 10 ℓ/min以上 |
| ③ フィラメント電流導入端子   | 1 ℓ/min以上  |

になっている。冷却水のコネクタは配管の取付け、取外しが容易にできるワンタッチコネクタ（SP型カプラ）を使用した。

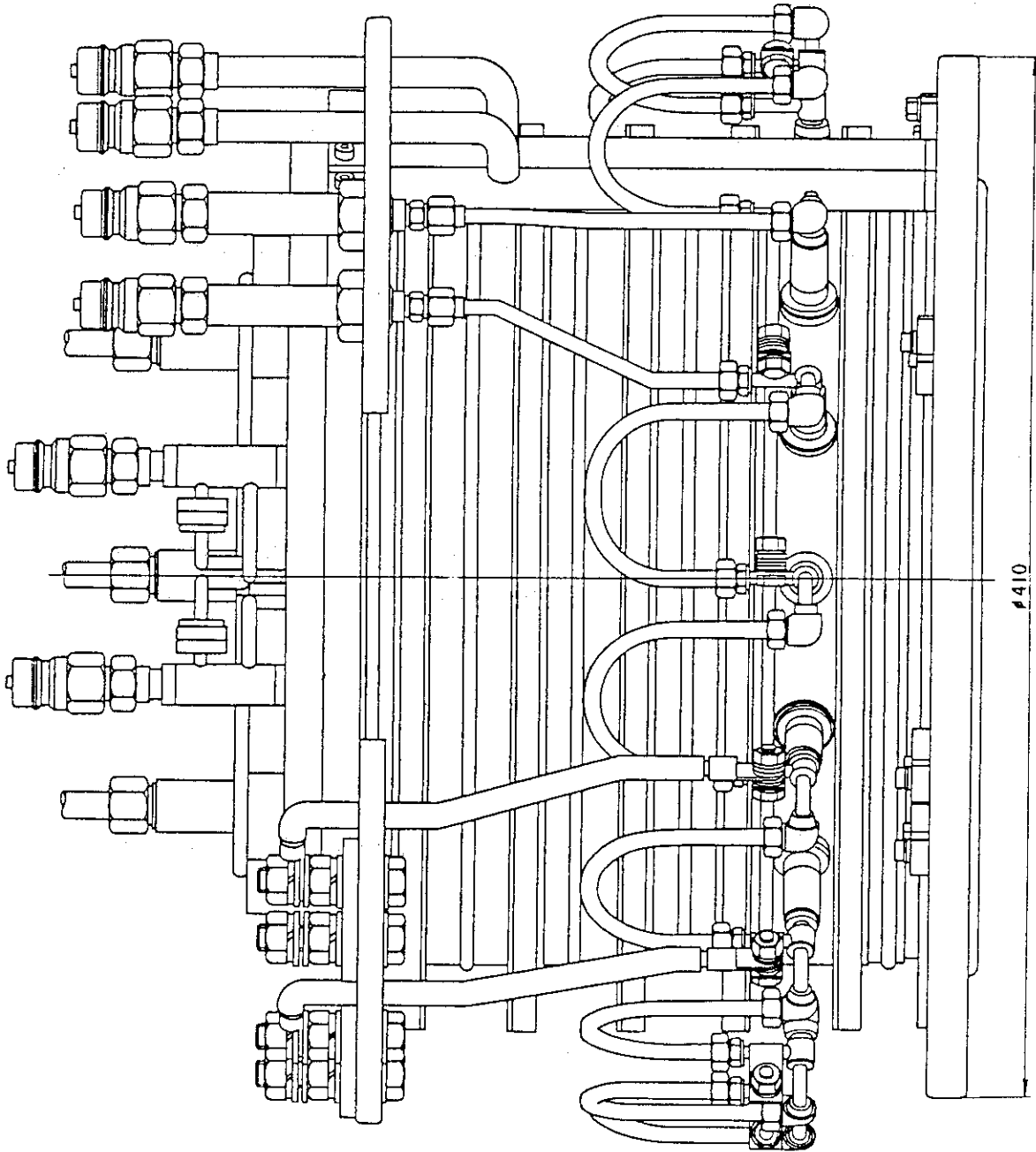


図1 バケット型ソースプラズマ生成部

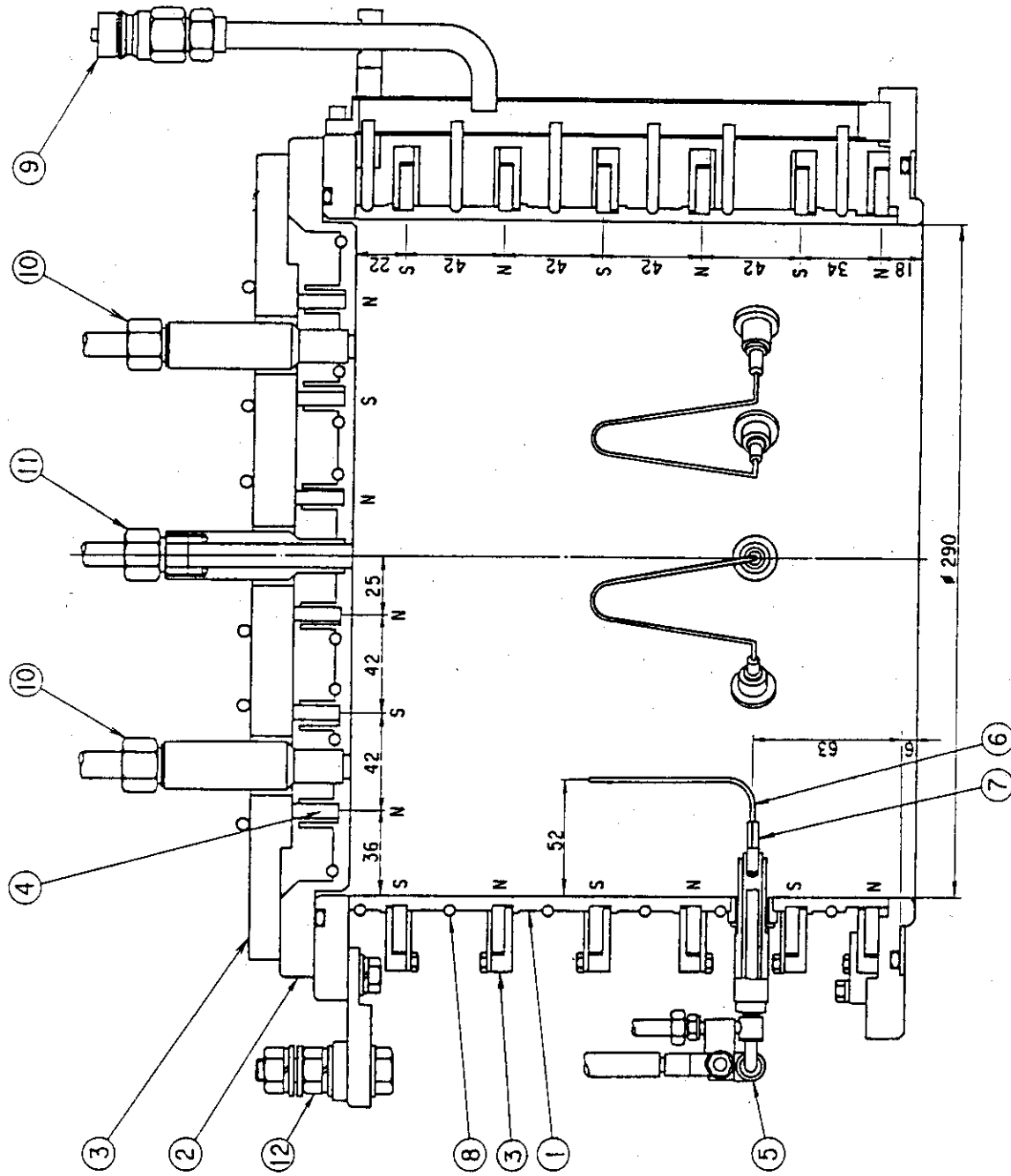


図2 水冷チェンバ、上蓋組立て図

- ① 水冷チェンバ
- ② 上蓋
- ③ マグネットホルダ
- ④ マグネット
- ⑤ フィラメント電流導入端子
- ⑥ フィラメント
- ⑦ チップ
- ⑧ 冷却管
- ⑨ 冷却水コネクタ
- ⑩ ガス導入ポート
- ⑪ ガス圧測定ポート
- ⑫ フィラメント電源ターミナル

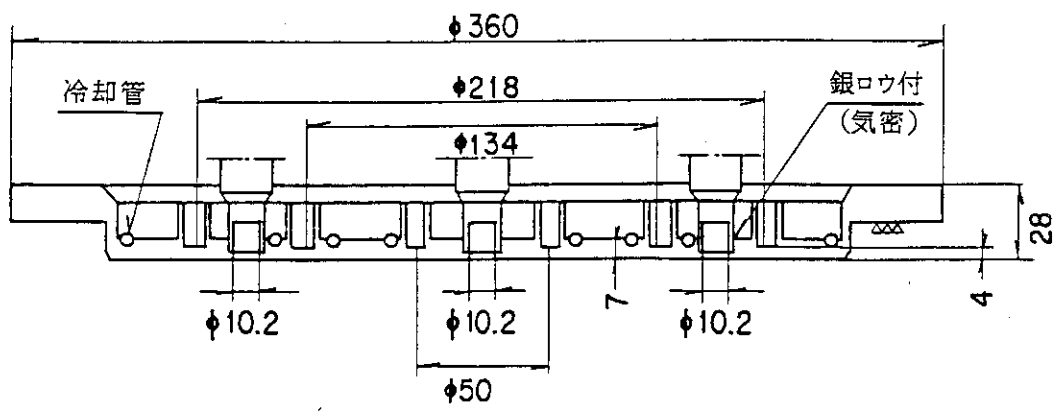
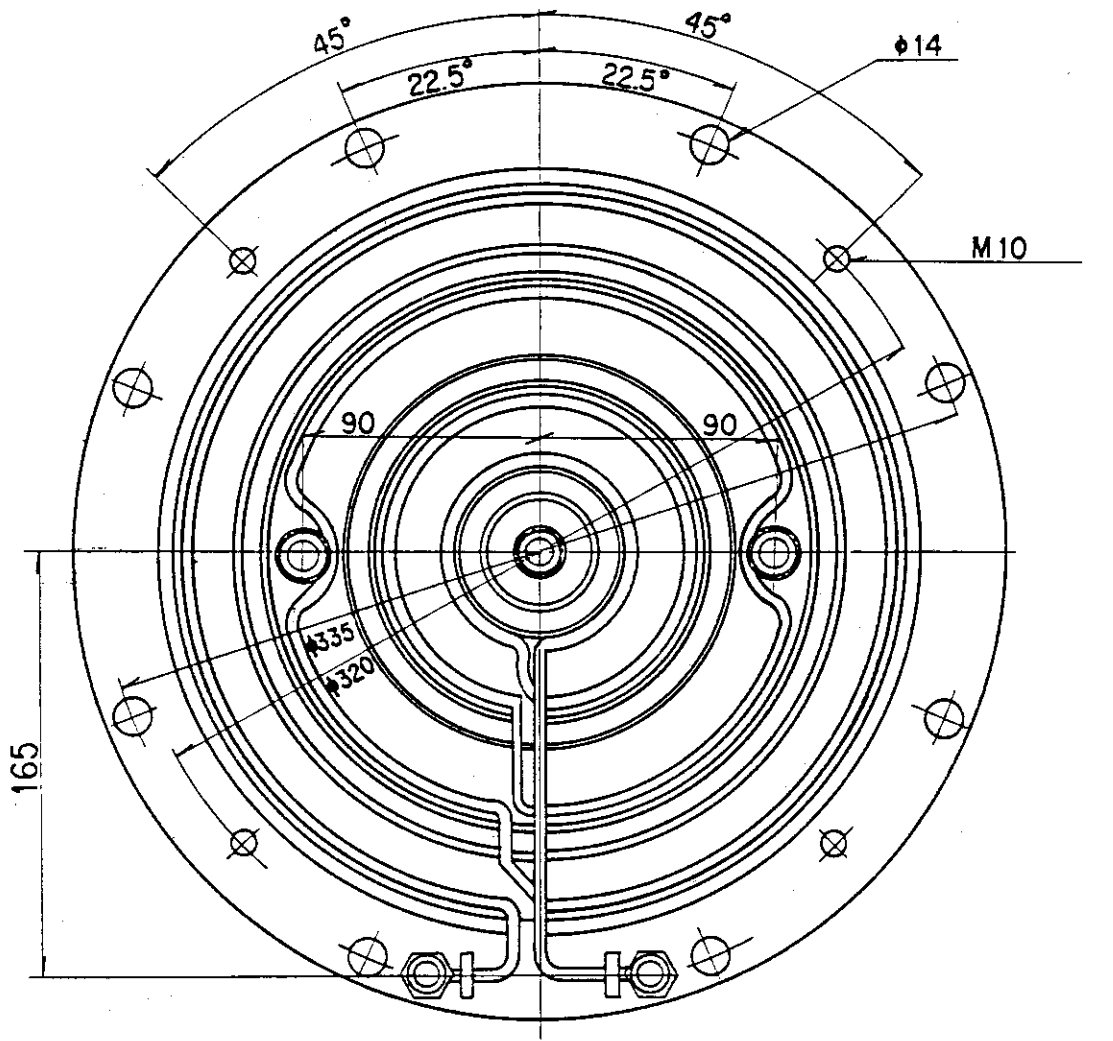


図3 上蓋構造図

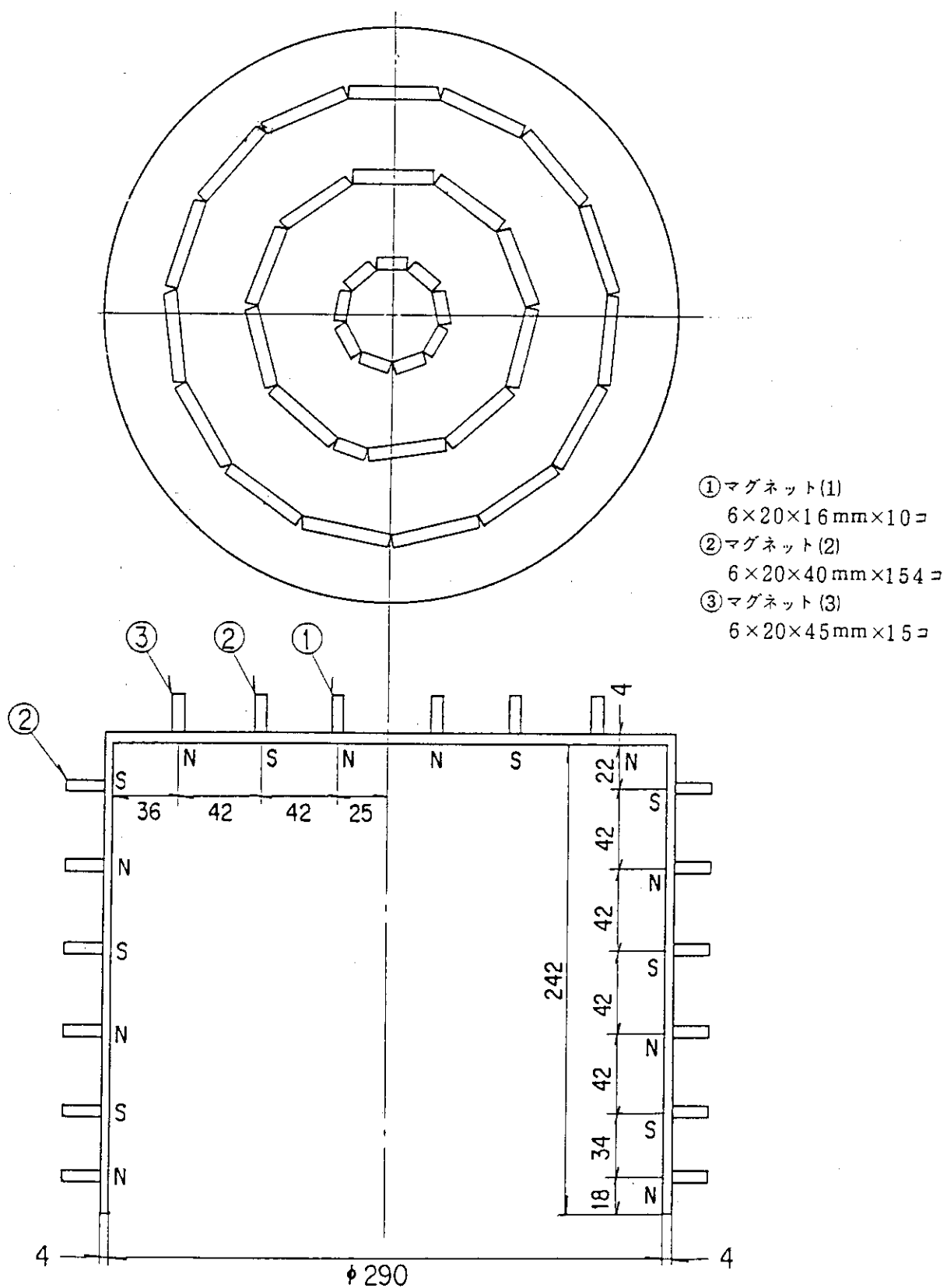


図4 マグネット配置図

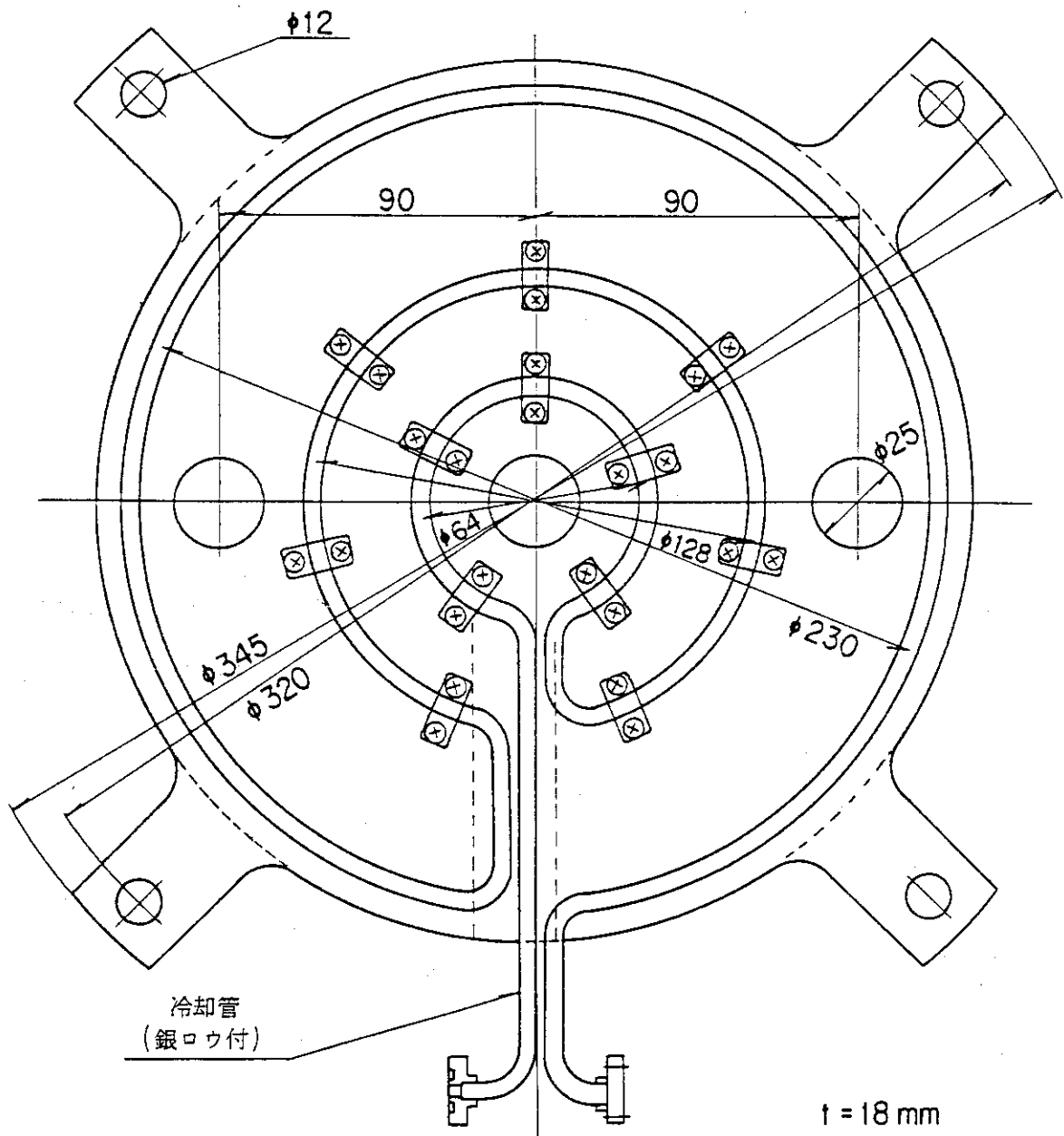


図5 上蓋用マグネットホルダ

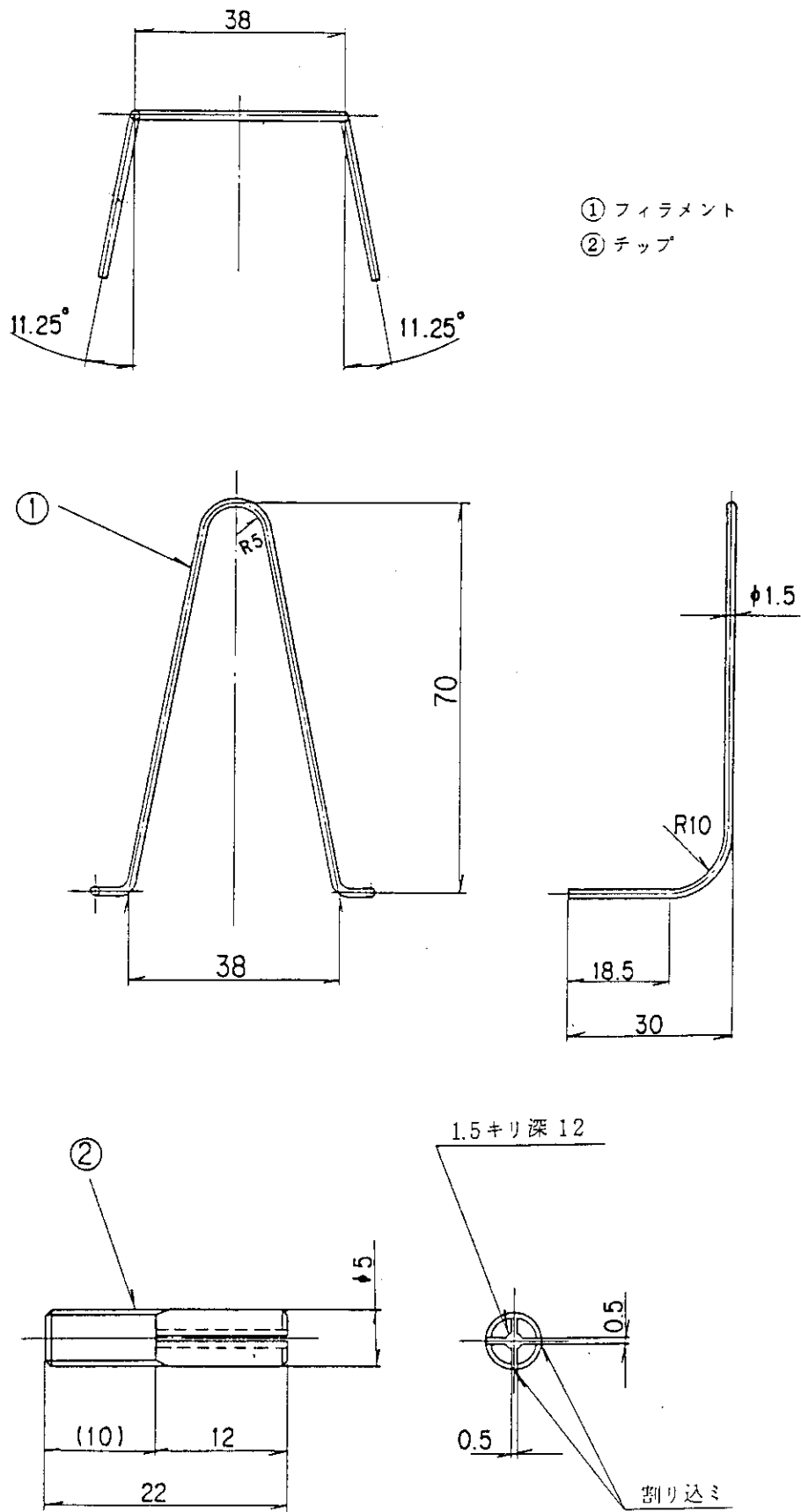
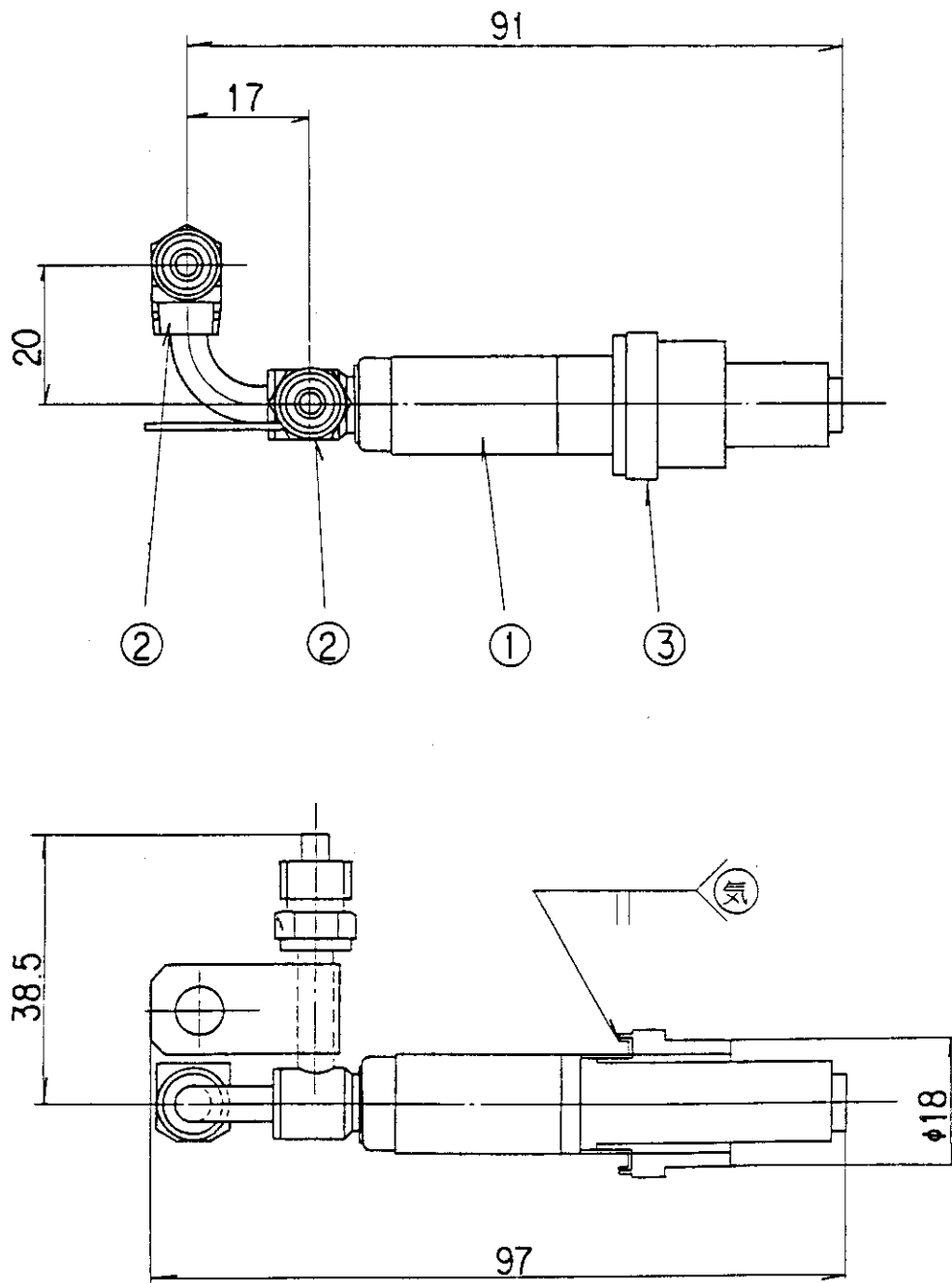


図6 フィラメント, チップ





- ① セラミック
- ② 冷却水コネクタ
- ③ 取付金具

図7 フィラメント電流導入端子

### 3. 特性及び性能

#### 3.1 イオン源の特性

安定したアーク放電を得るためのフィラメント(8本並列接続)の加熱電力は約 11.1 kW (フィラメント電圧  $V_f \sim 11.6$  V, フィラメント電流  $I_f \sim 960$  A, 5秒通電)で, 図8はフィラメント電流をパラメータにしたアーク放電特性を示し, イオン源への水素ガス流量 $\sim 6.5$  Torr $\cdot\ell$ /S, アーク限流抵抗 $\sim 0.08\Omega$ の条件でフィラメント電流が960 A以上のときに安定したアーク放電が得られている。

また, 図9はアーク放電電力とビーム引出し電流特性を示し, 加速電圧  $V_{acc} = 32$  kV においてビーム引出し電流  $I_{acc} = 32.5$  Aを得るためのアーク放電電力は約 36.1 kW (アーク放電電圧  $V_{arc} \sim 70.8$  V, アーク放電電流  $I_{arc} \sim 510$  A)で, このときのビーム引出し電流とアーク放電電力の比 ( $I_{acc}/P_{arc}$ ) は約 0.90 A/kWで, この値が大きい程イオンビームの引出し効率が高い。なお実際のオペレーションでは, イオン源へ供給する水素ガスの流量は約 12 $\sim$ 14 Torr $\cdot\ell$ /Sで, これはイオン源から流れ出るガス量だけで中性化セルの必要線密度を維持する構造になっているため高めの流量設定になっている。

図10の (a), (b) はフィラメントの電圧  $V_f$ , 電流  $I_f$  の波形を, (c) はアーク放電の電圧  $V_{arc}$  (アーク限流抵抗分を含む), 電流  $I_{arc}$  の波形を, (d) はビーム引出しのときの加速電圧  $V_{acc}$ , ビーム引出し電流  $I_{acc}$ , 減速電圧  $V_{dec}$ , 減速電流  $I_{dec}$  の波形を示している。

プロトン比の測定は, イオン源をNBI装置本体に組込んだ状態で分光法によるビーム組成の測定を行なった<sup>1)</sup>。分光法によるビーム組成は発光強度及び粒子のエネルギーとイオン源から観測点までの残留水素分子の線密度で決まる関数で求められ,

$$E/1 : E/2 : E/3 = \frac{I(E/1)}{\sigma_1} : \frac{I(E/2)}{\sigma_2} : \frac{I(E/3)}{\sigma_3}$$

$I(E/1), I(E/2), I(E/3) : E/1, E/2, E/3$  の発光強度

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 : E/1, E/2, E/3$  の補正係数

から, 本バケット型イオン源は

$$E/1 : E/2 : E/3 \sim 76.8\% : 11.3\% : 11.9\%$$

の結果が得られた。この値は質量分析法の測定において, E/1の成分が80%程度と推定することができ, 設計どおりの性能が得られたものと判断している。

図11に, 高速水素ビームの発光スペクトルを示す。

#### 3.2 入射ビーム特性

ここでは主に, JFT-2M 真空容器内に取付けてある中性粒子ビームパワー測定用カロリメ

ータを用いた測定の結果について述べる。

図12は本NBI装置ビームラインのビームダンプ等の位置及び形状を示し、カロリメータはイオン源の電極位置から3587mmの位置に取付けられていて、カロリメータへの中性粒子ビームの入射パワーはJFT-2Mトラスへの入射パワーにほぼ等しい。なお、今回製作した2台のイオン源はB系統のビームラインに組込み、B<sup>#1</sup>及びB<sup>#2</sup>と呼ぶことにした。

図13はカロリメータにおける中性粒子ビームパワーの測定例を示し、ビームパワーの密度分布を積分してカロリメータでの受熱パワーを求めている。また、ビームパワー密度分布の最大値の1/eになる点でのビームの拡がり(半値幅)とイオン源からカロリメータまでの距離の $\tan^{-1}$ を入射ビームの発散角 $\omega_{1/e}$ と定義して求めている。

$$\omega_{1/e} = \tan^{-1} \frac{\ell}{L}$$

L: イオン源からカロリメータまでの距離

$\ell$ : 半値幅

図14~15はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>の加速電圧をパラメータにしたビーム引出し電流と受熱パワー特性を示し、加速電圧 $V_{acc} = 32$  kV, ビーム引出し電流 $I_{acc} = 32.5$  Aのときに、最大受熱パワー450 kWを得ている。また、このときの受熱効率( $P_{net}/V_{acc} \cdot I_{acc}$ )は約43%になっている。

図16はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>の結果を足し合わせたもので、B系統ビームラインの入射ビーム特性を示している。

図17~18はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>のビーム引出し電流をパラメータにした加速電圧と受熱パワー特性を示し、ビーム引出し電流を一定にしたときの最大受熱パワーのポイントが加速電圧を変えることによって移動している。

次に入射ビームの発散について述べる。

イオン源既設加速部のビーム引出し領域が185 mm $\phi$ , 孔径4 mm, 孔数1050個でビーム透過度が約50%になっている。また、ビームの焦点距離は加速電極と減速電極間を約6.3 mm, 減速電極と接地電極間を約2.8 mmに調整して2800 mm前後に合わせてある。

図19~20はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>の入射ビームの発散角 $\omega_{1/e}$ を示し、B<sup>#1</sup>ではパービアンズ( $I_{acc}/V_{acc}^{3/2}$ )が $\sim 6.0 \times 10^{-6}$ のときに、B<sup>#2</sup>ではパービアンズが $\sim 5.65 \times 10^{-6}$ のときに最小の発散角 $\omega_{1/e} \sim 1.15$  degを得ている。

図21~22はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>の加速電圧をパラメータにしたビーム引出し電流と入射ビームの発散角特性を示し、加速電圧を一定にしたときの最小発散角のポイントがビーム引出し電流を変えることによって移動している。

図23~24はイオン源B<sup>#1</sup>とB<sup>#2</sup>の入射ビームの発散が最も良い状態での加速電圧とビーム引出し電流特性を示し、イオン源のコンディショニングの目安及びカロリメータの受熱効率(中性粒子ビームの入射効率)が最も良い特性を示している。

以上の結果から、バケット型イオン源と既設デュオピガトロン型イオン源とを比較すると、カロリメータでの受熱パワーは約200 kW増加し、入射ビームの発散角は加速電極面に均一なソ

ースプラズマが生成できるようになったために約10%程度の改善が見られ、プロトン比は55%から80%に向上した。

また、バケット型イオン源は、イオン源内部でのブレイクダウンも少なく、定格のビーム引出し電流が容易に引出すことができる、オペレーションのしやすいイオン源になっている。

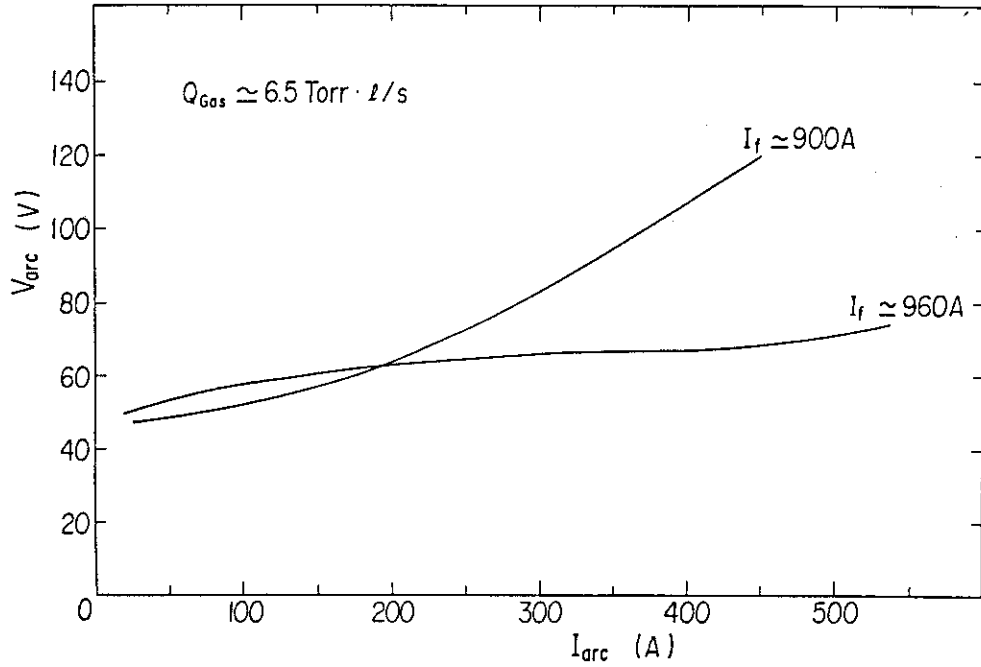


図8 アーク放電特性

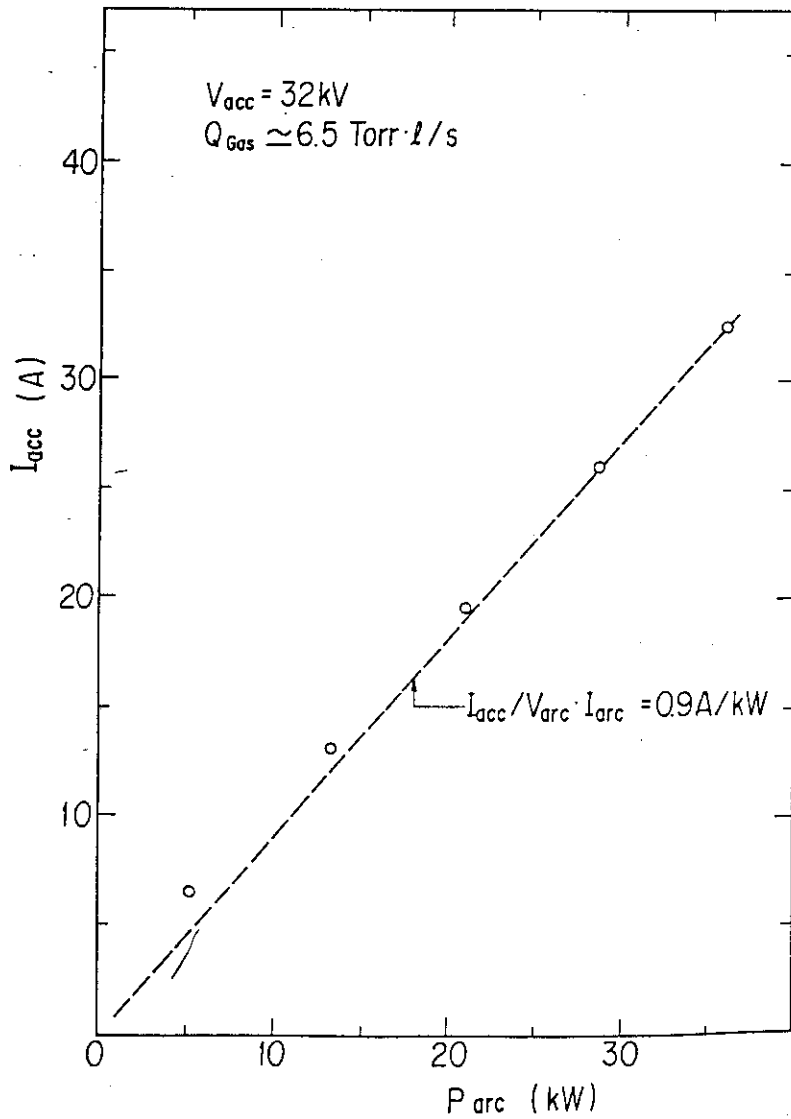


図9 アーク放電電力ービーム引出し電流特性

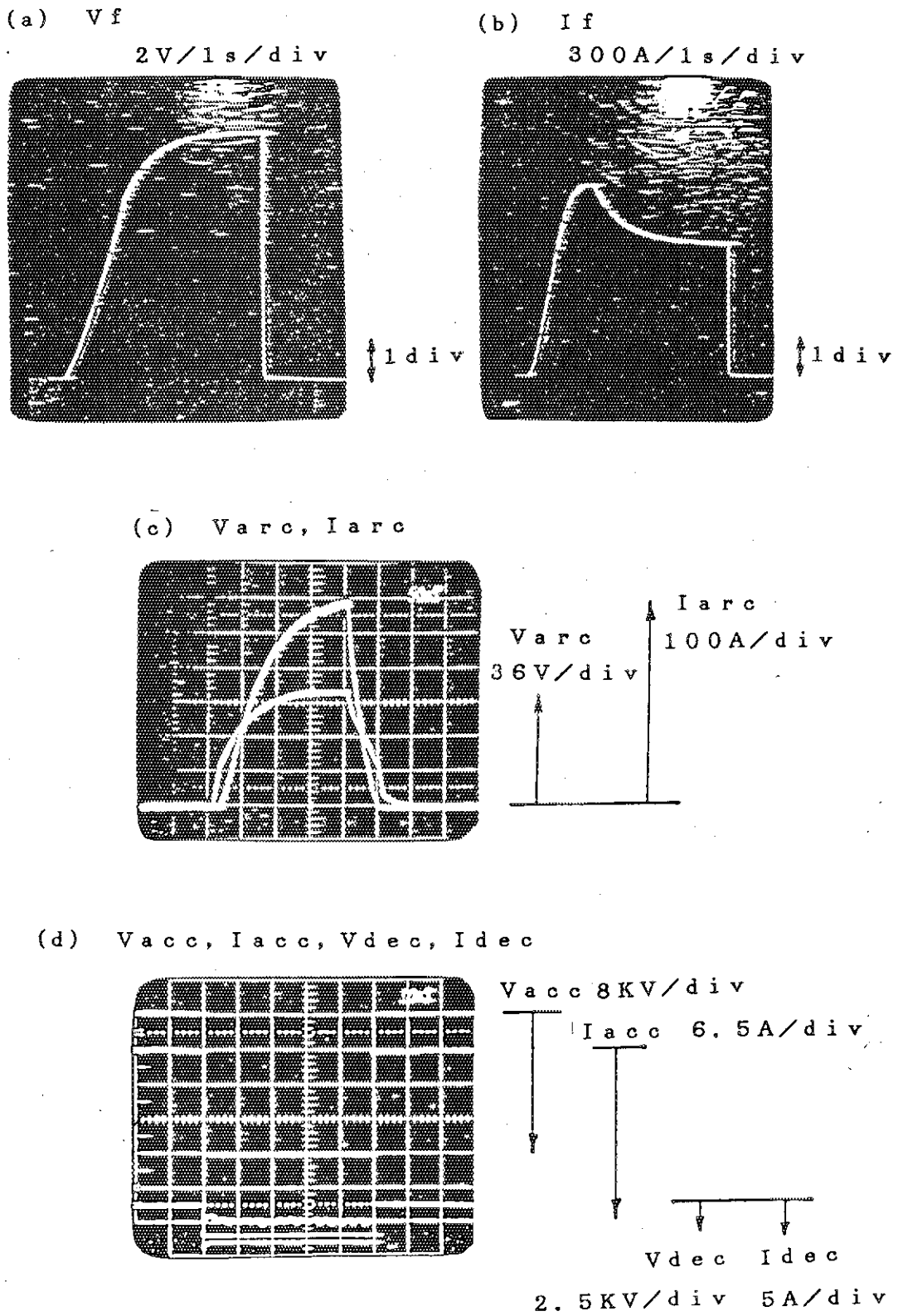


図10 フィラメント、アーク電圧・電流波形

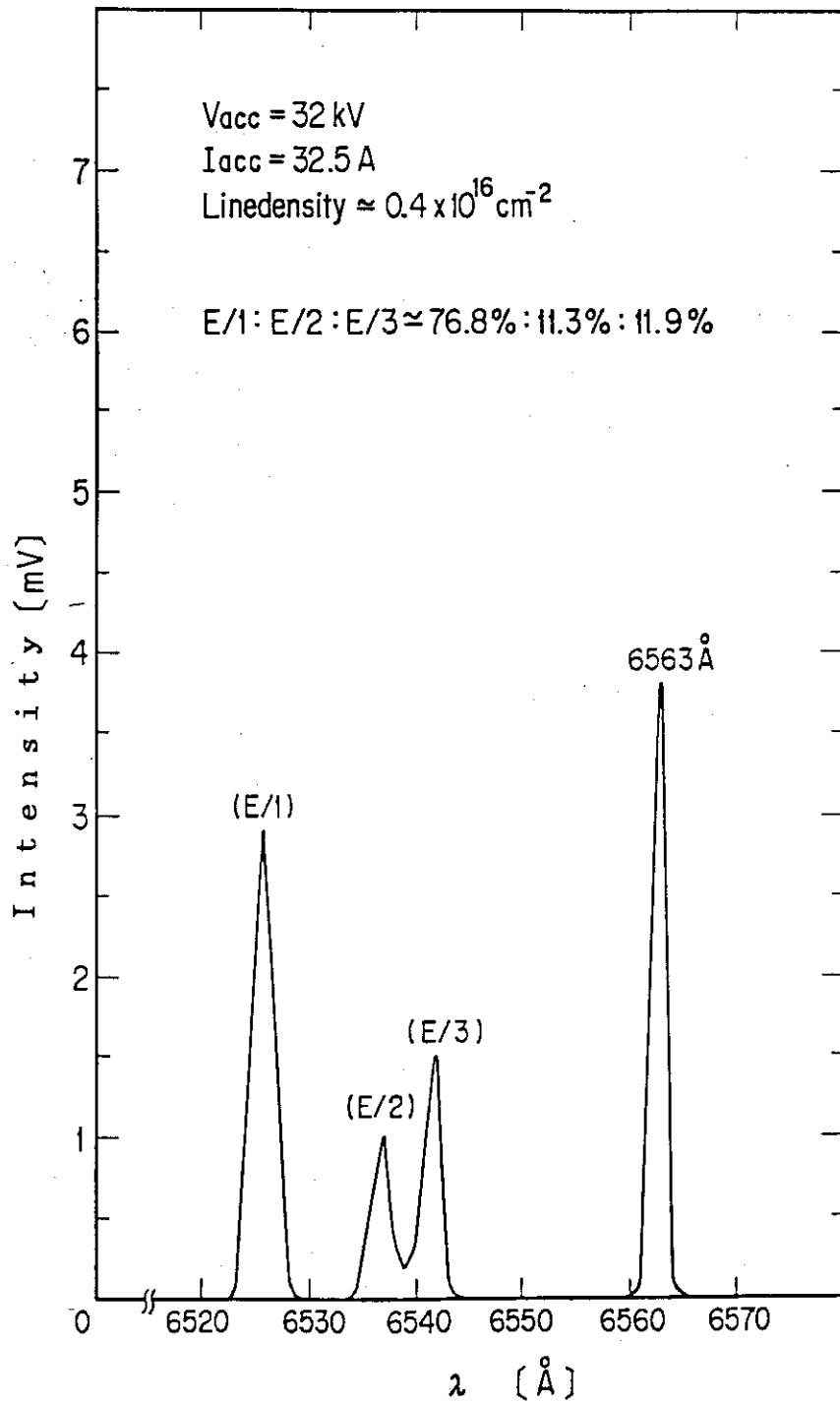


図 11 高速水素ビームの発光スペクトル

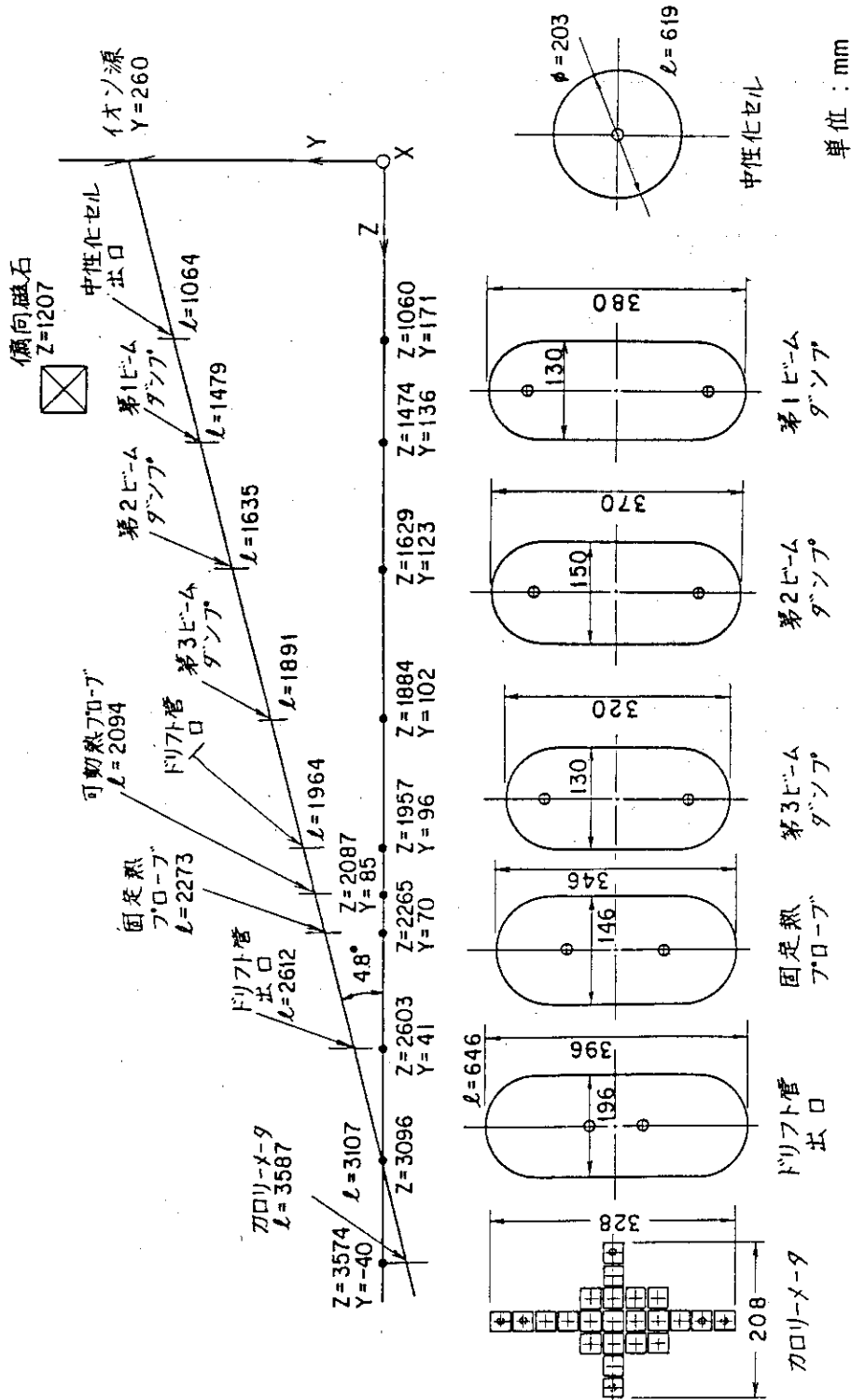


図 12 ビームダンプ等の位置及び形状



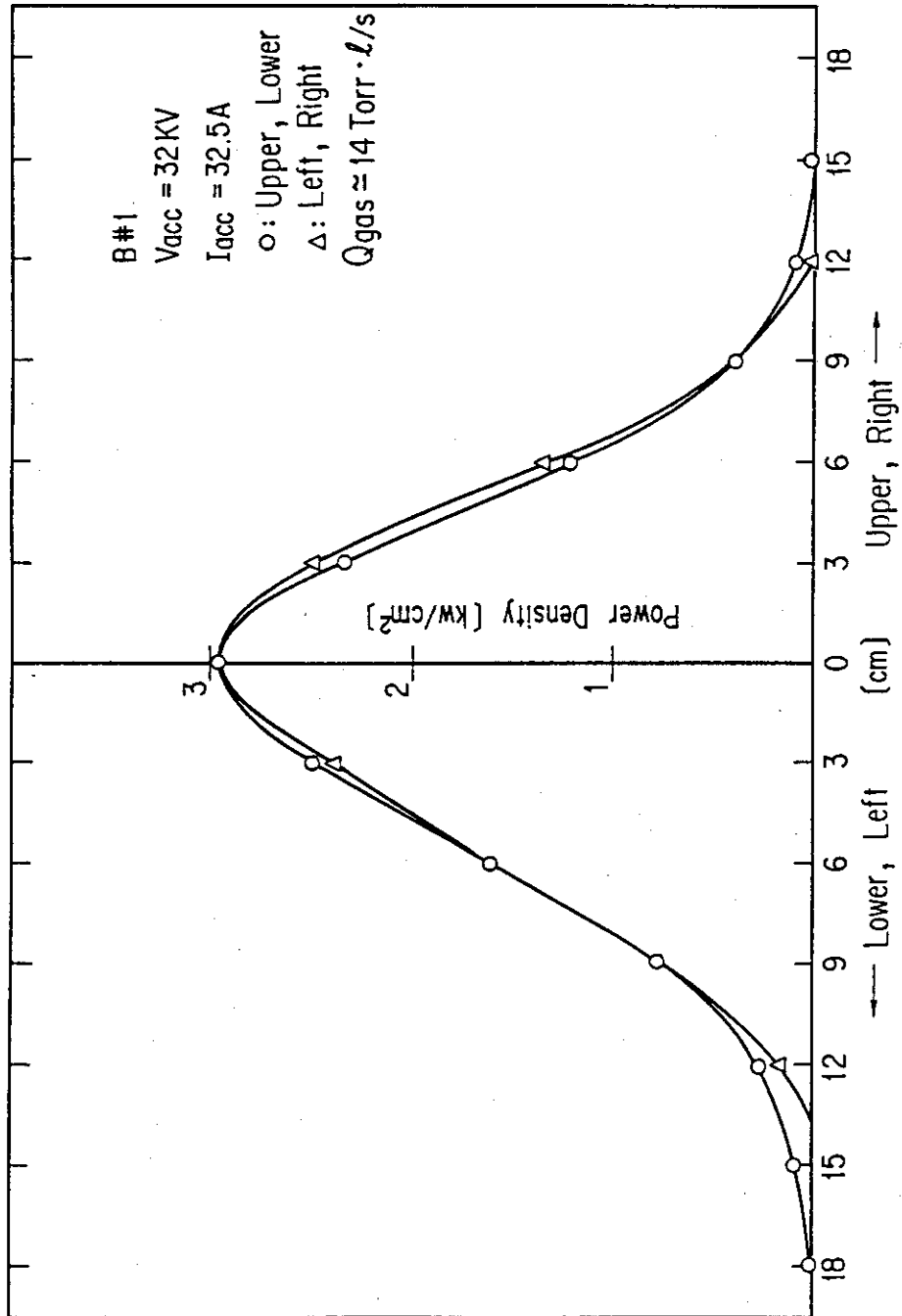


図 13 中性粒子ビームパワー密度分布

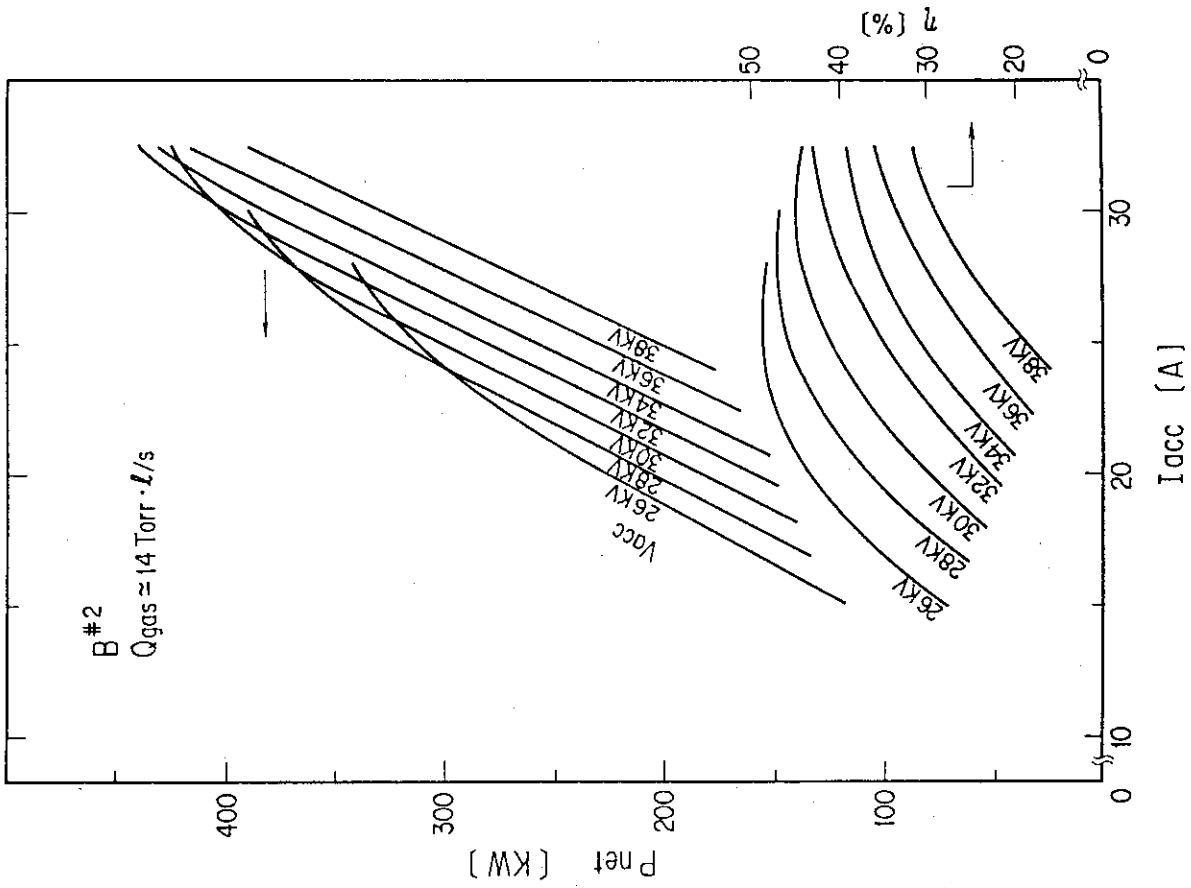


図 15 ビーム引出し電流-受熱パワー特性

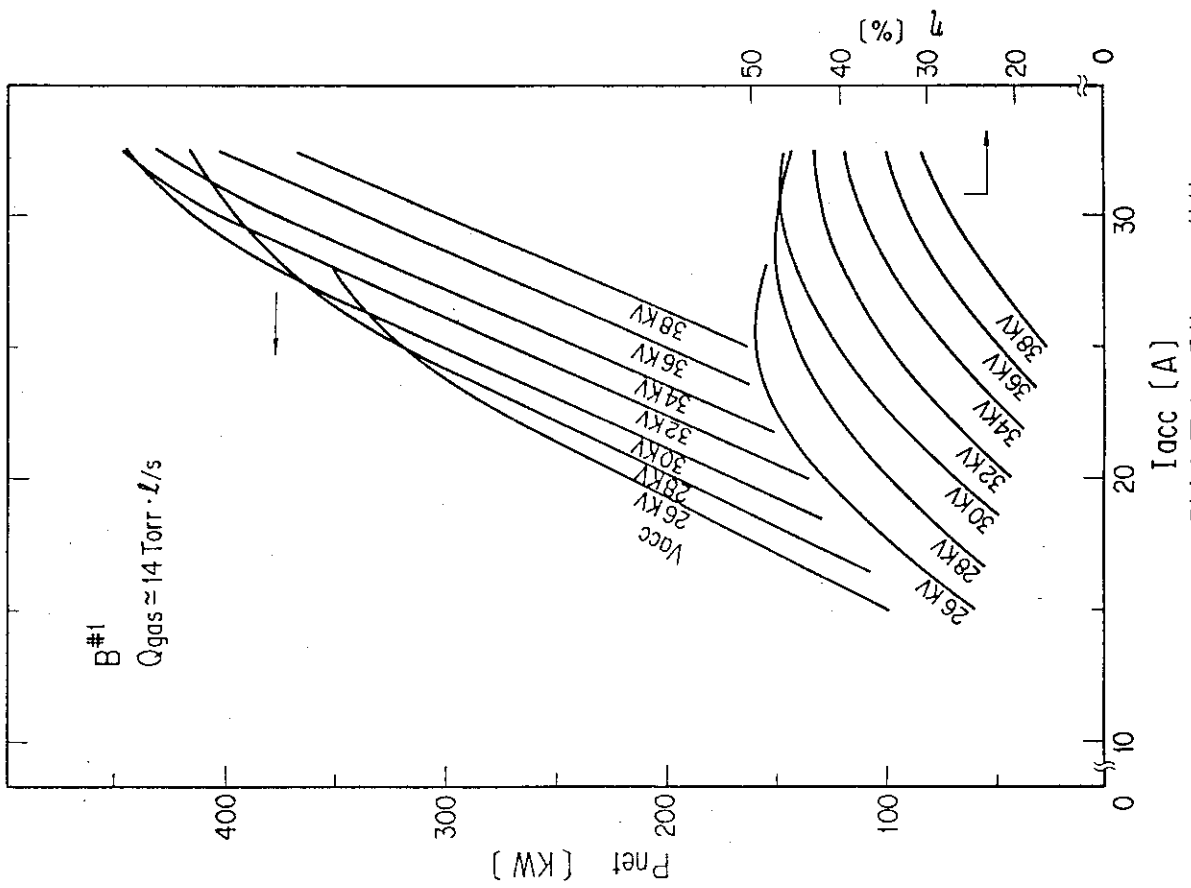


図 14 ビーム引出し電流-受熱パワー特性

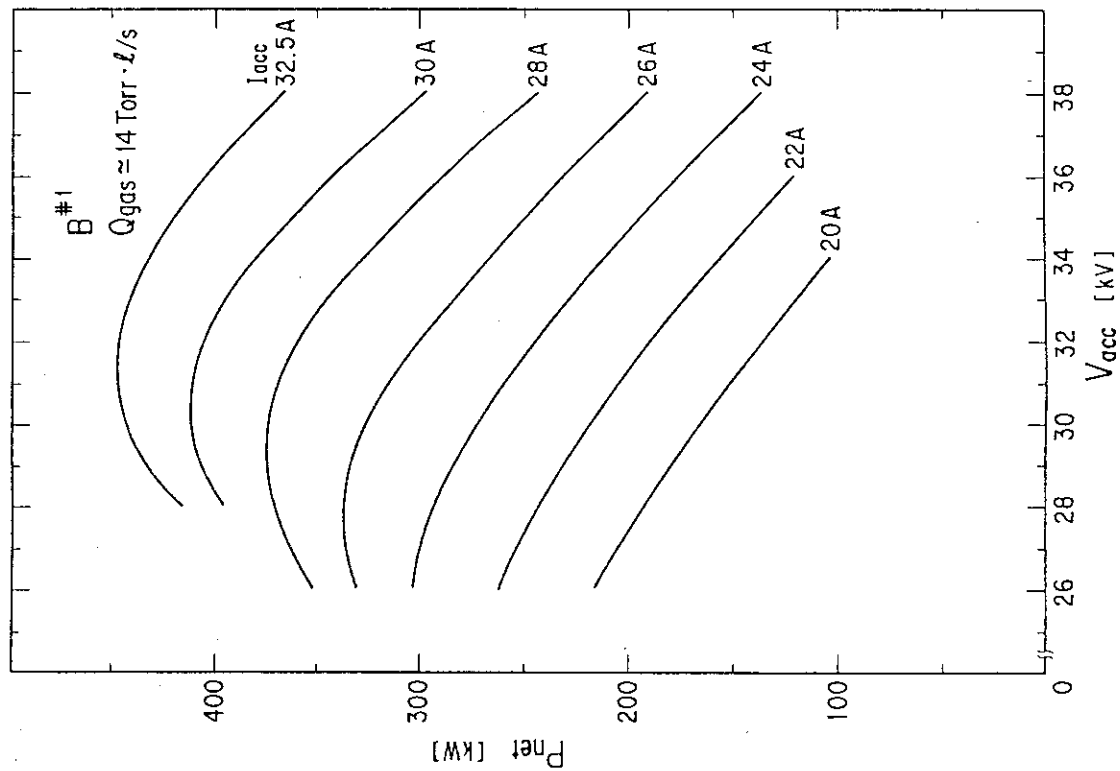


図 17 加速電圧—受熱パワー特性

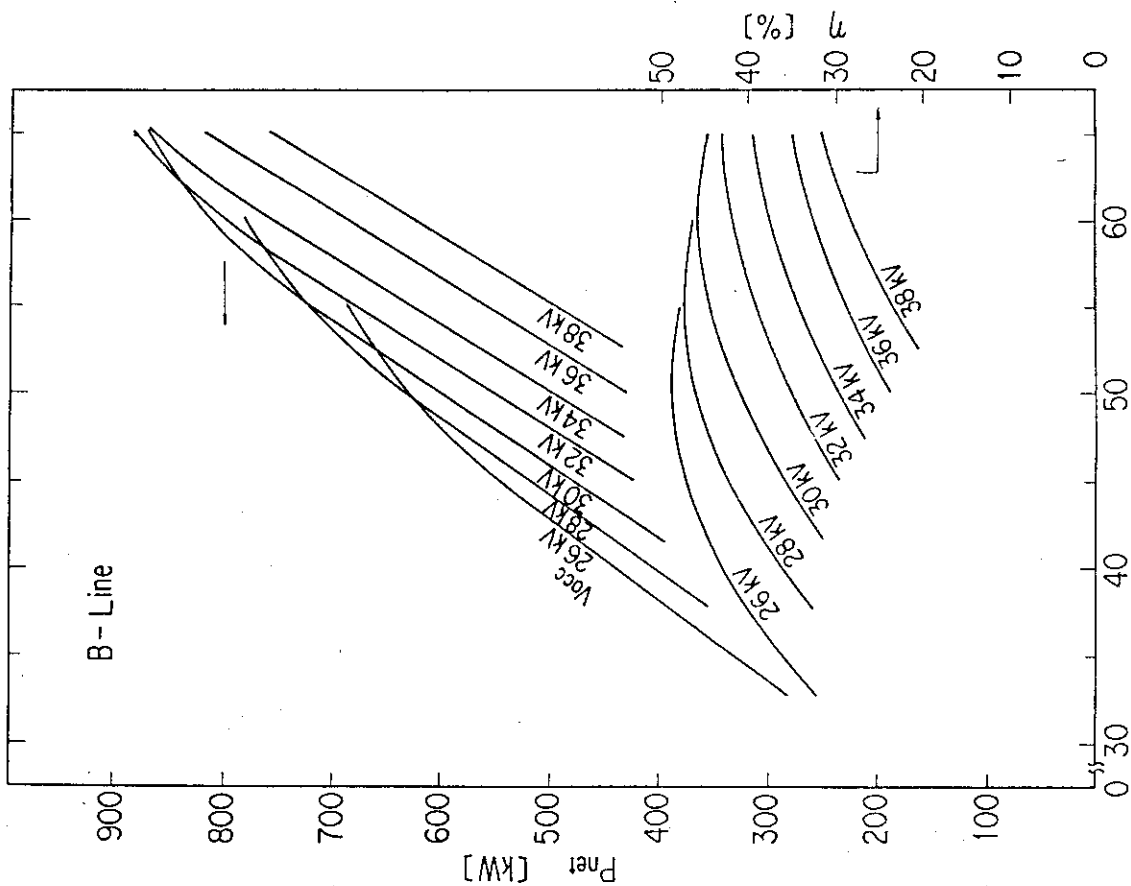


図 16 ビーム引出し電流—受熱パワー特性

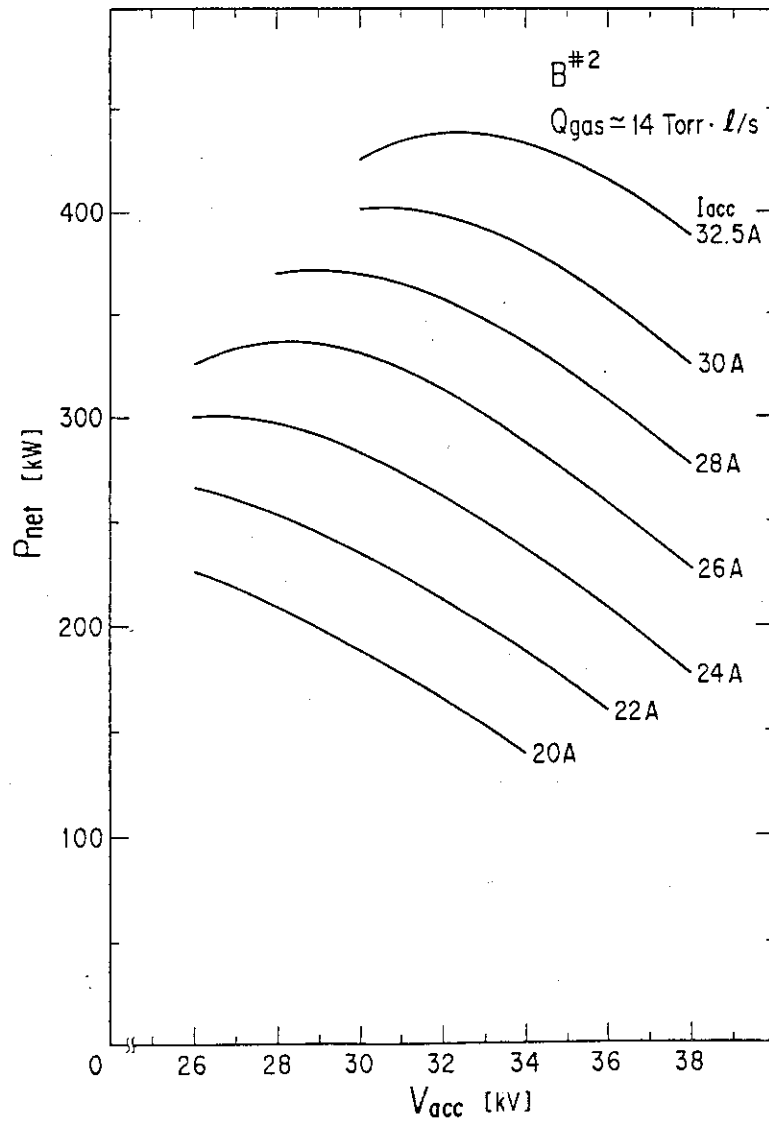


図 18 加速電圧—受熱パワー特性

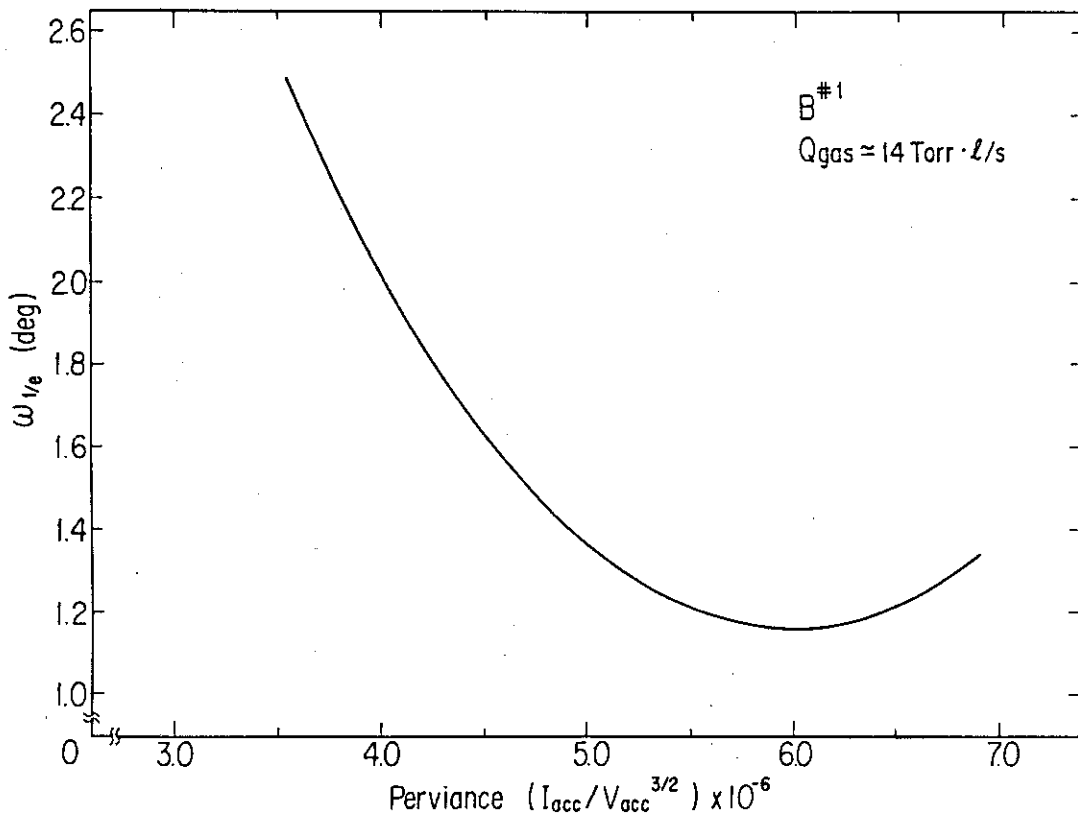


図 19 パービアンズ—発散角特性

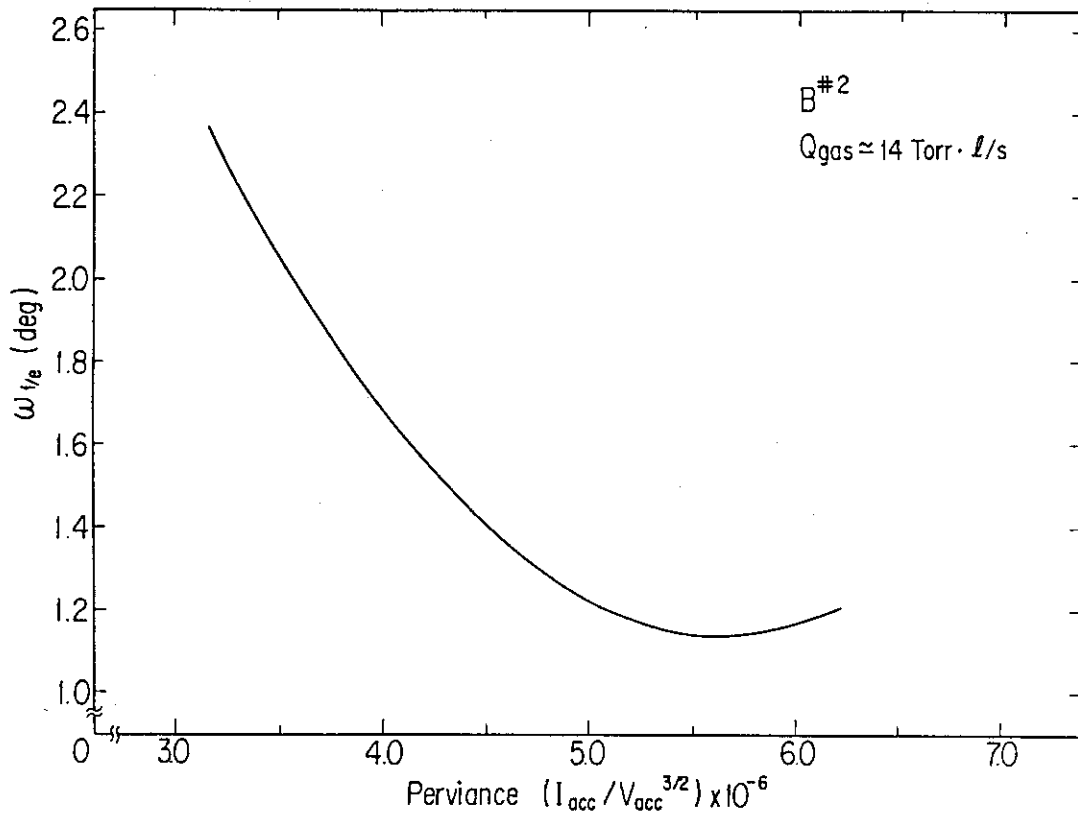


図 20 パービアンズ—発散角特性

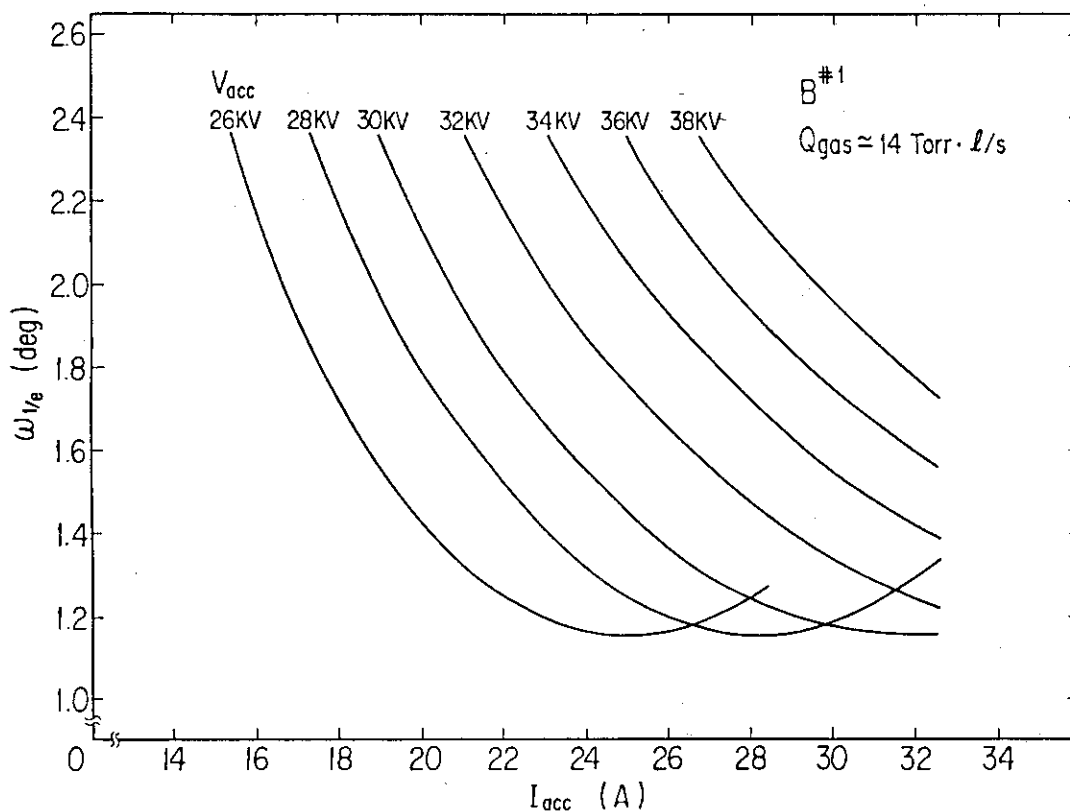


図 21 ビーム引出し電流—発散角特性

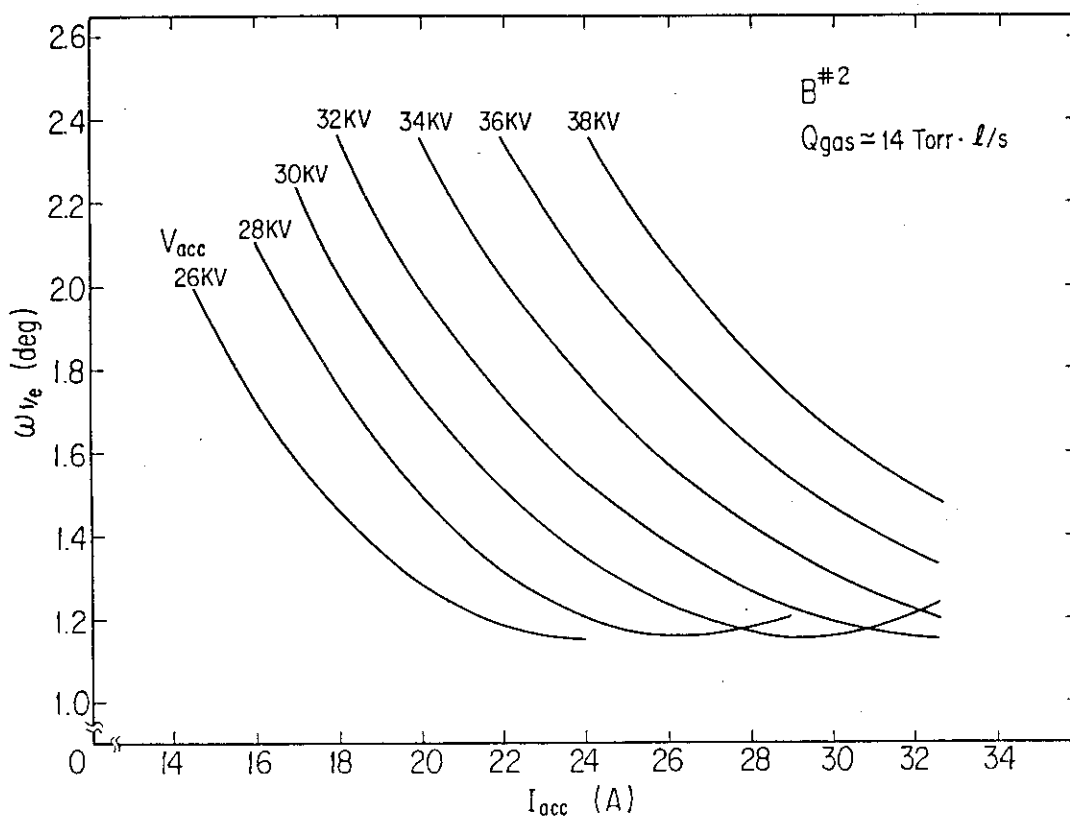


図 22 ビーム引出し電流—発散角特性

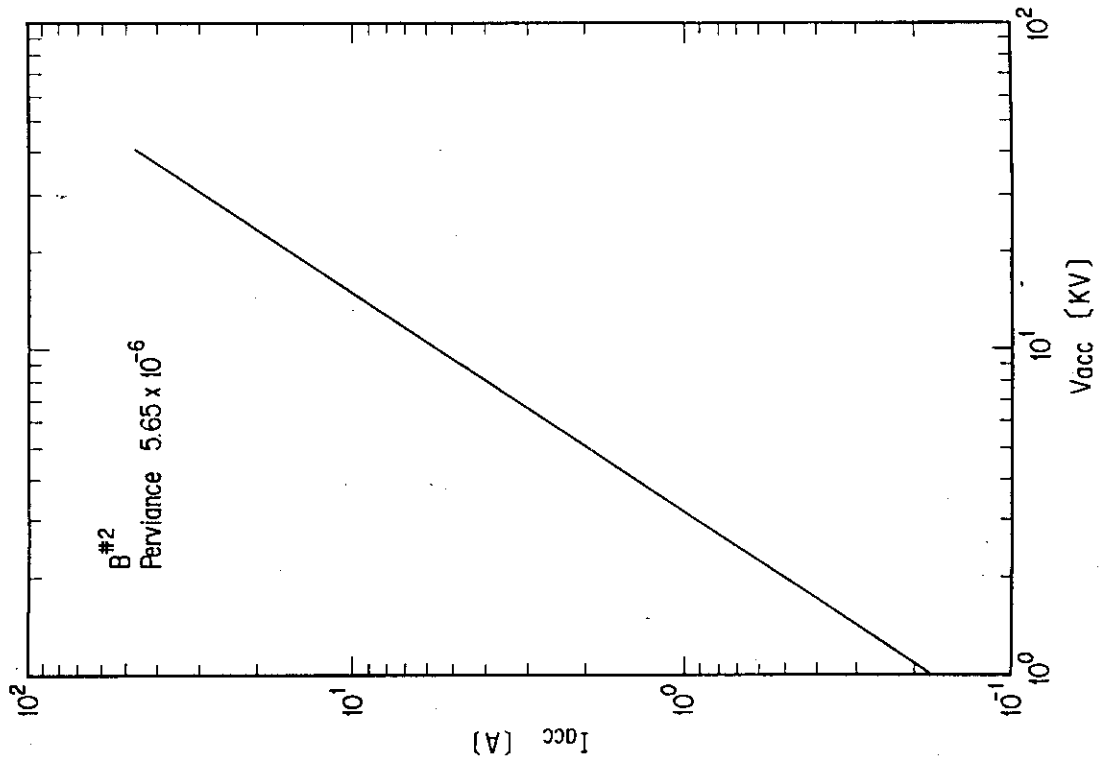


図 24 加速電圧—ビーム引出し電流特性

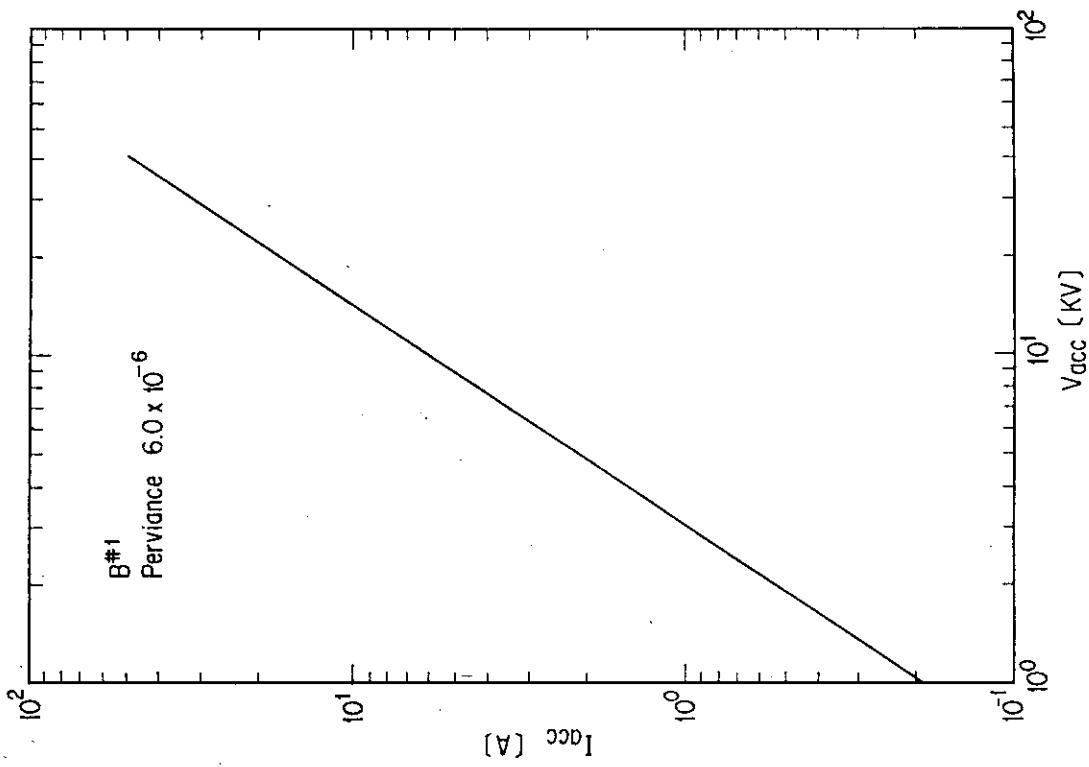


図 23 加速電圧—ビーム引出し電流特性

## 4. お わ り に

本バケット型イオン源は、当初の設計どおりの性能を得ることが出来た。これは、設計、打合せ等に貴重な時間をさいて適切な御指導をいただいた、加熱工学第1研究室室長、松田慎三郎氏、同研究室堀池寛氏、奥村義和氏、炉設計研究室、山本新氏、プラズマ実験研究室、仙石盛夫氏にお礼を申し述べたい。また、本件の製作に関して御支援をいただいた、装置・技術管理室室長、鈴木喜八郎氏に感謝いたします。

最後に、イオン源ビームのプロトン比が向上したことによるプラズマへ与える影響については、今後のプラズマ実験研究室の実験とその解析を待つことにしたい。

## 参 考 文 献

- 1) 奥村義和, 小原祥裕, 柴田猛順; JAERI-M 9653 (1981).



## 4. おわりに

本バケット型イオン源は、当初の設計どおりの性能を得ることが出来た。これは、設計、打合せ等に貴重な時間をさいて適切な御指導をいただいた、加熱工学第1研究室室長、松田慎三郎氏、同研究室堀池寛氏、奥村義和氏、炉設計研究室、山本新氏、プラズマ実験研究室、仙石盛夫氏にお礼を申し述べたい。また、本件の製作に関して御支援をいただいた、装置・技術管理室室長、鈴木喜八郎氏に感謝いたします。

最後に、イオン源ビームのプロトン比が向上したことによるプラズマへ与える影響については、今後のプラズマ実験研究室の実験とその解析を待つことにしたい。

## 参 考 文 献

- 1) 奥村義和, 小原祥裕, 柴田猛順; JAERI-M 9653 (1981)。