

JAERI - M  
90-212

半円筒型プラズマ源における高プロトン比ビームの生成

1990年12月

渡辺 和弘・荒木 政則・大楽 正幸・堀池 寛  
小原 祥裕・奥村 義和・田中 茂・横山 堅二  
Jerome PAMELA\*

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）で複写による実費領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, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 (株)原子力資料サービス

半円筒型プラズマ源における高プロトン比ビームの生成

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

渡辺 和弘・荒木 政則・大楽 正幸

堀池 寛<sup>+</sup>・小原 祥裕・奥村 義和

田中 茂・横山 堅二・Jerome PAMELA\*

(1990年11月2日受理)

荷電粒子回収に関する日仏共同実験に使用するための、内径34 cm、長さ129 cmの半円筒型多極磁場型プラズマ源を開発した。プロトン比を高め、且つ一様性の良いプラズマを得るために三次元の磁場および電子軌道計算コードを用いて設計を行った。ビーム引出し面でのプラズマの一様性を調べるためにリングミュアプローブを用いてイオン飽和電流密度を測定した。アーク電流900 Aにおいて、プローブで測定した8 cm×100 cmの領域でイオン飽和電流密度±5%の様なプラズマが得られた。中央部7 cm×27 cmの領域からビームを引き出し、ドップラーシフト分光法によりイオン組成比を測定した。プロトン比は、(1)アーク放電電流を高めるほど、(2)電子の閉じ込めの良い磁場配位ほど、また、(3)電子がビーム引き出し部から遠い軌道をとる磁場配位ほど高められ、前述の一様性のもとで引き出し電流密度150 mA/cm<sup>2</sup>において93%に達した。さらに、一様性を無視して電子を強く局在化させた磁場配位では、最高で95%のプロトン比が得られた。

---

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ JT-60 試験部

\* カダラッシュ原子力研究センター，フランス

Production of a High Proton Yield Beam  
in a Semi-Cylindrical Plasma Generator

Kazuhiro WATANABE, Masanori ARAKI, Masayuki DAIRAKU  
Hiroshi HORIIKE<sup>+</sup>, Yoshihiro OHARA, Yoshikazu OKUMURA  
Shigeru TANAKA, Kenji YOKOYAMA and Jerome PAMÉLA<sup>\*</sup>

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

(Received November 2, 1990)

A semi-cylindrical plasma generator whose dimensions are 34 cm in inner diameter and 129 cm in length has been developed for use in JAPAN-FRANCE collaborative experiment on the energy recovery. The 3D computer code for the magnetic field distribution and the electron orbits was utilized to obtain a high proton ratio and a good uniformity of plasma. Plasma spatial uniformities were measured with Langmuir probes. The plasma uniformity of +/- 5% was obtained in the measured region of 8 cm x 100 cm at the arc current of 900 A. Hydrogen beams were extracted from a central area of 7 cm x 27 cm and ion species were measured by the Doppler shifted spectroscopy. The results show that the proton ratio became higher 1) at higher arc current, 2) at the magnetic field distributions which confine the electrons strongly and 3) at the magnetic field distribution in which the electrons orbits are far from the beam extraction region. The proton ratio of 93% was obtained in the case where the plasma uniformity was as good as +/- 5% in the area of 8 cm x 100 cm. The highest proton ratio of 95% was obtained with a strongly linked magnetic field distribution.

---

+ Department of JT-60

\* CEN-Cadarache, FRANCE

Keywords: High Proton Yield, Ion Beam, Plasma Generator, Energy Recovery, Plasma Uniformity, Proton Ratio, Ion Species, Magnetic Field Distribution, Electron Orbits

## 目 次

1. はじめに	1
2. プラズマ源の構造	2
3. 三次元軌道計算コードによる磁場解析と電子軌道計算	3
3.1 基本磁場配位 I	3
3.2 チェンバー頂上部に磁石を1列追加した磁場配位	3
3.3 強い結合磁場の配位	4
3.4 基本磁場配位 I でフィラメント形状 II の場合	4
3.5 開口部磁場強度を下げた場合	4
3.6 開口部磁場強度を下げフィラメント形状 II の場合	5
3.7 基本磁場配位 II でフィラメント形状 II の場合	5
3.8 頂上部に磁石を3列追加した場合	5
3.9 開口部磁場強度を下げた場合の結合磁場配位	5
4. 実験結果	6
4.1 基本磁場配位 I	6
4.2 垂直磁場増強の磁場配位	7
4.3 強い結合磁場の配位	7
4.4 開口部磁場強度を下げた磁場配位	8
4.5 フィラメント形状 II の効果	8
4.6 基本磁場配位 II とフィラメント形状 II の効果	8
4.7 開口部磁場強度を下げた場合の結合磁場配位	9
5. 検 討	9
5.1 プラズマの一様性と磁場配位, フィラメント形状	9
5.2 プロトン比と磁場配位, 電子軌道	10
6. おわりに	11
謝 辞	12
参考文献	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Structure of the plasma generator .....	2
3. Magnetic field distribution and electron orbits simulation with the 3D code .....	3
3.1 Basic magnetic field distribution I .....	3
3.2 Case where one row of magnet was mounted on the top of the plasma generator .....	3
3.3 Case of the strongly linked magnetic field distribution ....	4
3.4 Case of magnetic field distribution I with filament type II .....	4
3.5 Case of reducing magnetic field strength at the opening of the plasma chamber .....	4
3.6 Case of reducing magnetic field strength at the opening of the plasma chamber and using filament type II .....	5
3.7 Case of basic magnetic field distribution II with filament type II .....	5
3.8 Case where three rows of magnets were mounted on the top of the plasma chamber .....	5
3.9 Case of the strongly linked magnetic field distribution and reducing magnetic field strength at the opening of the plasma chamber .....	5
4. Experimental results .....	6
4.1 Case of basic magnetic field distribution I .....	6
4.2 Effects of reinforcement of vertical magnetic field .....	7
4.3 Case of the strongly linked magnetic field distribution ....	7
4.4 Case of reducing magnetic field strength at the opening of the chamber .....	8
4.5 Effects of filament type II .....	8
4.6 Effects of basic magnetic field distribution II and filament type II .....	8
4.7 The strongly linked magnetic field distribution in case of weakened magnetic field strength at opening of the chamber .....	9
5. Discussion .....	9

5.1	Relations among the plasma uniformity, magnetic field distributions and filament configurations .....	9
5.2	Relations among proton ratio, magnetic field distribution and electron orbits .....	10
6.	Summary .....	11
	Acknowledgment .....	12
	References .....	13



## 1. はじめに

現在各国の大型トカマクにおいては、プラズマの加熱手段の一つとして中性水素（或いは重水素）粒子ビームによる加熱実験が行われている。大型のトカマク装置においては、プラズマ中心部を効率良く加熱するために、エネルギーの高い中性粒子ビームが必要である。水素の中性粒子ビームを得る場合に問題となるのは、ビームエネルギーが単一でないことである。つまり、水素イオンには原子イオンの他に分子イオン  $H_2^+$ 、 $H_3^+$  が存在し、これらの分子イオンビームは中性化される際に解離しそれぞれ2分の1、3分の1のエネルギーを有した粒子ビームとなる。従って、イオンビーム中での分子イオンの含有率が高ければ高エネルギーにイオンビームを加速しても実際に入射できる中性粒子の平均的なエネルギーは低くなり、プラズマ中心部を十分に加熱することができない。そこで、いかにして原子イオンの比率、つまりプロトン比を上げるかが正イオン源開発の最も重要な課題の一つである。

一方、中性粒子入射装置 (NBI) の電力効率をあげるための技術として荷電粒子回収システム<sup>1)</sup>がある。これは、従来熱として捨てていた中性化後の残留イオンビームのエネルギーを、電力として回収するシステムである。これが実現できればシステムの電力効率をあげる事が可能である。トカマクプラズマの中心部加熱にはプロトン比の高いイオンビームが必要であることを前述したが、正イオンを用いた荷電粒子回収システムにおいても、回収効率を上げるためにプロトン比の高いビームを用いることが必要である<sup>1) 2)</sup>。

現在荷電粒子回収システムを有する中性粒子入射装置は、フランスのカダラッシュ原子力研究センターの Tore Supra 用 NBI<sup>3)</sup> が唯一のものであり、荷電粒子回収の可能性や効率を研究する目的で、カダラッシュ研のテストスタンドにおいて日仏共同実験が行われた<sup>2)</sup>。この実験には90%以上の高プロトン比を有するプラズマ源が必要であり、原研がこれを開発した<sup>4)</sup>。このプラズマ源はカダラッシュ研のビーム加速部領域約6 cm × 115 cm に適応する大型のプラズマ源である。

中性粒子入射装置イオン源のプロトン比を高めるための研究が各国でなされてきたが、JET, TFTR, におけるイオン源ではそれぞれ87%, 78%のプロトン比となっている<sup>5) 6)</sup>。これに対して原研では、プロトン比はプラズマの体積とイオンの実効的損失面積の比で決まることを提唱し<sup>7)</sup>、この理論に基づいて開発された JT-60 NBI イオン源においては、最高で92%の高いプロトン比が得られている<sup>8)</sup>。今回のプラズマ源の開発においても高プロトン比を得るために、これらの経験に基づいて設計がなされた。プラズマ源において、高プロトン比ビームの生成と同様に重要な項目の一つが、電流密度の様なビームを得るために引き出し部領域に一様性の良いプラズマを作ることである。プロトン比及びプラズマの一様性はプラズマ源を構成するカスプ磁場の形状やフィラメント形状によっても大きく影響され、これらはプラズマ源にとって最も重要な要素である。

この報告では、日仏共同実験用に開発した半円筒型プラズマ源の諸特性について磁場解析、電子軌道解析<sup>8)</sup>と実験結果を対比させながら述べる。

## 2. プラズマ源の構造

第1図に本プラズマ源の構成図を示す<sup>4)</sup>。15極のSmCo マグネットより構成された半円筒型多極磁場型プラズマ源である。無酸素銅製のアークチェンバーアノードは内径が34 cmで長さが129 cmの半円筒型であり、水冷構造となっている。アークチェンバー内部には逆流電子ビームダンプを有している。カスプ磁場用磁石は、プラズマ源の両端面にも配置されており、それらで作る磁場も円筒側面の磁石で作る磁場に結合されている。プラズマ源へのガス導入はプラズマ源の上方、つまり逆流電子ビームダンプ側の2箇所から行われる。アーク放電は、16本のタングステンフィラメントからの放出電子によって生成される。水素原子イオンの組成比つまりプロトン比は、プラズマの体積とイオンの損失面積の関数であり、高プロトン比を得るには大容積で、実効的なイオン損失面積の小さい放電室が必要である<sup>7)</sup>。この要求を満足するのが引き出し開口部を狭くした半円筒型形状である。

本プラズマ源は、仏国CENカダラッシュ研究センターで行われる荷電粒子回収の日仏共同研究に使用するものであり、エネルギー回収システムを有したカダラッシュ研の中性粒子入射装置テストスタンドに取り付けられる。カダラッシュ研究センターのイオン源加速電極のビーム引き出し面積は約6 cm × 115 cmであり、この大面積に様なプラズマを作ること、プロトン比は水素イオン電流密度212 mA/cm<sup>2</sup>以下で90%以上であること、動作ガス圧力が1 Pa (8 m Torr)以下でできるだけ低いことなどが条件であり、本プラズマ源の開発目標である。

JT-60 NBI イオン源のビーム引き出し面積が12 cm × 27 cmであるのに対して、このプラズマ源では引き出し面の幅はその2分の1の6 cmと狭くなっているものの長手方向の長さが4倍以上もある。本プラズマ源の設計は、これに先立って開発された12 cm × 90 cmの引き出し面積を有する短パルス運転用の半円筒型SUS製プラズマ源<sup>10)</sup>で得られた知見を基に行われた。1 m以上もの長い領域にわたって均一なプラズマを作るために、ビーム引き出し軸に直角でプラズマ源の長手方向に平行なカスプ磁場配位とした。これは陰極から放出された一次電子はカスプ磁場のライン方向に運動しやすく、長手方向に一様性の良いプラズマを得やすいからである。さらに、引き出し軸に対して直角なカスプラインの方が平行な配位よりもプラズマの閉じ込めがよいので高いプロトン比が得られるなどの理由による。

半円筒型プラズマ源の開口部の幅を狭くするほどプラズマの閉じ込めは良くなるのでプロトン比も高くなるが加速電極多孔部の幅6 cmにわたって様な密度のプラズマを生成させるために、開口部の幅には余裕をもたせ20 cmとした。三次元磁場計算コードを用い、引き出し面での磁場強度が20 Gauss以下になるよう、各々の磁石の位置を決めた。20 Gauss以下という条件は、プラズマ密度がこの磁場強度以下であるとほぼ一樣になることから決められた<sup>7)</sup>。カスプ磁場形成用の永久磁石はSmCoを用いた。断面寸法は、幅10 mmで、高さ20 mmである。開口部の磁場分布はプラズマの一様性に大きな影響を及ぼし特に重要なので、引き出し面から第一段目と第二段目の磁石に関しては、容易に寸法を変えられるようにした。また、ビーム引き出しにおいては開口部後方のアノード面が逆流電子に晒されるので、保護用の電子ビームダンプを設けた。

電子ビームダンプ裏面にもカスプ磁場形成用の磁石3列を配置した。陰極には直径1.8 mm  $\phi$  のタングステンフィラメント16本を用いる。プロトン比はビーム引き出し部における一次電子の密度によっても変化する<sup>11)</sup>。つまり、引き出し面に多量の一次電子を供給するようなフィラメント形状を用いるとプロトン比は低下するので、一次電子の軌道計算から、電子が引き出し面ですできるだけ流れ込まないような形状とした。フィラメントをチェンバー内面に沿わせる形状Iと、より内側に傾倒させた形状II（第2.1図、第2.2図参照）の2種類を用いた。

### 3. 三次元軌道計算コードによる磁場解析と電子軌道計算<sup>9)</sup>

多極磁場型プラズマ源においては磁場形状は最も重要な要素である。プラズマ源の適切な磁場配位によって陰極から放出された電子を効率よく閉じ込め、且つプラズマの一様性を保つために引き出し面では磁場を可能な限り弱くしなければならない。このような磁場配位を得るために3次元磁場解析を行ない、各磁石の配置を決めた。

#### 3.1 基本磁場配位 I

第3.1 a, b 図に本プラズマ源の基本的な磁場配位における解析結果を示す。この磁場配位を基本磁場配位 I と呼ぶ。用いたフィラメントは形状 I である。以後特にことわらない限りフィラメントの形状は I である。すべての計算において、電子の初期エネルギーを 40 eV、飛翔時間を 1.6  $\mu$ s とした。電子軌道の様子を調べる目的から計算では一本のフィラメントを用いた。計算結果から、電子はプラズマ源内によく閉じ込められており、水素ガスの電離、解離が促進され高いプロトン比が得られることが期待できる。引き出し面での磁場強度は幅 6 cm 弱の範囲で 20 Gauss 以下<sup>12)</sup> となっており、高プロトン比とほぼ一様性の良いプラズマを両立して実現できる見通しがあった。しかし、原研での性能目標としては引き出し面での均一なプラズマの幅を 8 cm としており、この範囲で一様なプラズマを得るためには開口部の磁場強度を下げなければならないことがこれらのシミュレーションから予想される。

#### 3.2 チェンバー頂上部に磁石を1列追加した磁場配位

開口部の磁場を変える前に、基本磁場配位 I に関してアークチェンバー頂上部の磁石の効果によるプロトン比特性の変化やプラズマの一様性の変化を見るために、第3.2 a, b 図に示すとおり、チェンバー頂上部に磁石を1列追加した場合の磁場分布と電子軌道の計算を行った。1列追加の場合には、基本磁場配位 I に比べて、チェンバー中央部の磁場強度の小さい領域は狭くなるが、ビーム引き出し部の磁場強度は幾分下がって、20 Gauss 以下の領域が 6 cm 幅になっている。これは、磁石の追加によって垂直磁場が増強されビーム引き出し部近傍の逆方向の垂直磁場がキャンセルされ、引き出し面より幾分上側にあった磁場強度の小さい領域が下方に移動したた

電子ビームダンプ裏面にもカスプ磁場形成用の磁石3列を配置した。陰極には直径1.8 mm  $\phi$  のタングステンフィラメント16本を用いる。プロトン比はビーム引き出し部における一次電子の密度によっても変化する<sup>11)</sup>。つまり、引き出し面に多量の一次電子を供給するようなフィラメント形状を用いるとプロトン比は低下するので、一次電子の軌道計算から、電子が引き出し面にできるだけ流れ込まないような形状とした。フィラメントをチェンバー内面に沿わせる形状Iと、より内側に傾倒させた形状II（第2.1図、第2.2図参照）の2種類を用いた。

### 3. 三次元軌道計算コードによる磁場解析と電子軌道計算<sup>9)</sup>

多極磁場型プラズマ源においては磁場形状は最も重要な要素である。プラズマ源の適切な磁場配位によって陰極から放出された電子を効率よく閉じ込め、且つプラズマの一様性を保つために引き出し面では磁場を可能な限り弱くしなければならない。このような磁場配位を得るために3次元磁場解析を行ない、各磁石の配置を決めた。

#### 3.1 基本磁場配位 I

第3.1 a, b 図に本プラズマ源の基本的な磁場配位における解析結果を示す。この磁場配位を基本磁場配位 I と呼ぶ。用いたフィラメントは形状 I である。以後特にことわらない限りフィラメントの形状は I である。すべての計算において、電子の初期エネルギーを40 eV、飛翔時間を1.6  $\mu$ sとした。電子軌道の様子を調べる目的から計算では一本のフィラメントを用いた。計算結果から、電子はプラズマ源内によく閉じ込められており、水素ガスの電離、解離が促進され高いプロトン比が得られることが期待できる。引き出し面での磁場強度は幅6 cm 弱の範囲で20 Gauss 以下<sup>1)</sup>となっており、高プロトン比とほぼ一様性の良いプラズマを両立して実現できる見通しがついた。しかし、原研での性能目標としては引き出し面での均一なプラズマの幅を8 cm としており、この範囲で一様なプラズマを得るためには開口部の磁場強度を下げなければならないことがこれらのシミュレーションから予想される。

#### 3.2 チェンバー頂上部に磁石を1列追加した磁場配位

開口部の磁場を変える前に、基本磁場配位 I に関してアークチェンバー頂上部の磁石の効果によるプロトン比特性の変化やプラズマの一様性の変化を見るために、第3.2 a, b 図に示すとおり、チェンバー頂上部に磁石を1列追加した場合の磁場分布と電子軌道の計算を行った。1列追加の場合には、基本磁場配位 I に比べて、チェンバー中央部の磁場強度の小さい領域は狭くなるが、ビーム引き出し部の磁場強度は幾分下がって、20 Gauss 以下の領域が6 cm 幅になっている。これは、磁石の追加によって垂直磁場が増強されビーム引き出し部近傍の逆方向の垂直磁場がキャンセルされ、引き出し面より幾分上側にあった磁場強度の小さい領域が下方に移動したた

めである。磁石を1列追加した場合の方がプラズマの一様性は幾分良くなると考えられる。電子軌道を比較すると1列追加の場合の方が電子はそれぞれのカस्प磁場によって強く閉じ込められていることがわかる。さらに、引き出し部での最下部のカスプラインに飛び込む電子の軌道を比較すると、磁石を1列追加した場合の方がプラズマ電極からより遠い軌道を取っており、引き出し面にできるだけ一次電子を流入させないという点で、基本磁場配位 I よりも高いプロトン比が得られるものと予想される。

### 3.3 強い結合磁場の配位

次に、プラズマの一様性は無視しても、できるだけ高いプロトン比を得る磁場配位の検討を行った。その結果を第 3.3 a, b 図に示す。フィラメント陰極からの一次電子を磁場によってできるだけ閉じ込めプラズマ源開口部の方へ逃がさないようにするため、開口部側の一段目の磁石の極性を従来と逆、つまり2段目と同じS極にした。これによって、チェンバー下部の2列の磁石のS極と上部のN極間で強い結合磁場が作られ、その磁場によって陰極から放出された一次電子は捕獲され、チェンバー開口部まで到達できない。このような磁場配位はJETのNBIイオン源で用いられているスーパーカस्प<sup>5)</sup>と類似の磁場配位と考えられる。従来の磁場配位にくらべて、上部磁石と最下部の磁石の作る磁場が強いため最下部の磁石に入る磁界の向きが水平方向に対して大きな角度を有しており、この磁場によって捕獲されている一次電子は引き出し部からより離れる軌道をとっている。ビーム引き出し部にできるだけ一次電子を飛び込ませないという点で高いプロトン比が期待できる磁場配位であるが、チェンバー内で電子が極めて局在化するために当然のことながら一様性は悪い。

### 3.4 基本磁場配位 I でフィラメント形状 II の場合

次に、フィラメント形状が電子軌道に及ぼす影響について調べるために、フィラメント形状 II を用いた場合の電子軌道を基本磁場配位 II について計算した。その結果を第 3.4 a, b 図に示す。フィラメント形状 I を用いた第 3.1 図と比較すると、フィラメントをチェンバーの中心側に倒した形状 II の方が、チェンバーの中心部まで電子が飛翔し、チェンバー内部のプラズマの一様性は良くなると考えられる。開口部での電子軌道に大きな変化はないので、このフィラメントを用いてもプロトン比を低下させることは無いと考えられる。

### 3.5 開口部磁場強度を下げた場合

以上のシュミレーションにより高いプロトン比が得られることの見通しがついたが、引き出し面でのプラズマの一様性については、基本磁場配位 I においてもビーム引き出し部の磁場強度が高く、十分に最適化されているとは言えない。そこで、電子軌道をあまり変えることなくビーム引き出し部の磁場の強度を弱くする磁石配置を求めた。その結果が第 3.5 a, b 図である。つまり、ビーム引き出し部から第1段目と2段目の磁石の高さ寸法を、それぞれ元の2分の1と3分

の2の10mm, 14mmにしたものである。これによって引き出し部での磁場強度が低下し、20 Gauss以下の領域が約10cm幅に広がっている。電子軌道を見ると、電子は基本磁場配位Iの場合に比べて、それほど強く捕獲されてはおらず、チェンバー内に平均的に分布しており、プラズマ源内に均一で高密度のプラズマを生成でき、引き出し面でも一様性の良いプラズマが得られることが期待できる。

### 3.6 開口部磁場強度を下げフィラメント形状IIの場合

基本磁場配位Iの電子軌道に近付けるため、3.5節に示した磁場配位においてフィラメントを形状IIに替えた場合の電子軌道を第3.6a, b図に示す。この場合には電子のチェンバー内での軌道の様子が、第3.5a, b図の場合よりは第3.1a, b図に近い分布を示す。しかし、形状Iのフィラメントを用いた同図の場合と違ってプラズマ電極に飛び込む電子軌道が存在する。引き出し部に高速一次電子が多量に存在すれば、これによってプラズマ電極近傍で分子イオンが生成され解離される前にビームとして引き出されるので、結果としてプロトン比は3.5節の場合に比べて低下すると思われる。

### 3.7 基本磁場配位IIでフィラメント形状IIの場合

第3.6a, b図に示した磁場配位の欠点を克服する、つまり引き出し部に飛び込む電子軌道を無くする磁場配位が、第3.7a, b図に示すとおり、チェンバー頂上部に磁石を1列追加した配位である。チェンバー内部の磁場強度は第3.6a, b図の場合より少し強くなったが、ビーム引き出し部での20 Gauss以下の領域はほとんど変わらず約11cm幅である。高プロトン比と一様性の良いプラズマを同時に生成できる最も有望な磁場配位であると考えられる。この磁場配位を基本磁場配位IIと呼ぶ。

### 3.8 頂上部に磁石を3列追加した場合

参考までに、チェンバー頂上部に3列の磁石を取り付けた場合の磁場配位と電子軌道を第3.8a, b図に示す。この場合の磁場強度は頂上部に磁石を付けない第3.6a, b図の場合とよく似ているが、プラズマ電極に飛び込んでいく電子軌道がいくつか存在し、プロトン比は低いことが予想される。

### 3.9 開口部磁場強度を下げた場合の結合磁場配位

第3.9a, b図には第3.3a, b図と同様に、開口部から1段目の磁石の極性を2段目と同じにした場合の電子軌道を示す。用いたフィラメントは形状IIであり第3.3a, b図の場合と同様である。チェンバー内部および開口部の磁場強度は前者に比べて約20 Gauss程度低下しているが、電子軌道は類似しており磁石の寸法が小さくなくてもほぼ同様に高いプロトン比特性が得られる

ものと考えられる。

## 4. 実験結果

磁場分布計算および電子の軌道計算により、ある程度高いプロトン比と一様性の良いプラズマを生成できる見通しがついたので、計算結果を反映できるような構造でプラズマ源を製作し、各磁場配位毎にアーク放電試験、プラズマの一様性の測定、ビーム引き出しを行いプロトン比の測定を順次行った。磁場配位毎のアーク放電特性、プラズマの一様性並びにプロトン比の測定結果を示す。

### 4.1 基本磁場配位 I

第 4.1 a 図に基本磁場配位 I でのアーク放電特性を示す。アークチャンバーの動作ガス圧力は約 0.4 Pa である。アーク放電電流 1100 A まで放電させ電圧、電流を測定した。同時にプラズマ電極の浮動電位も測定した。これはプロトン比とプラズマ電極の浮動電位の間に関連性があり、高いプロトン比の場合には浮動電位も高い値（図中ではマイナス極性で示してあるので浮動電位が高いということは 0 に近いことを意味する。）を示すことが確認されている<sup>1)</sup> ためである。アーク放電電流 1100 A で電圧は 55 V であり低電圧のアーク放電が安定に得られた。

次に、プラズマの空間分布を測定した結果を示す。プラズマの空間分布の測定においては、リングミューアプローブを用いてイオン飽和電流密度を測定した。プラズマ源の開口部長手方向の測定には、模擬プラズマ電極上に取り付けた直径 10 mm の円形平板プローブ 27 個を用いた。平板プローブは、短手方向に対して中心部とそれぞれ 30 mm 間隔で 2 個の計 3 個が配置され、長手方向に対してはこれら 3 個が中心部および中心からそれぞれ  $\pm 172$  mm,  $\pm 344$  mm,  $\pm 492$  mm,  $\pm 600$  mm の位置に設けられている。カダラッシュ研の加速電極はビーム集束のため長手方向に湾曲させてあり、プラズマ源の中心部から遠ざかるに従ってプラズマ電極との距離が増す。これと同様の位置関係を保った状態でプラズマの一様性を測定するために、平板プローブの取り付けである模擬プラズマ電極も長手方向に湾曲させてある。つまり、平板プローブのプラズマ源フランジの下面から距離は中心部のもので 19 mm, 周辺に向かうに従ってそれぞれ 23 mm, 32 mm, 39 mm, 44 mm である。プラズマ源短手方向に関しては測定の空間分解能を上げるために、針プローブを用いこれを掃引して測定した。針プローブとプラズマ源フランジとの距離は、中心部のもので 16 mm であり、中心から長手方向に 320 mm の位置のもので 26 mm, 520 mm の位置のもので 36 mm である。測定においてプローブに印加した電圧は、プローブ電流がほとんど飽和し変化しない DC -40 ~ -60 V とした。プローブの損傷を防ぐためにアーク放電のパルス幅は 200 ms 程度の短パルスとした。

第 4.1 b 図はチャンバー開口部つまりビーム引き出し部での短手方向のイオン飽和電流密度分布を示しており、第 4.1 c 図はチャンバーの長手方向のイオン飽和電流密度の分布を示している。

ここで、定められた領域でのプラズマの一様性  $U$  を以下のように定義する。

$$U = \frac{J_{is\max} - J_{is\min}}{J_{is\max} + J_{is\min}} \quad (\pm \%) \quad (1)$$

ここで、 $J_{is\max}$ 、 $J_{is\min}$  は、対象とする範囲でのそれぞれイオン飽和電流密度の最大値および最小値である。

第 4.1 b 図より引き出し部短手方向の  $\pm 4$  cm の範囲で一様性を求めると  $\pm 38\%$  となる。第 4.1 c 図について長手方向の  $\pm 50$  cm の範囲における一様性は  $\pm 8\%$  となる。このことから、長手方向に関しては容易に一様性の良いプラズマが得られることが確認された。

この状態でビームを引き出し、ドップラーシフト分光法<sup>12)</sup>によりビームのイオン組成比を測定した。ビーム粒子のエネルギーの違いによって、水素原子から発せられる  $H\alpha$  光がドップラーシフトする度合が異なり、これを分光して各イオン種の比率を求めるのがこの手法である。ビームは、加速管の制約によりビーム引き出し部中央の  $7$  cm  $\times$   $27$  cm の領域から引き出された。ビームの下流の約  $3$  m の位置をビーム軸に対して  $30$  度の角度で測定した。ビームプラズマからの  $H\alpha$  光はレンズによって集光され、ライトガイドによって分光器まで導かれた。測定はビームが近づく方向であり、高速粒子からの  $H\alpha$  光は短波長側にずれて観測される。測定された分光波形および各粒子の発光の断面積からイオン組成比を求めた。

第 4.1 d 図にビーム引き出し電流密度に対するイオン組成比の変化を示す。ビーム電流密度  $153$  mA/cm<sup>2</sup> において  $85\%$  のプロトン比が得られた。

## 4.2 垂直磁場増強の磁場配位

第 4.2 a 図にアーク放電特性を示す。アーク放電電流  $1300$  A でアーク電圧  $60$  V であり、安定な放電が得られた。プラズマ電極の浮動電位も第 4.1 a 図の場合よりも高い（プラズマ電極とアノード間の電位差が小さい）ので基本磁場配位 I に比べてプロトン比は高いと予想できる。第 4.2 b 図にイオン飽和電流密度の開口部短手方向の分布を示す。短手方向の  $\pm 4$  cm の範囲での一様性は  $\pm 25\%$  であり基本磁場配位 I より向上している。また、第 4.2 c 図は長手方向のイオン飽和電流密度の分布を示す。中心軸上の  $\pm 50$  cm の範囲で  $\pm 3\%$  である。第 4.2 d 図にイオン組成比の測定結果を示す。プロトン比は電流密度  $112$  mA/cm<sup>2</sup> において  $90\%$  を越えており  $140$  mA/cm<sup>2</sup> で  $91\%$  を示した。

## 4.3 強い結合磁場の配位

次に、チェンバー開口部から 1 段目 2 段目の磁石を同じ極性にした場合のイオン組成比を第 4.3 図に示す。電流密度  $108$  mA/cm<sup>2</sup> で  $95\%$  の高いプロトン比が得られた。この磁場配位においてはプラズマの一様性の測定は行っていない。



#### 4.4 開口部磁場強度を下げた磁場配位

第 3.5 a, b 図に示した通り、プラズマの一樣性を良くするために、第 1, 2 段の磁石の高さ寸法をそれぞれ 10 mm, 14 mm にした場合の開口部短手方向および長手方向のイオン飽和電流密度分布をそれぞれ第 4.4 a, b 図に示す。第 4.1 b 図の場合と比べると、アーク電流 900 A において短手方向  $\pm 4$  cm の範囲でプラズマの一樣性が  $\pm 16\%$  となり、一樣性が大幅に改善された。このことより、チェンバー開口部の磁場強度を弱くすることが開口部短手方向のプラズマの一樣性を良くする上で有効であることが実験的に確かめられた。長手方向に関しては、アーク電流 900 A において  $\pm 50$  cm の範囲で  $\pm 10\%$  である。

#### 4.5 フィラメント形状 II の効果

フィラメントの形状がプラズマ密度の一樣性に与える効果について調べるために 4.4 節と同様な磁場配位において、よりチェンバーの内側に倒したフィラメント形状 II を用いた場合の結果を次に示す。第 4.5 a 図にアーク放電特性を示す。アーク電流 1350 A で電圧 55 V で放電が安定に生成されているが、アーク電流の小さい領域でも他の場合、たとえば第 4.1 a 図や第 4.2 a 図などよりアーク電圧が約 10 ~ 15 V 高い。イオン飽和電流密度の開口部短手方向の空間分布を第 4.5 b 図に示す。短手方向の  $\pm 4$  cm の領域について、アーク電流 900 A でプラズマの一樣性  $\pm 14\%$ , 1450 A で  $\pm 9\%$  が得られた。このことより、フィラメントを内側に倒した方が一樣性が良くなることが明らかになった。第 4.5 c 図に長手方向のイオン飽和電流密度の分布を示す。第 4.5 d 図にイオン組成比の測定結果を示す。引き出し電流密度  $185 \text{ mA/cm}^2$  においてプロトン比 91% が得られた。

#### 4.6 基本磁場配位 II とフィラメント形状 II の効果

4.2 節に示したとおり頂上部に磁石を 1 列追加した場合には、追加しない場合に比べてプラズマの一樣性およびプロトン比共改善されたので開口部の磁場強度を下げた基本磁場配位 II においても同様に磁石の追加を行った。第 4.6 a 図にアーク放電特性を示す。磁石をつけない場合の第 4.5 a 図に比べてアーク電圧が 1000 A において約 10 V 低い。そしてアーク電流 1500 A まで安定に放電させることができた。また、プラズマ電極の浮動電位  $V_{PG}$  も 1500 A において  $-6.5$  V を示し、他の場合に比べて高い電位を示した。イオン飽和電流密度の短手方向分布を第 4.6 b 図に示す。アーク電流 600 A での長手方向に関する中心部での短手方向  $\pm 4$  cm の範囲でのイオン飽和電流密度分布はほとんど一定であり、プラズマの一樣性が良いことがわかる。但し、長手方向中心から 52 cm のところでの短手方向の一樣性は  $\pm 12\%$  であり、周辺部で幾分プラズマ密度の一樣性が低下していることがわかる。第 4.6 c 図に長手方向のイオン飽和電流密度分布を示す。 $\pm 50$  cm のところでは約  $\pm 5\%$  であり、ほぼ一樣な分布である。この場合プラズマ源の周辺部  $\pm 60$  cm まで測定した。周辺でプラズマの密度が急激に低下している。これは、プラズマ源の両端部の磁場によるためである。第 4.6 d 図にイオン組成比の測定結果を示す。引き出し電流

密度  $150 \text{ mA/cm}^2$  において 93 % のプロトン比が得られた。

#### 4.7 開口部磁場強度を下げた場合の結合磁場配位

第 3.9a, b 図に示したように, 1 段目の磁石の極性を 2 段目と同じ S 極にし, 強い結合磁場を形成させプロトン比を上げることを試みた。第 3.9 a, b 図と異なるのは 1, 2 段目の磁石寸法が小さくなっていることである。フィラメント形状 I を用いた。アーク放電特性を第 4.7 a 図に示す。プラズマ電極の浮動電位は, アーク電流  $1350 \text{ A}$  で  $-5 \text{ V}$  であり他の磁場配位などと比べて僅かの差ではあるが最も高い電位である。第 4.7 b 図に短手方向のイオン飽和電流密度の空間分布を示す。プラズマの一様性は他の磁場配位に比べて最も悪く, 三角形分布をしていることがわかる。これは磁石を同極性としたことにより, 開口部での磁場強度が増加したためである。第 4.7 c 図に長手方向のイオン飽和電流密度の分布を示す。中央部での長手方向の一様性は比較的良い。第 4.7 d 図にプロトン比の引き出し電流依存性を示す。引き出し電流密度  $175 \text{ mA/cm}^2$  において最高のプロトン比である 95 % が得られた。磁場分布計算や電子の軌道計算の結果から予想したとおり, 高いプロトン比が得られた。これは開口部の 1 段目, 2 段目の磁石と上方の磁石との間に形成される強い結合磁場によって, フィラメントからの一次電子が捕獲され容易にビーム引き出し部まで到達できないためである。

## 5. 検 討

### 5.1 プラズマの一様性と磁場配位, フィラメント形状

大型のプラズマ源の開発において重要なことは, 高いプロトン比を有するビームの生成とビーム引き出し部での一様性の良いプラズマの生成を同時に満足させることである。プロトン比は, おおよそプラズマの体積とイオンの損失面積の比で決まり, 高プロトン比を得るには大きな体積を有したプラズマを生成し, 且つイオンの損失を少なくすることが必要である<sup>3)</sup>。プラズマからのイオンの損失は陰極面ばかりでなく陽極における陽極降下領域においても行われる。陽極におけるイオンの損失面積はカスプライン磁場の強度に依存し, 陽極表面の磁場強度によるイオンのラーマ運動直径の幅とラインカスの全長の積で示される。従って, 高プロトン比ビームを得るためには陰極の面積を小さくするばかりでなく, 陽極に用いるカスプ磁場の強度を強くすることが必要である。ところが, プラズマ源のビーム引き出し部においてはビーム電流の空間的一様性を確保するために, 磁場強度が弱いことが望ましい。従って, プラズマ源の開口部, すなわちプラズマ電極はイオンの損失面積として働くので開口部をできるだけ狭くすることが高プロトン比ビームを得るために必要である。このような条件を満足するプラズマ源の形状の一つがビーム引き出し部の短手方向の幅をプラズマ源の直径  $340 \text{ mm}$  に対して  $198 \text{ mm}$  と狭くした本半円筒型プラズマ源の形状である。

密度  $150 \text{ mA/cm}^2$  において 93 % のプロトン比が得られた。

#### 4.7 開口部磁場強度を下げた場合の結合磁場配位

第 3.9a, b 図に示したように, 1 段目の磁石の極性を 2 段目と同じ S 極にし, 強い結合磁場を形成させプロトン比を上げることを試みた。第 3.9 a, b 図と異なるのは 1, 2 段目の磁石寸法が小さくなっていることである。フィラメント形状 I を用いた。アーク放電特性を第 4.7 a 図に示す。プラズマ電極の浮動電位は, アーク電流 1350 A で  $-5 \text{ V}$  であり他の磁場配位などと比べて僅かの差ではあるが最も高い電位である。第 4.7 b 図に短手方向のイオン飽和電流密度の空間分布を示す。プラズマの一様性は他の磁場配位に比べて最も悪く, 三角形分布をしていることがわかる。これは磁石を同極性としたことにより, 開口部での磁場強度が増加したためである。第 4.7 c 図に長手方向のイオン飽和電流密度の分布を示す。中央部での長手方向の一様性は比較的良い。第 4.7 d 図にプロトン比の引き出し電流依存性を示す。引き出し電流密度  $175 \text{ mA/cm}^2$  において最高のプロトン比である 95 % が得られた。磁場分布計算や電子の軌道計算の結果から予想したとおり, 高いプロトン比が得られた。これは開口部の 1 段目, 2 段目の磁石と上方の磁石との間に形成される強い結合磁場によって, フィラメントからの一次電子が捕獲され容易にビーム引き出し部まで到達できないためである。

## 5. 検 討

### 5.1 プラズマの一様性と磁場配位, フィラメント形状

大型のプラズマ源の開発において重要なことは, 高いプロトン比を有するビームの生成とビーム引き出し部での一様性の良いプラズマの生成を同時に満足させることである。プロトン比は, おおよそプラズマの体積とイオンの損失面積の比で決まり, 高プロトン比を得るには大きな体積を有したプラズマを生成し, 且つイオンの損失を少なくすることが必要である<sup>3)</sup>。プラズマからのイオンの損失は陰極面ばかりでなく陽極における陽極降下領域においても行われる。陽極におけるイオンの損失面積はカスプライン磁場の強度に依存し, 陽極表面の磁場強度によるイオンのラーマ運動直径の幅とラインカスプの全長の積で示される。従って, 高プロトン比ビームを得るためには陰極の面積を小さくするばかりでなく, 陽極に用いるカスプ磁場の強度を強くすることが必要である。ところが, プラズマ源のビーム引き出し部においてはビーム電流の空間的一様性を確保するために, 磁場強度が弱いことが望ましい。従って, プラズマ源の開口部, すなわちプラズマ電極はイオンの損失面積として働くので開口部をできるだけ狭くすることが高プロトン比ビームを得るために必要である。このような条件を満足するプラズマ源の形状の一つがビーム引き出し部の短手方向の幅をプラズマ源の直径 340 mm に対して 198 mm と狭くした本半円筒型プラズマ源の形状である。

高プロトン比のビームを得る一つの方法として、本プラズマ源のようにアークチェンバーの開口部を狭くすることが有効であることが実験によって実証された。しかし、チェンバーの開口部を絞り込んだ形状とし、引き出し部の面積を狭くすることは高プロトン比ビームの生成には有効であるが、プラズマの均一性を良くする点では逆効果である。つまり、開口部を狭くすればチェンバーの磁石からビーム引き出し部までの距離が短くなり、そこでの磁場強度が増しプラズマの均一性は悪化する。本プラズマ源においても、すべてのカスプ磁場を幅 10 mm × 高さ 20 mm の磁石で形成した場合には、開口部の磁場が強くなりプラズマの均一性は悪かった。今回の実験では、これまでのイオン源でも確認されているように、磁場の強度が 20 Gauss 以上となるとプラズマ密度は急激に減少してしまうことが確認された。従って、ビーム引出し領域において均一なプラズマを生成するにはそこでの磁場の強度を 20 Gauss 以下にしなければならない。この一つの方法として行ったのがプラズマ源の頂上部に磁石を追加することである。磁場の計算によれば、これによってプラズマ電極近傍における磁場強度の小さい楕円状領域の中心位置がプラズマ電極の上方 25 mm の位置から 20 mm と下がり、プラズマ電極面における 20 Gauss 以下の領域幅も 55 mm から 60 mm に広がることが予想される。実験結果においてもこの傾向が認められ、80 mm 幅でのプラズマの均一性は  $\pm 38\%$  から  $\pm 25\%$  に向上した。

しかし、これだけでは不十分であり、開口部の磁場強度をさらに下げ、プラズマの均一性を向上させるために開口部から 1, 2 段目の磁石の寸法を元の 20 mm から各々 10 mm, 14 mm と短くした。これによってプラズマ電極面での 20 Gauss 以下の領域幅は 100 mm に拡大され、プラズマ密度の測定からも均一性の大幅な改善が見られ、幅 80 mm の領域で  $\pm 9\%$  が得られた。つまり、プラズマ源のビーム引き出し部において均一性  $\pm 10\%$  以下の均一なプラズマを得るには 20 Gauss 以下の領域を引き出し領域幅より 20 mm 程度以上広い領域とすることが必要であることが明らかとなった。

フィラメント形状が引出し部でのプラズマ密度の均一性に及ぼす影響について比較すると、形状 I よりも形状 II の方が幾分均一性が良い。形状 I のフィラメントがアークチェンバーの内面に添うような形状となっており、フィラメントの大部分が約 30 Gauss 以上の磁場の強い位置に置かれている。これに対して形状 II ではフィラメントは 20 Gauss 以下の磁場の弱い領域に置かれている。軌道計算の結果の第 3.5 図と第 3.6 図を比較すると、フィラメント形状 II を用いた第 3.6 図の方が電子軌道がフィラメントの配置された周囲に集中しているものの、軌道は緻密で均一に分布していることがわかる。フィラメント全数を用いた実際の放電においても形状 II の場合がチャンバー内部でより均一なプラズマが生成されているものと考えられる。以上から均一なプラズマをビーム引き出し部に生成させる場合、フィラメントはプラズマ源の磁場の弱い領域、つまり中心部に配置する事が良いと言えよう。

## 5.2 プロトン比と磁場配位, 電子軌道

プラズマの均一性ばかりでなく、高プロトン比ビームを得る観点からもプラズマ源の磁場配位は非常に重要である。前述したように、プロトン比はプラズマの体積とイオンの損失面積との比の関数であり、大きなプラズマ源を用いてプラズマの体積を大きくし、強いカスプ磁場を用いてイ

オンの損失面積を小さくすればプロトン比を高くすることができる。しかし、単に強い磁場を用いれば良いと言うのではなく、磁場配位による電子軌道に注目すべきである。これはプロトン比を決める要素として、上記のプラズマ体積とイオンの損失面積ばかりでなく、ビーム引き出し部近傍での高速電子の存在があるからである。引き出し部に高速電子が存在すると、そこで生成された  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  の分子イオンが原子イオン  $H^+$  に解離される前にビームとして引き出され、結果としてビームのプロトン比を低下させてしまうからである。つまり、プロトン比を上げるためには引き出し部にできるだけ高速電子（一次電子）を飛び込ませない磁場配位が有効である。従って、プラズマ源の開口部の第1段目に流入する電子の軌道が開口部からより遠ざかる、つまり、1段目の対向する2個の磁石を結ぶ線より上側を通る軌道が好ましい。その極端な例が第1、第2段目の磁石の極性を同じにした場合である。他の磁場配位では電子軌道がほぼ水平な軌道をとって1段目のカスプラインに流入しているのに、この場合約45度の角度で入射しており、引き出し面から離れている。この磁場配位でのプロトン比は最高値の95%を記録した。この様に、高プロトンビームの生成にはビーム引き出し部に流入する一次電子を抑制する磁場配位にすることが必要である。引き出し部に流入する一次電子の量の割合を知る一つの方法として、プラズマ電極の浮動電位測定がある。この電位の高低を調べることによって、生成されるプロトン比の高低の目安とすることが可能であることが確認されている<sup>(9)</sup>。

従って、高いプロトン比を生成するプラズマ源を設計するには、磁場解析、電子軌道解析を行い、且つ実験的にはプラズマ電極の浮動電位を高くする、つまりプラズマ源のアノード電位に近い電位とするような磁場配位とすることが必要である。もちろんカソードの形状によっても一次電子の軌道は変化するので、磁場配位と併せて検討する必要がある。

## 6. お わ り に

本報告では、半円筒型プラズマ源のプラズマの一樣性とプロトン比の特性に及ぼすカスプ磁場の配位、カソードから放出される一次電子の軌道、さらにフィラメントカソードの形状について計算機コードによる解析結果と実験結果を対比させながら述べた。

得られた実験結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) ラングミュアプローブで測定した8 cm × 100 cmの範囲でプラズマの一樣性 ± 5% という良い条件において、93%の高いプロトン比が得られた。
- 2) カスプ磁場の配位を変え、プラズマ源の頂上部と開口部の磁場を強く結合させ一次電子をその磁場によって捕獲することによって、プラズマの一樣性は悪いが最高で95%のプロトン比が得られた。
- 3) ビーム引き出し部で一樣性のよいプラズマを得るには引き出し領域幅より約20 mm程度広い位置での磁場強度を20 Gauss以下にすることが必要である。
- 4) ビーム引き出し部の磁場強度を下げる方法として引き出し部のカスプ磁場形成用磁石の大きさを小さくすることが有効であるが、プラズマ源の頂上部の磁石の追加等によってプラズ

オンの損失面積を小さくすればプロトン比を高くすることができる。しかし、単に強い磁場を用いれば良いと言うのではなく、磁場配位による電子軌道に注目すべきである。これはプロトン比を決める要素として、上記のプラズマ体積とイオンの損失面積ばかりでなく、ビーム引き出し部近傍での高速電子の存在があるからである。引き出し部に高速電子が存在すると、そこで生成された  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  の分子イオンが原子イオン  $H^+$  に解離される前にビームとして引き出され、結果としてビームのプロトン比を低下させてしまうからである。つまり、プロトン比を上げるためには引き出し部にできるだけ高速電子（一次電子）を飛び込ませない磁場配位が有効である。従って、プラズマ源の開口部の第1段目に流入する電子の軌道が開口部からより遠ざかる、つまり、1段目の対向する2個の磁石を結ぶ線より上側を通る軌道が好ましい。その極端な例が第1、第2段目の磁石の極性を同じにした場合である。他の磁場配位では電子軌道がほぼ水平な軌道をとって1段目のカスプラインに流入しているのに、この場合約45度の角度で入射しており、引き出し面から離れている。この磁場配位でのプロトン比は最高値の95%を記録した。この様に、高プロトンビームの生成にはビーム引き出し部に流入する一次電子を抑制する磁場配位にすることが必要である。引き出し部に流入する一次電子の量の割合を知る一つの方法として、プラズマ電極の浮動電位測定がある。この電位の高低を調べることによって、生成されるプロトン比の高低の目安とすることが可能であることが確認されている<sup>(9)</sup>。

従って、高いプロトン比を生成するプラズマ源を設計するには、磁場解析、電子軌道解析を行い、且つ実験的にはプラズマ電極の浮動電位を高くする、つまりプラズマ源のアノード電位に近い電位とするような磁場配位とすることが必要である。もちろんカソードの形状によっても一次電子の軌道は変化するので、磁場配位と併せて検討する必要がある。

## 6. お わ り に

本報告では、半円筒型プラズマ源のプラズマの一様性とプロトン比の特性に及ぼすカスプ磁場の配位、カソードから放出される一次電子の軌道、さらにフィラメントカソードの形状について計算機コードによる解析結果と実験結果を対比させながら述べた。

得られた実験結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) ラングミュアプローブで測定した8 cm × 100 cmの範囲でプラズマの一様性 ± 5% という良い条件において、93%の高いプロトン比が得られた。
- 2) カスプ磁場の配位を変え、プラズマ源の頂上部と開口部の磁場を強く結合させ一次電子をその磁場によって捕獲することによって、プラズマの一様性は悪いが最高で95%のプロトン比が得られた。
- 3) ビーム引き出し部で一様性のよいプラズマを得るには引き出し領域幅より約20 mm程度広い位置での磁場強度を20 Gauss以下にすることが必要である。
- 4) ビーム引き出し部の磁場強度を下げる方法として引き出し部のカスプ磁場形成用磁石の大きさを小さくすることが有効であるが、プラズマ源の頂上部の磁石の追加等によってプラズ

マ源開口部近傍の磁場の弱い領域の位置を引き出し部寄りに移動させ、その領域での磁場強度を下げ、プラズマの一様性を向上させることも、ある程度可能であることを確認した。

- 5) 高いプロトン比を得るには、プラズマ源内部に一次電子を閉じ込めビーム引き出し部に高速一次電子を流出させないことが必要である。このために、磁場配位は重要であり、特にプラズマ源開口部の1段目のカusp磁場に入射する電子の軌道を開口部から遠ざけるようにすることが有効である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始、有益な議論および助言をしていただいた 関 昌弘 室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝致します。また、この実験を行う機会を与えてくださった 島本 進 核融合研究部長並びに田中正俊特別研究員に謝意を表します。

マ源開口部近傍の磁場の弱い領域の位置を引き出し部寄りに移動させ、その領域での磁場強度を下げ、プラズマの一様性を向上させることも、ある程度可能であることを確認した。

- 5) 高いプロトン比を得るには、プラズマ源内部に一次電子を閉じ込めビーム引き出し部に高速一次電子を流出させないことが必要である。このために、磁場配位は重要であり、特にプラズマ源開口部の1段目のカusp磁場に入射する電子の軌道を開口部から遠ざけるようにすることが有効である。

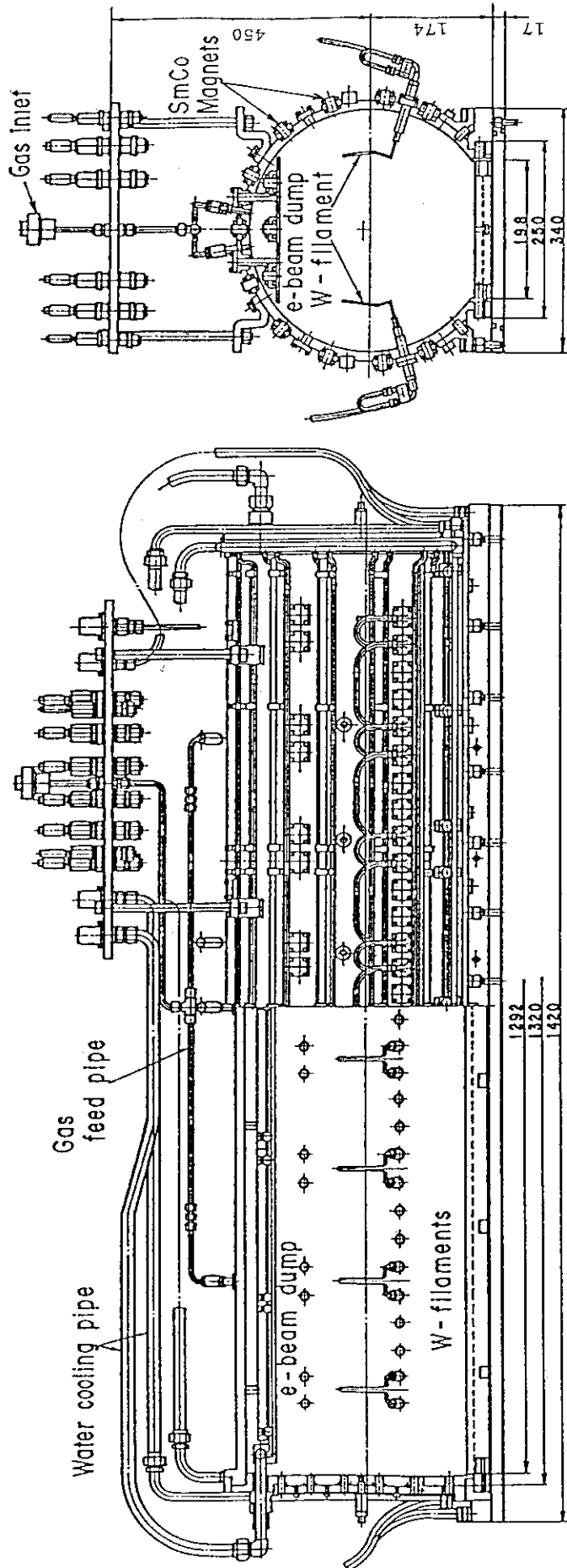
## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始、有益な議論および助言をしていただいた 関 昌弘 室長をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝致します。また、この実験を行う機会を与えてくださった 島本 進 核融合研究部長並びに田中正俊特別研究員に謝意を表します。

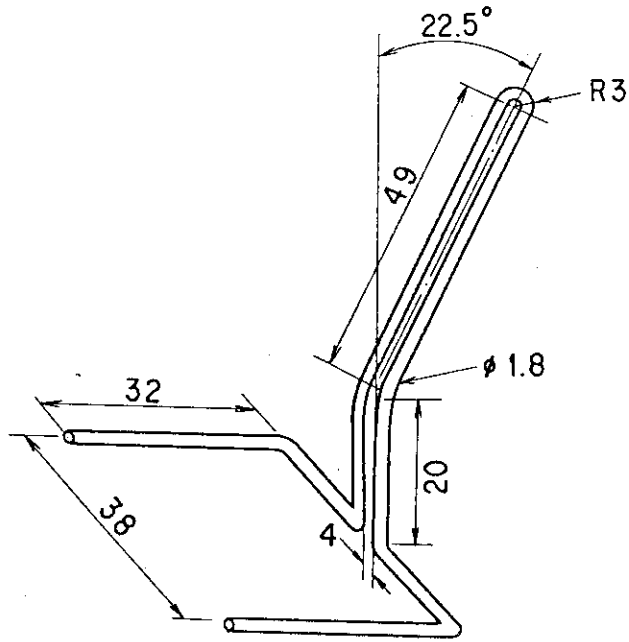


## 参 考 文 献

- 1) M. Fumelli, F. Jequier and J. Pamela, Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 31, No. 4, 1989, p.495.
- 2) J. Paméla, M. Araki, M. Fumelli, F. Jequier, S. Laffite, Y. Ohara, M. Seki, K. Watanabe, and K. Yokoyama, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A294 1990, p.299-312.
- 3) R. Becherer, J.F. Bonnal, F. Bottiglioni, M. Desmons, J. Druaux, M. Fumelli, R. Oberson, Ph. Rainbault, F.R.G. Valckx, Proc. 4th Int. Symp. on Heating in Toroidal Plasma, Rome 1984, p.1057.
- 4) K. Watanabe, M. Araki, M. Hanada, H. Horiike, T. Inoue, H. Kojima, S. Matsuda, Y. Matsuda, Y. Ohara, Y. Okumura, S. Tanaka and K. Yokoyama, Proc. 15th Symp. Fusion Technology, Utrecht, 1988, p.647.
- 5) A.J.T. Holmes, T.S. Green, A.R.Martin, R.S. Hemsworth, and E. Thompson, Proc. 4th Int. Symp. on Heating in Troidal Plasma, Rome, March 1984, p.1065.
- 6) G.M. Gammel, J.H. Kamperschroer, L.R. Grisham, H.W. Kugel, R.A. Langley, A.I. Roquemore, M.C. Vella and M.D. Williams, Proc. 12th Symp. Fusion En gineering, Oct. Montrey, 1987, p.1137.
- 7) Y. Okumura, H. Horiike, and K. Mizuhashi, Rev. Sci. Instrum. 55, (1) 1984 p.1.
- 8) Y. Ohara, Proc. Int. Ion Engineering Congress, Kyoto (1983) p.447.
- 9) Y. Ohara, M. Akiba, H. Horiike, H. Inami, Y. Okumura, and S. Tanaka, J. Appl. Phys. 61(4) 1987, p.1323.
- 10) H. Horiike, M. Akiba, T. Inoue, M. Komata, K. Mizuhashi, Y. Ohara, Y. Okumura, S. Tanaka, and K. Watanabe, Proc. 11th Symp. Ion Source and Ion-Assisted Technology, Tokyo, 1987, p.109.
- 11) K. Watanabe, M. Araki, M. Dairaku, H. Horiike, Y. Ohara, Y. Okumura, S. Tanaka and K. Yokoyama, Rev. Sci. Instrum. 61(6) 1990, p.1694.
- 12) 奥村義和, 小原祥裕, 柴田猛順 JAERI-M 9653, 1981.

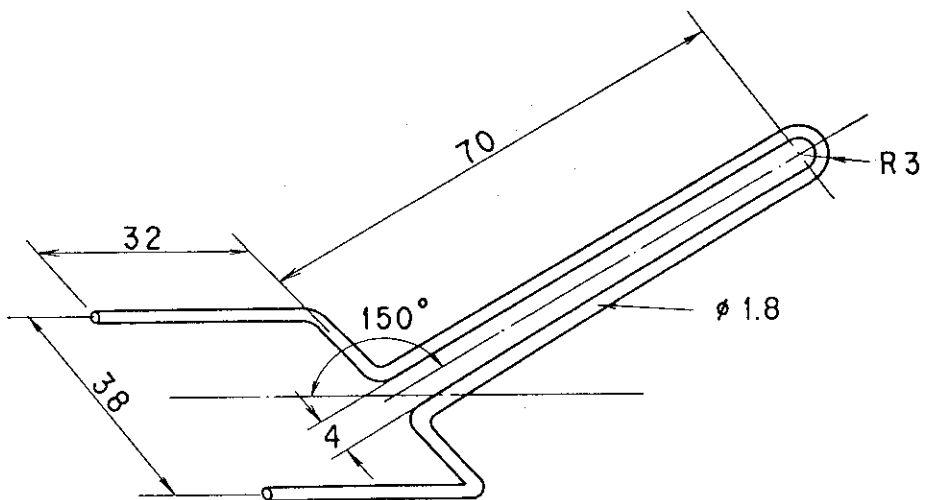


第1図 半円筒多極磁場型プラズマ源



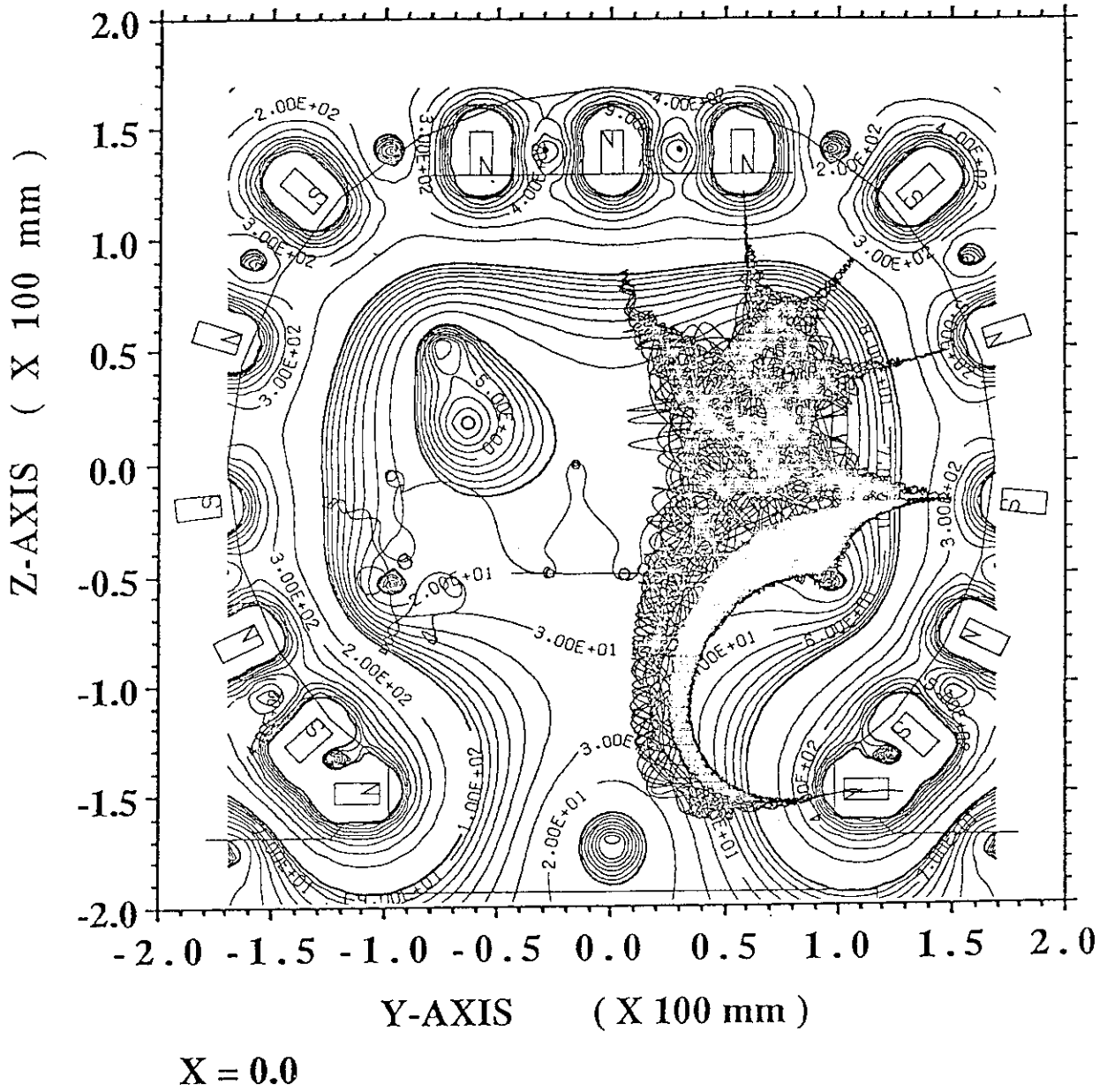
### Filament Type I

第2.1図 フィラメント形状 I

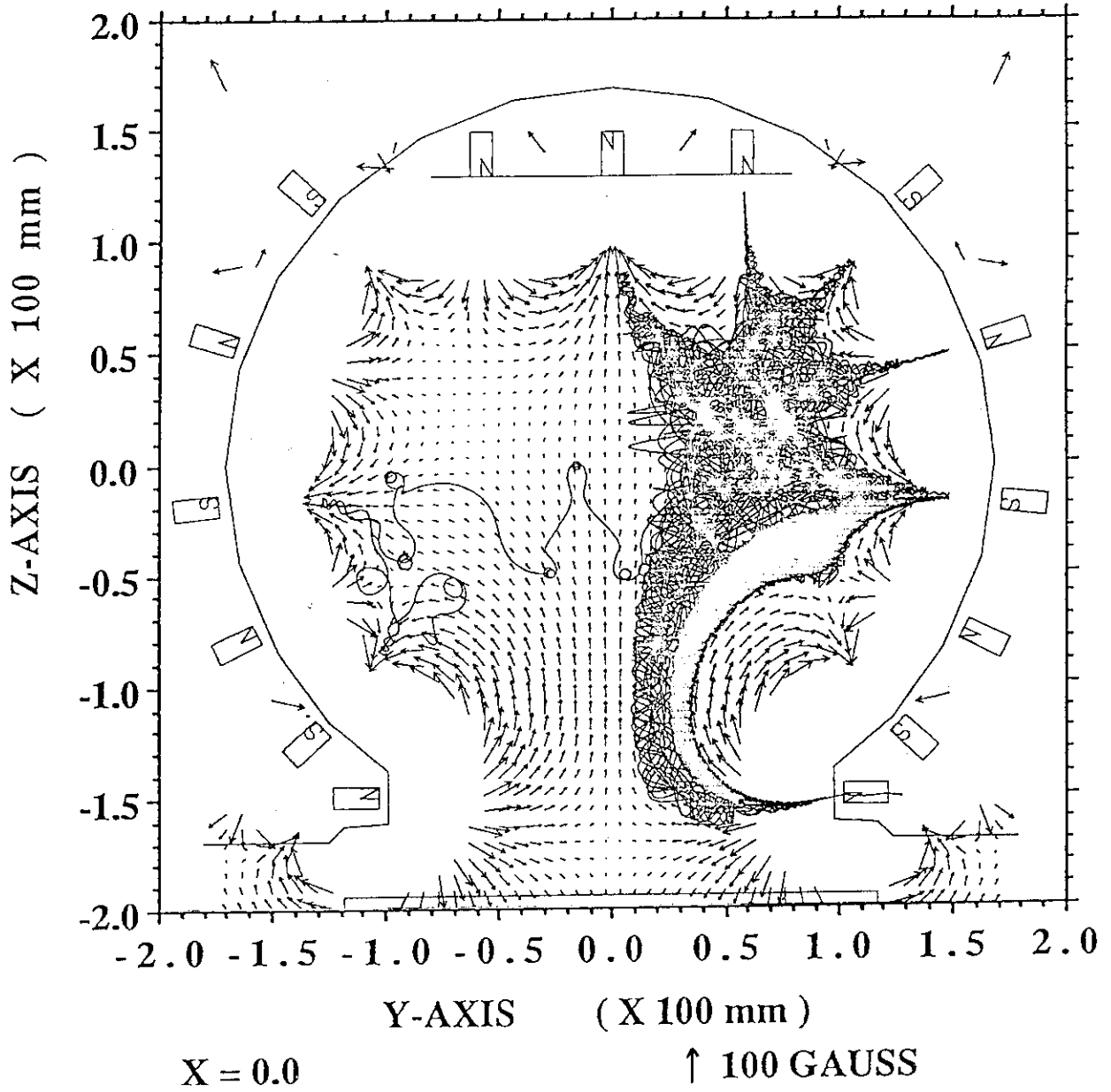


### Filament Type II

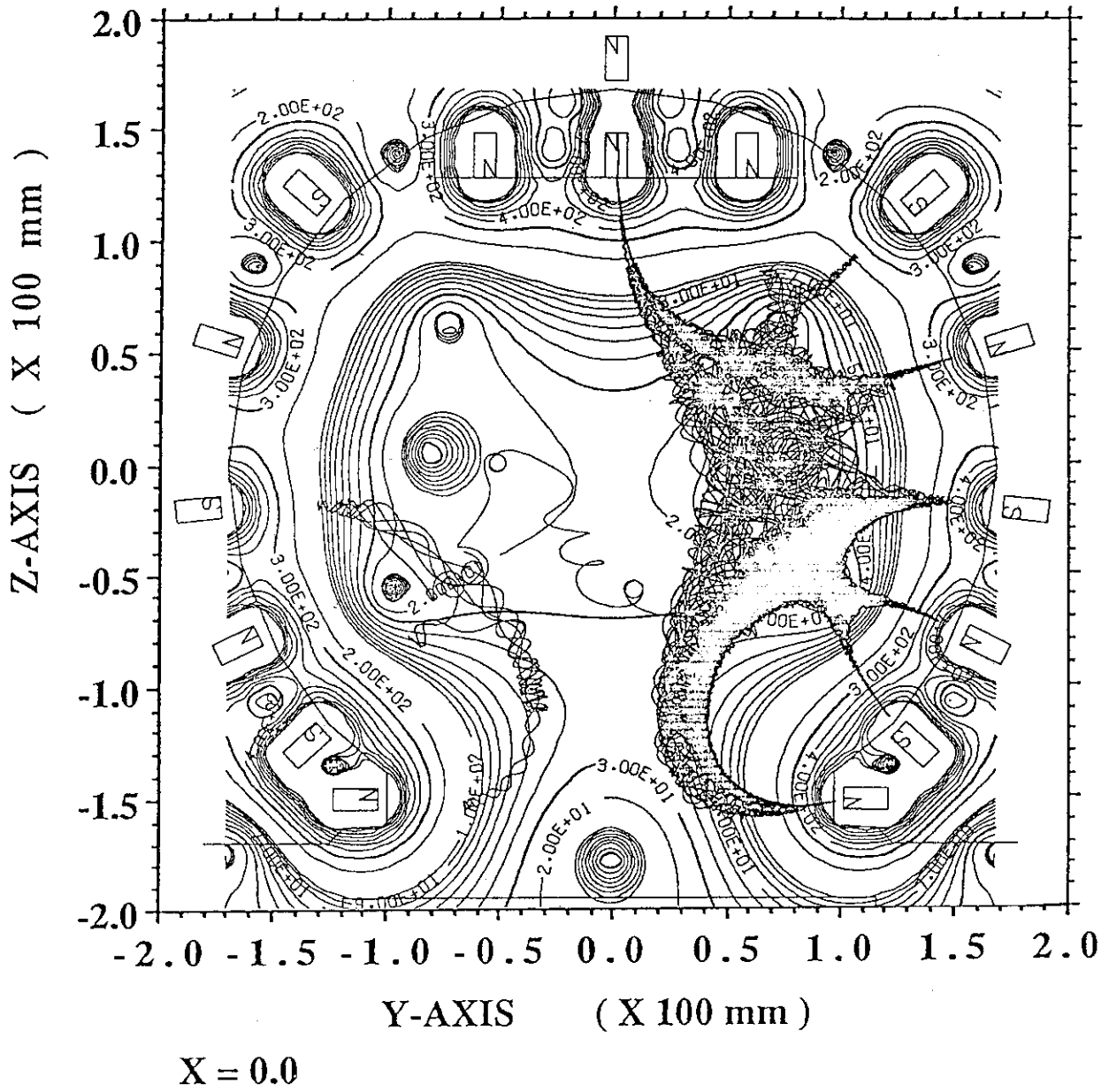
第2.2図 フィラメント形状 II



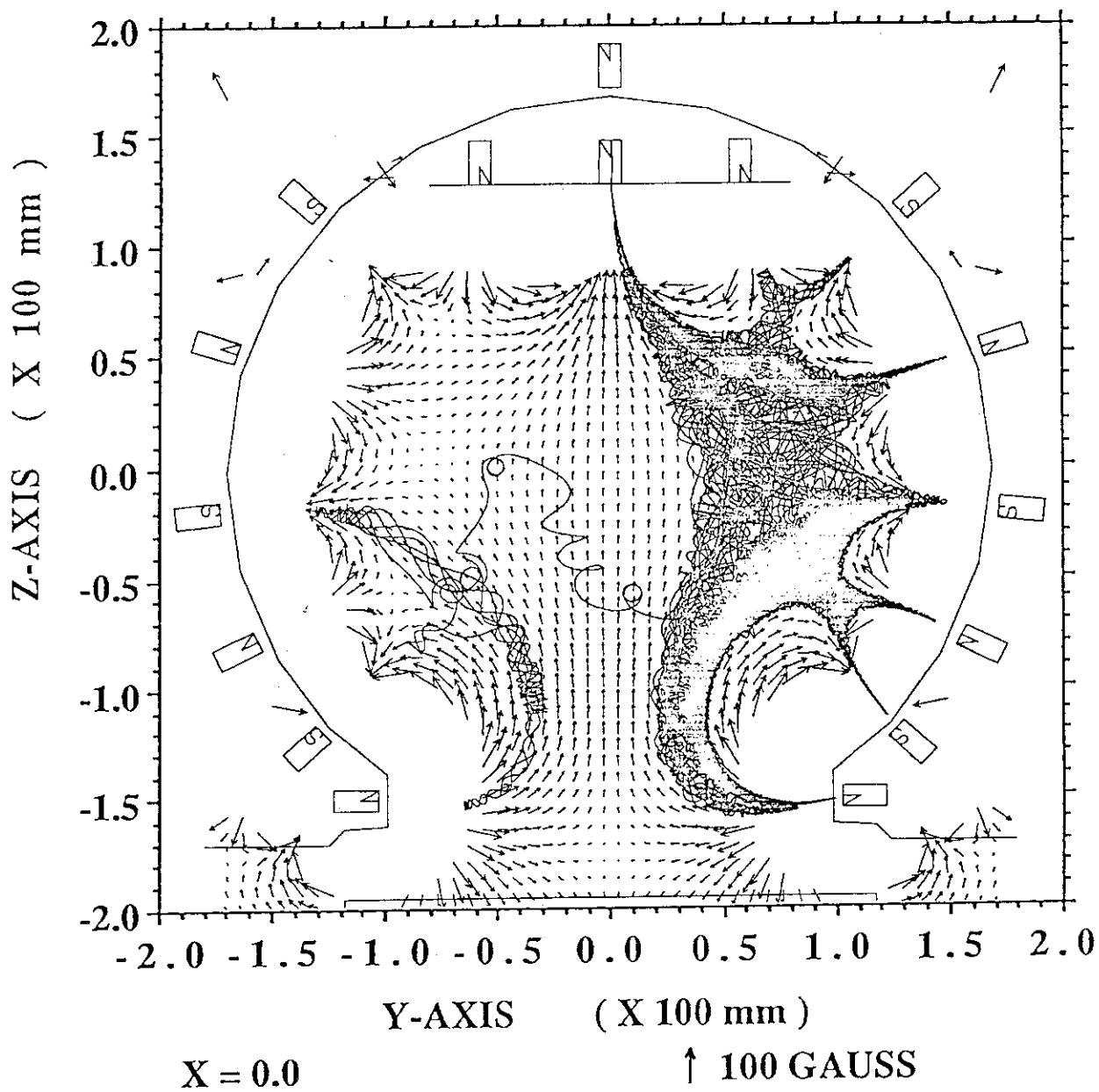
第 3.1 a 図 基本磁場配位 I での磁場分布と電子軌道



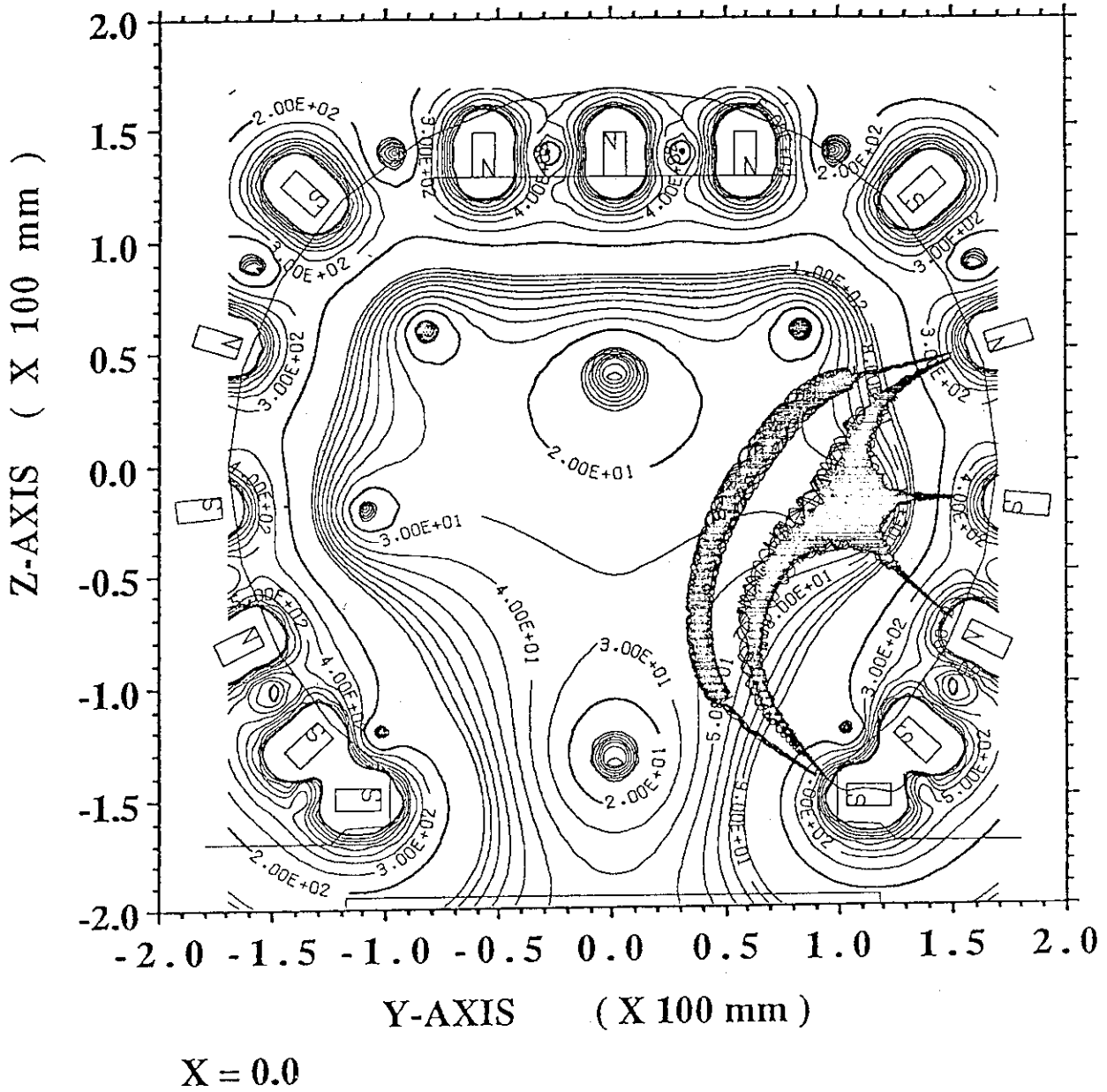
第 3.1 b 図 基本磁場配位 I での磁場ベクトル図



第3.2 a 図 基本磁場配位 I に頂上部磁石を 1 列追加した場合

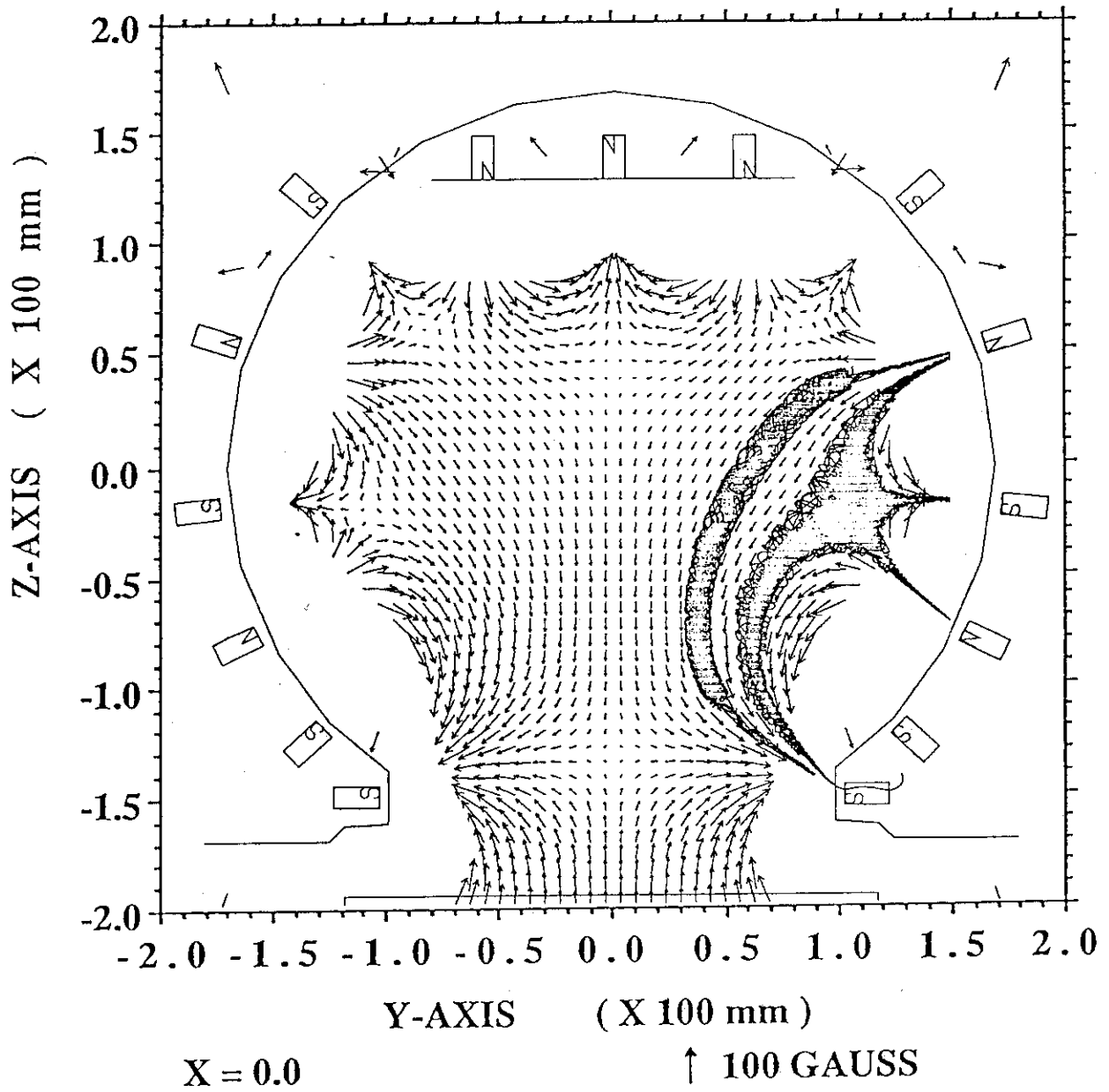


第 3.2 b 図 基本磁場配位 I の頂上部に磁石を 1 列追加した場合の  
磁場ベクトル図

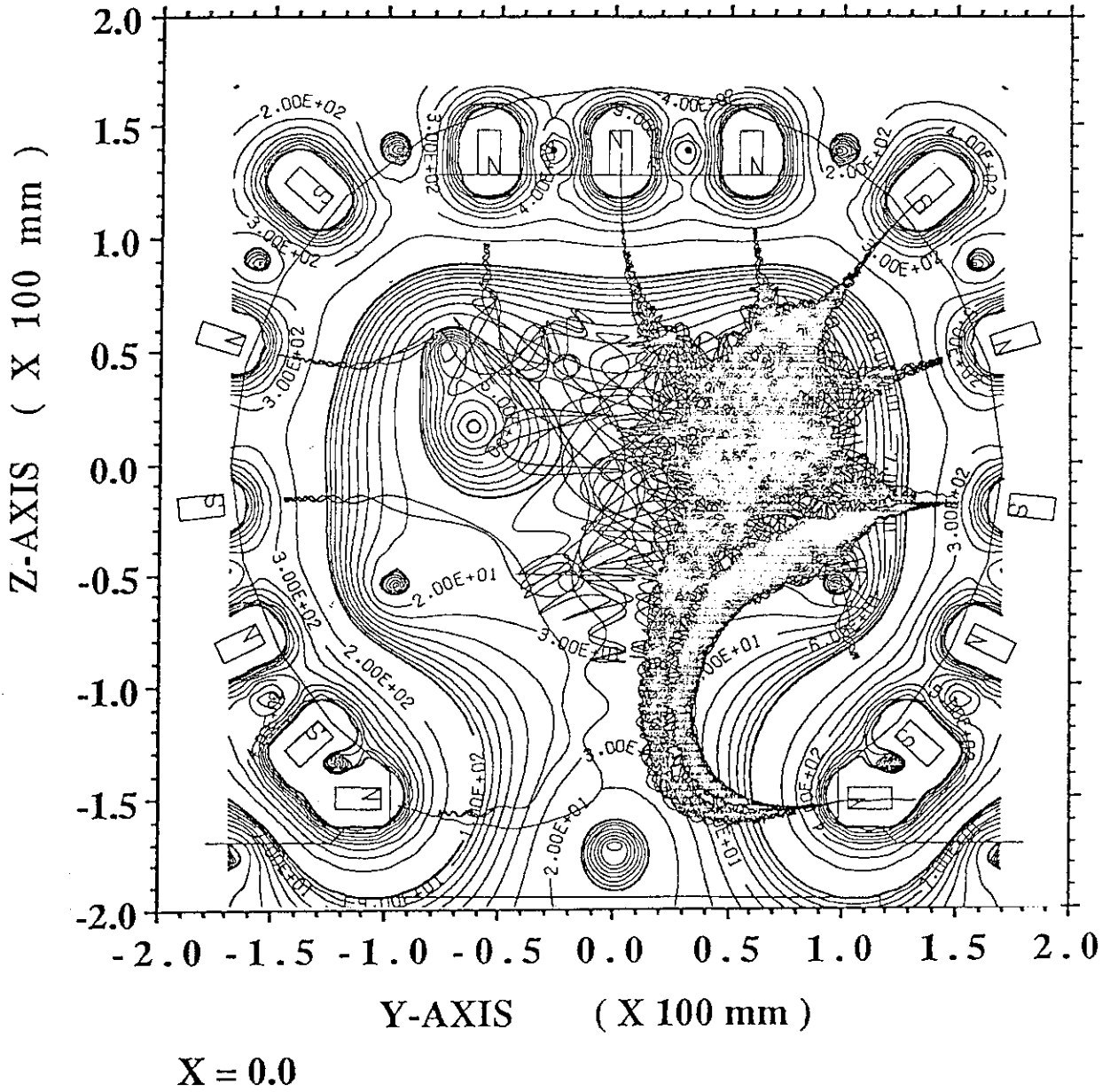


第 3.3 a 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石を同極性にした場合の  
磁場分布と電子軌道

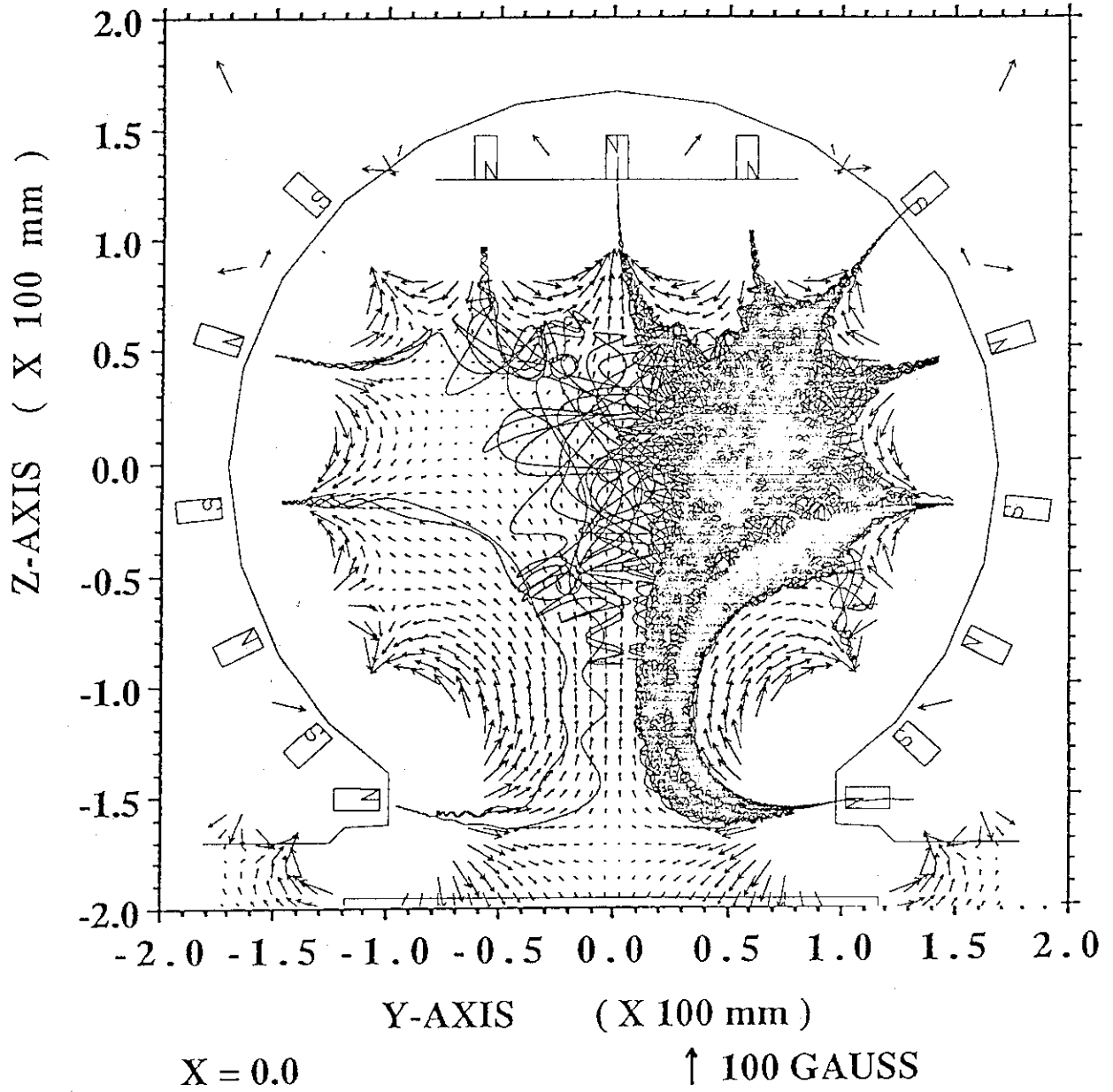




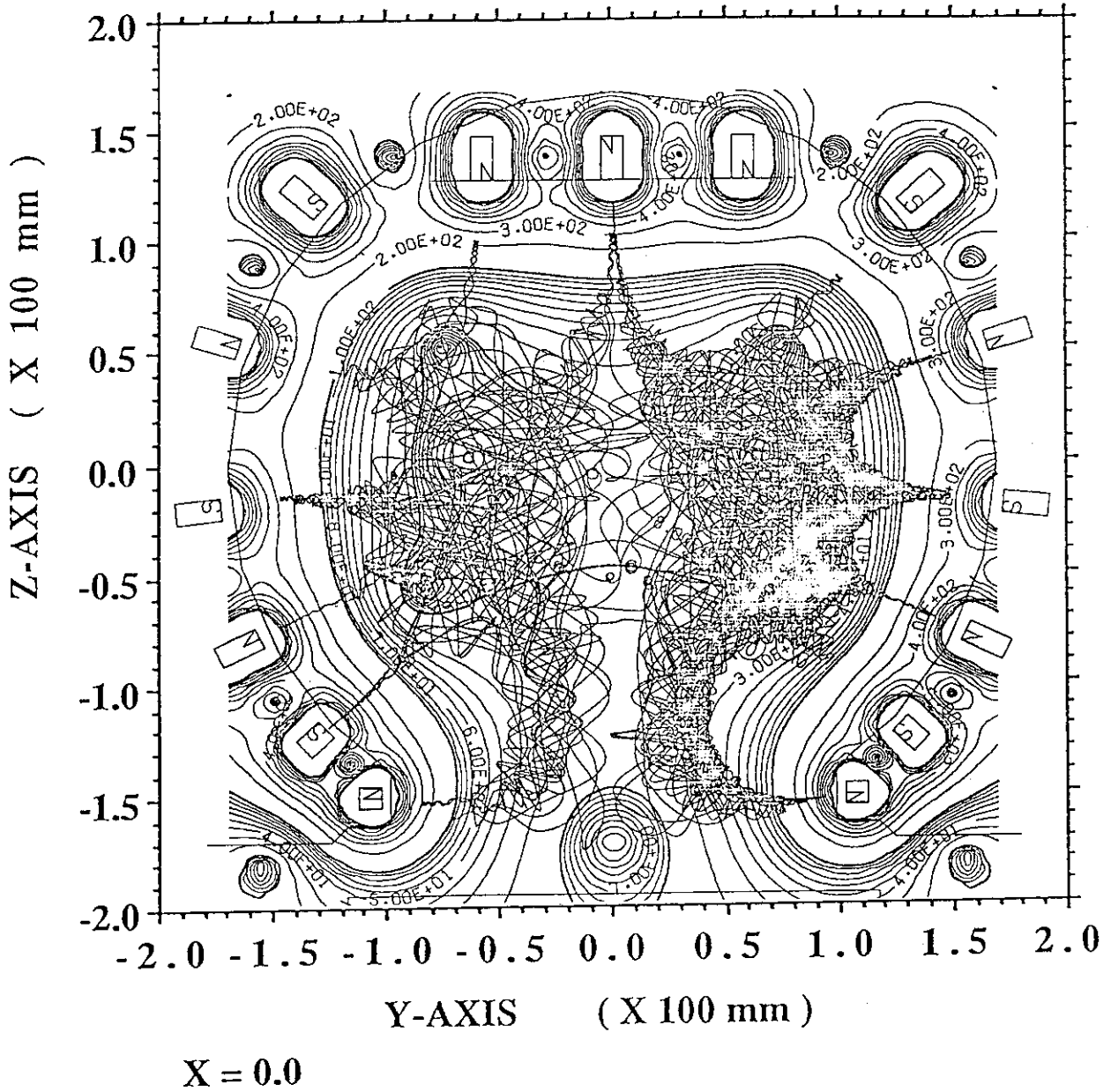
第 3.3 b 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石を同極性にした場合の  
磁場ベクトル図



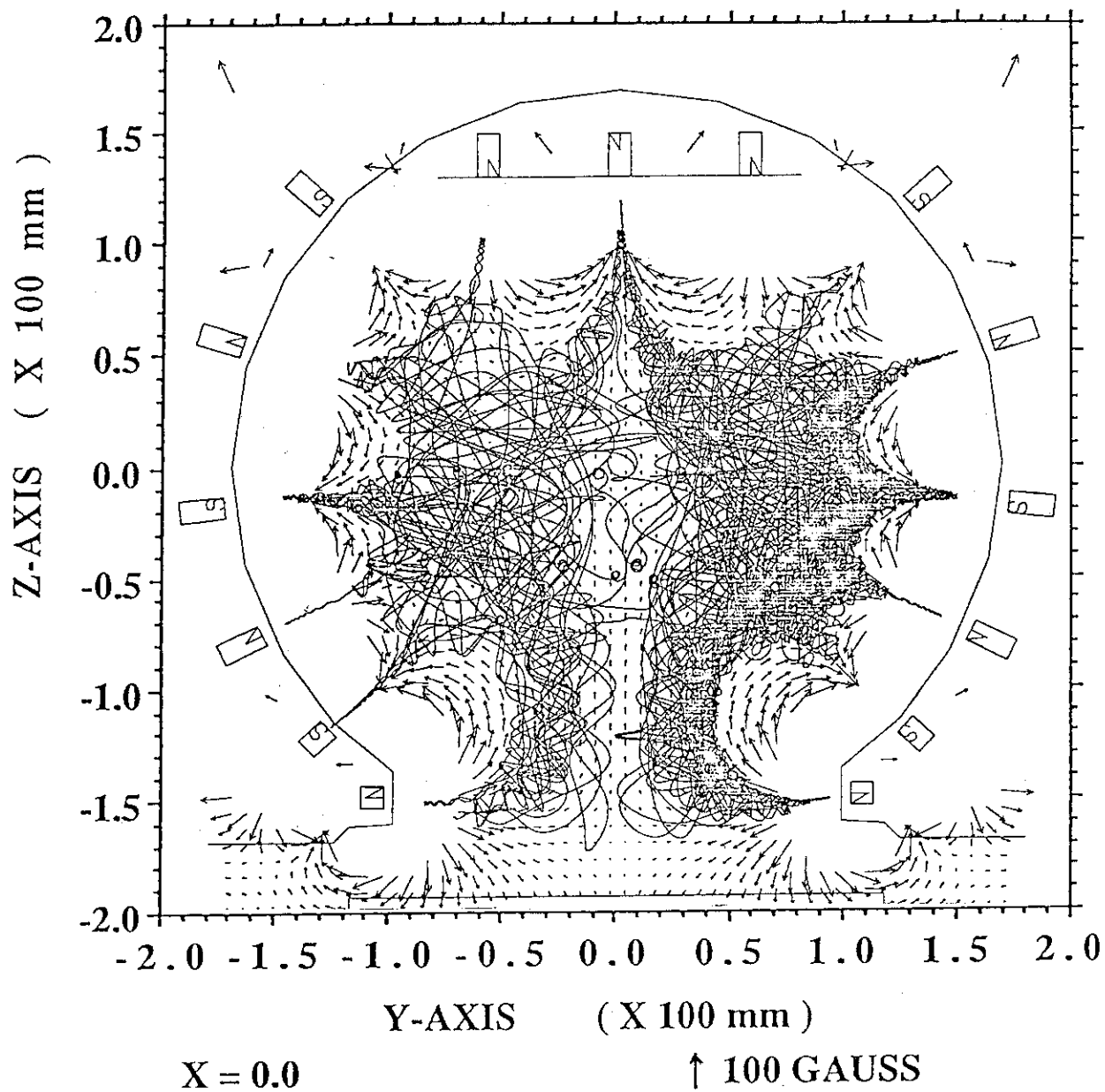
第 3.4 a 図 基本磁場配位 I でフィラメント形状 II を用いた場合の  
磁場分布と電子軌道



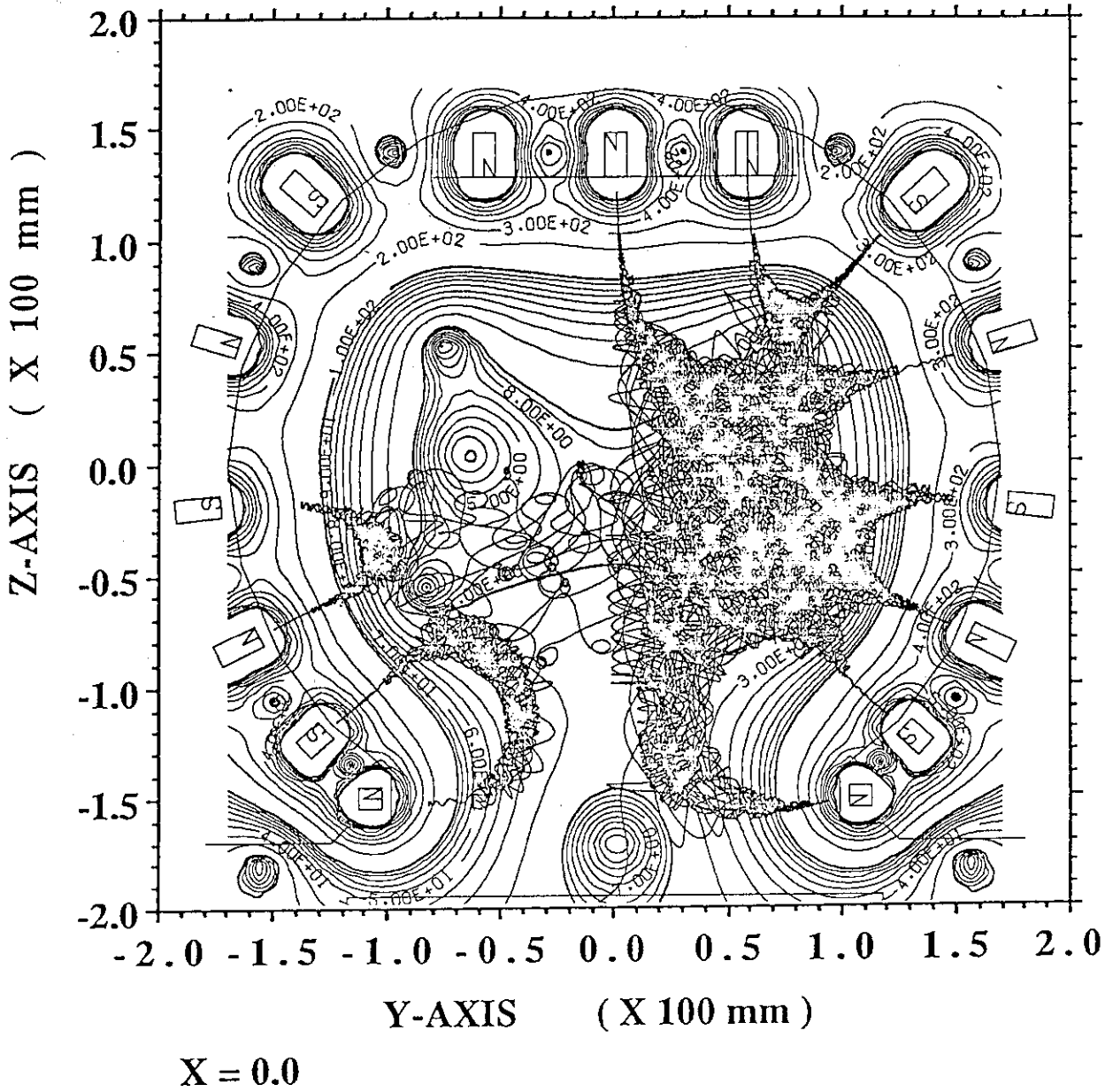
第3.4 b 図 基本磁場配位 I でフィラメント形状 II を用いた場合の  
磁場ベクトル図



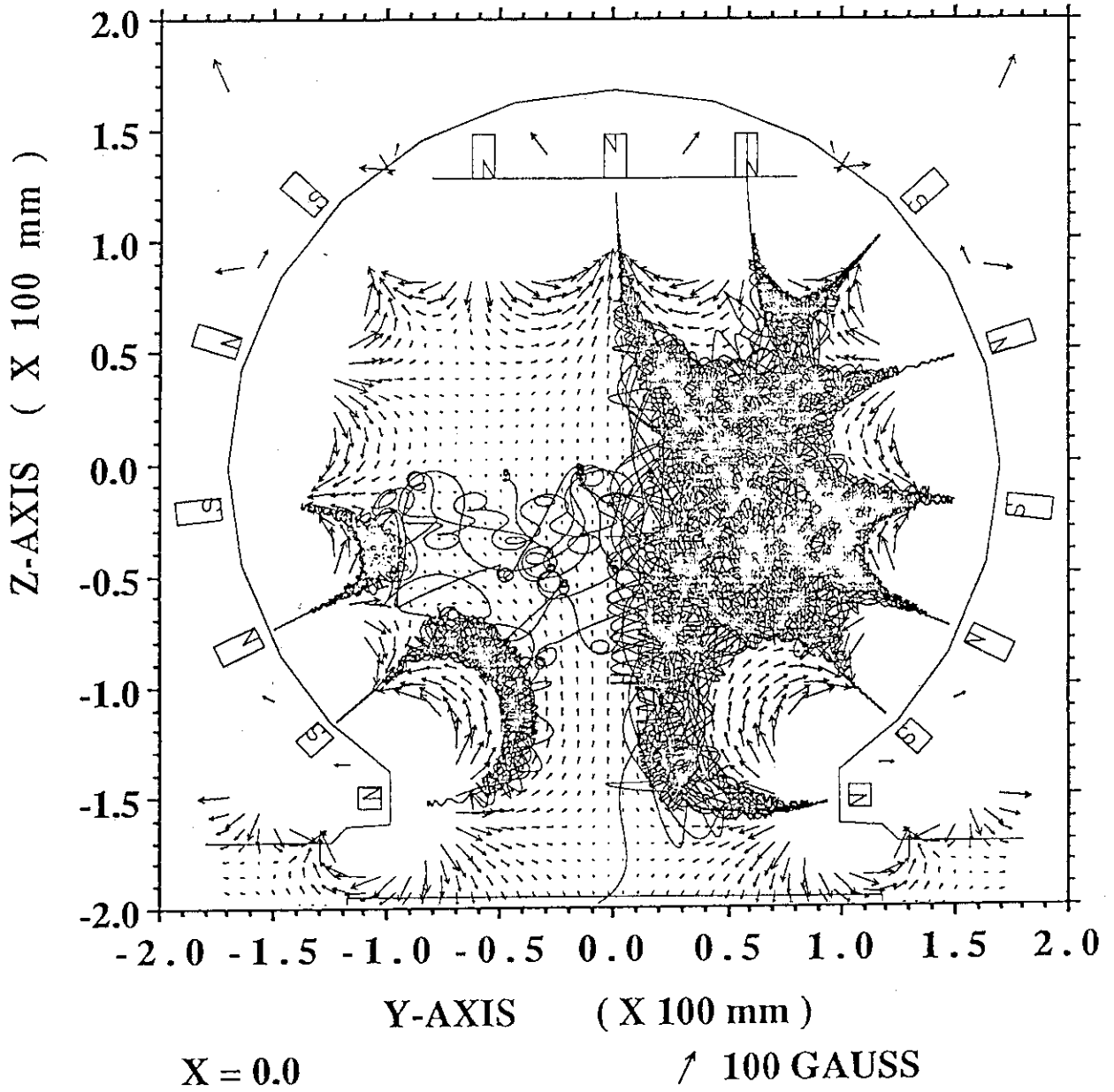
第 3.5 a 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石の高さ寸法を, それぞれ 10mm, 14mm にした場合の磁場分布と電子軌道



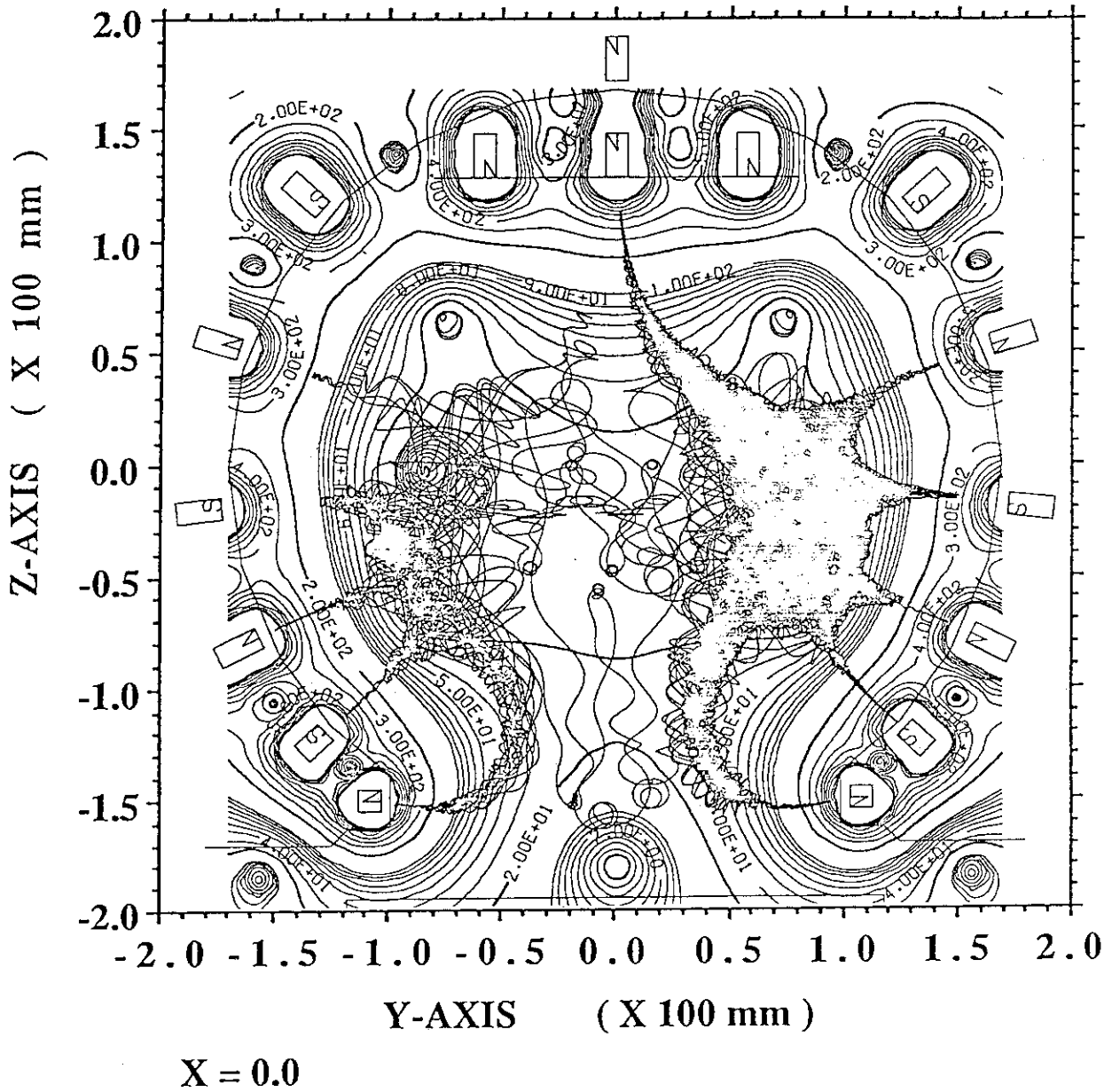
第 3.5 b 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石の高さ寸法を, それぞれ 10mm, 14mm にした場合の磁場ベクトル図



第 3.6 a 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石の高さ寸法を, それぞれ 10mm, 14mm にし, 開口部磁場強度を下げた場合で, フィラメント形状 II を用いた場合の磁場分布と電子軌道

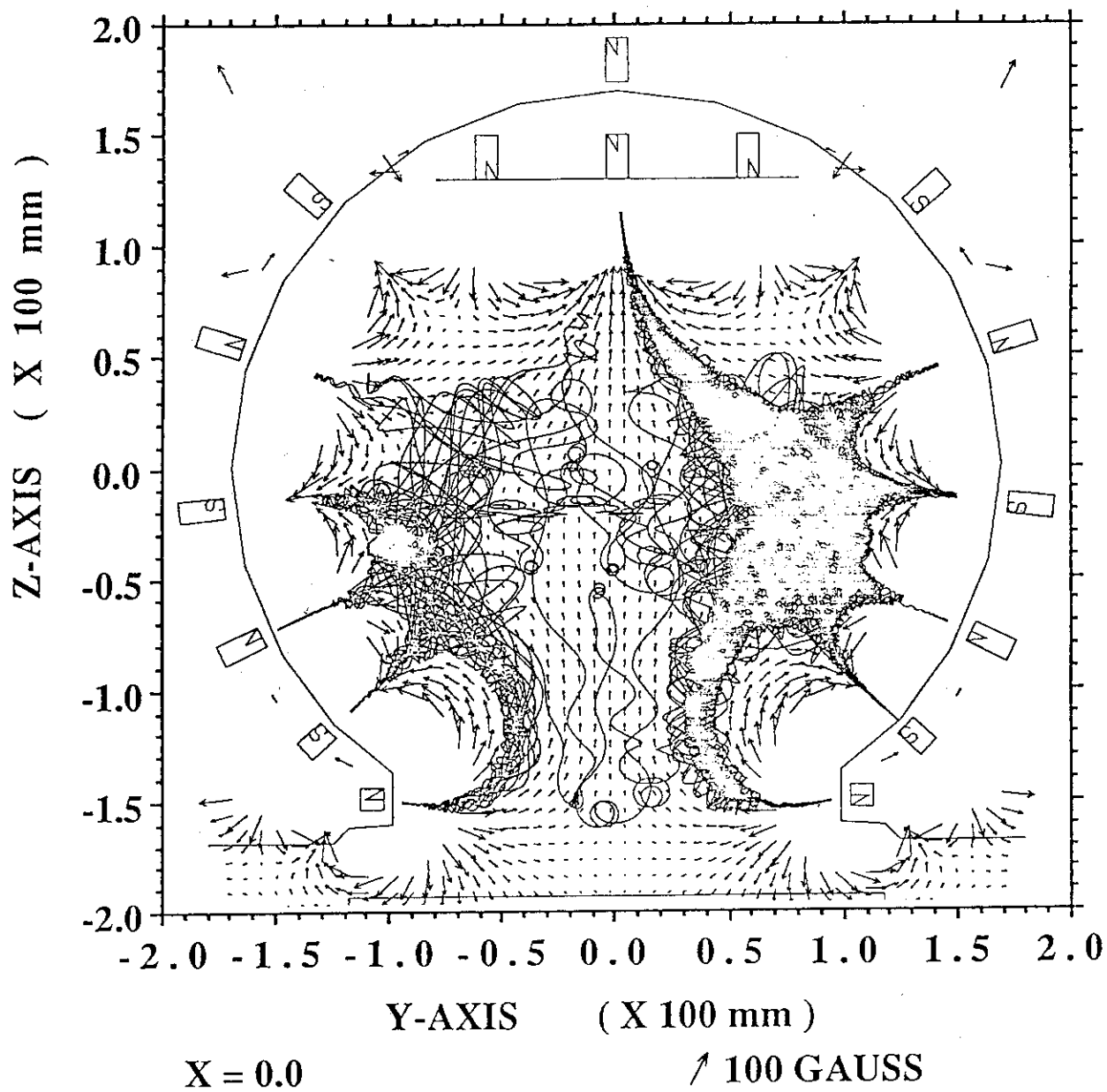


第3.6 b 図 開口部から1段目, 2段目の磁石の高さ寸法を, それぞれ10mm, 14mmにし, 開口部磁場強度を下げた場合で, フィラメント形状IIを用いた場合の磁場ベクトル図

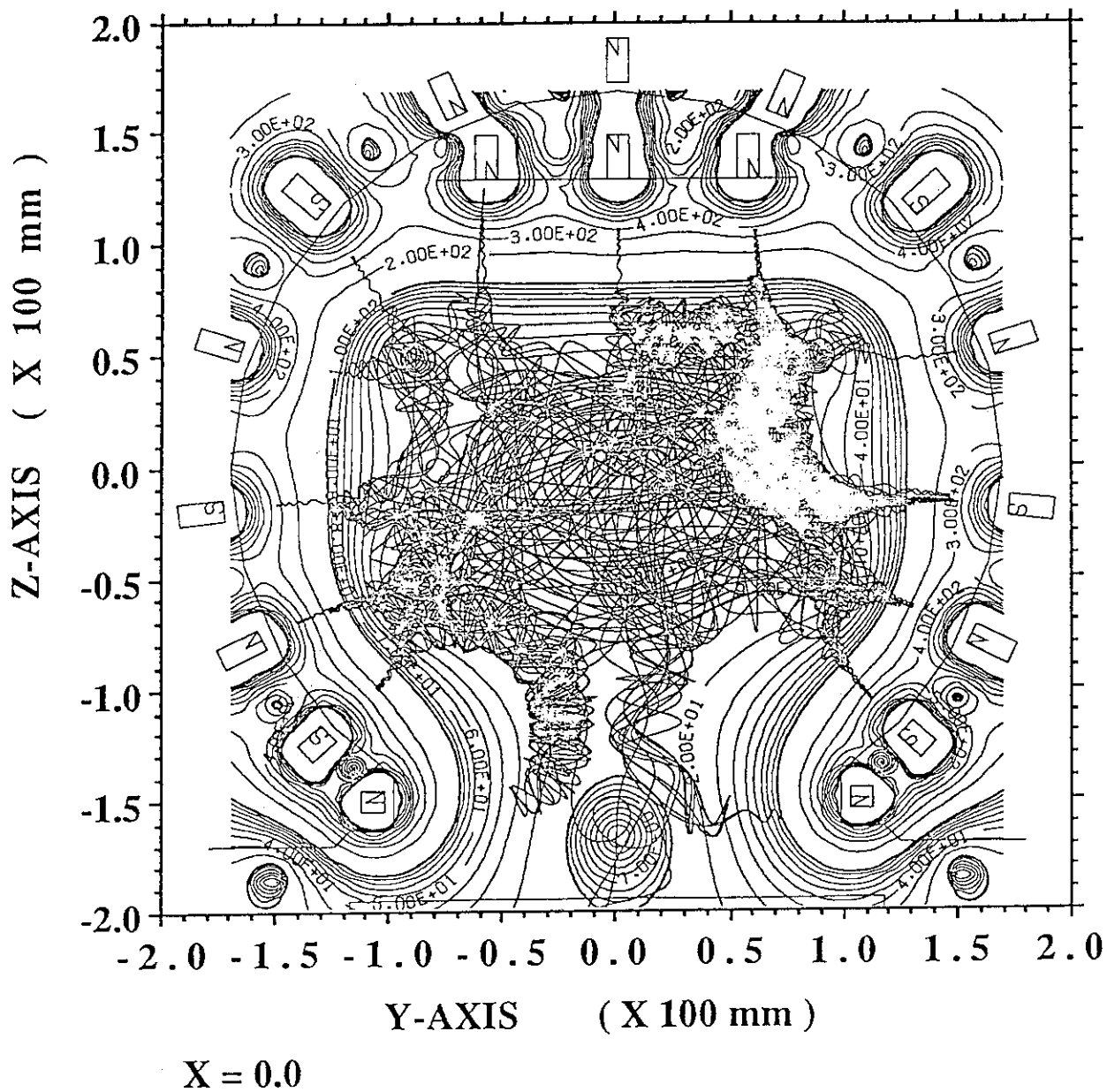


第 3.7 a 図 基本磁場配位 II ( 開口部磁場強度を下げ頂上部に磁石を 1 列追加 )  
でフィラメント形状 II の場合の磁場分布と電子軌道

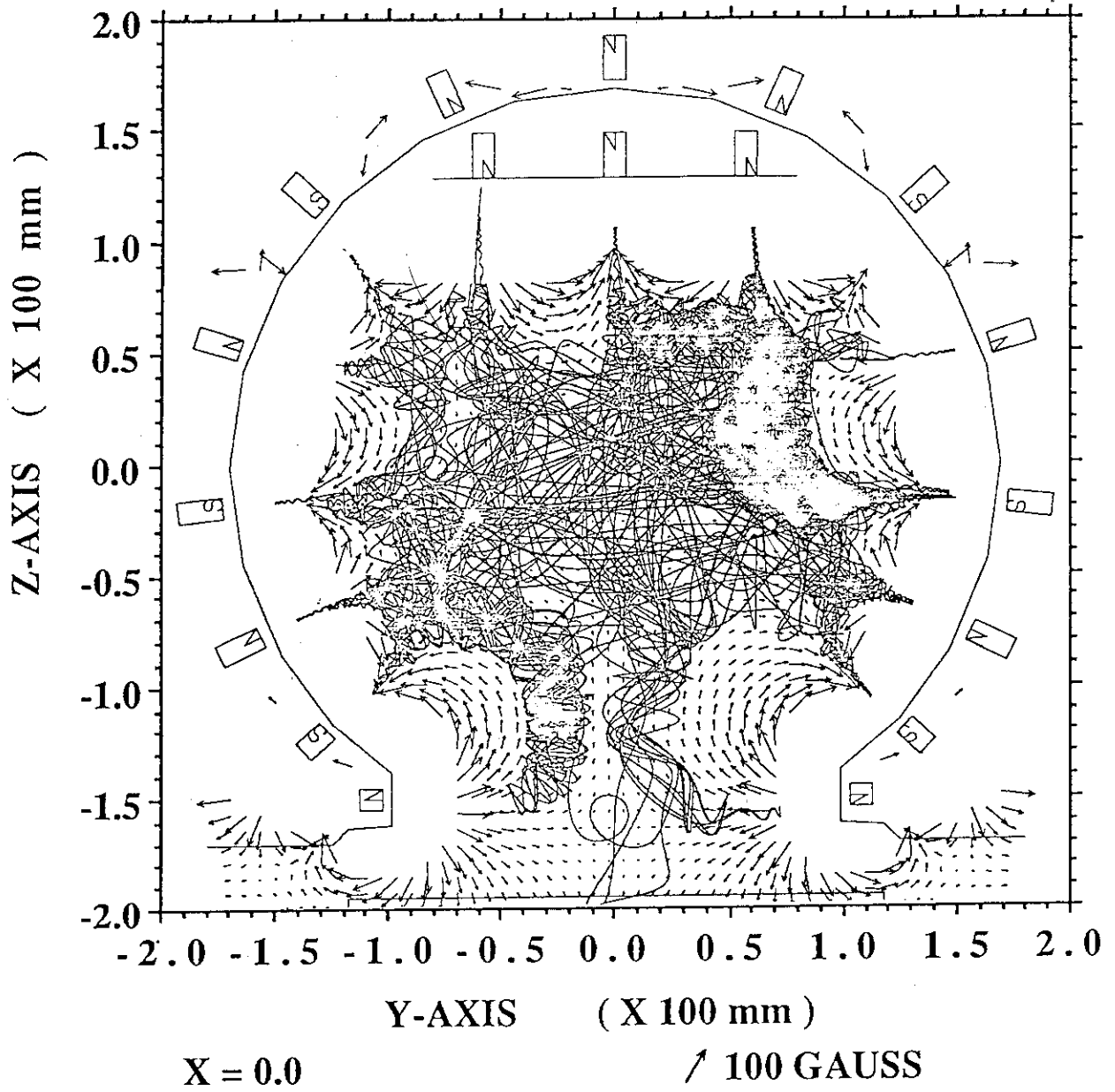




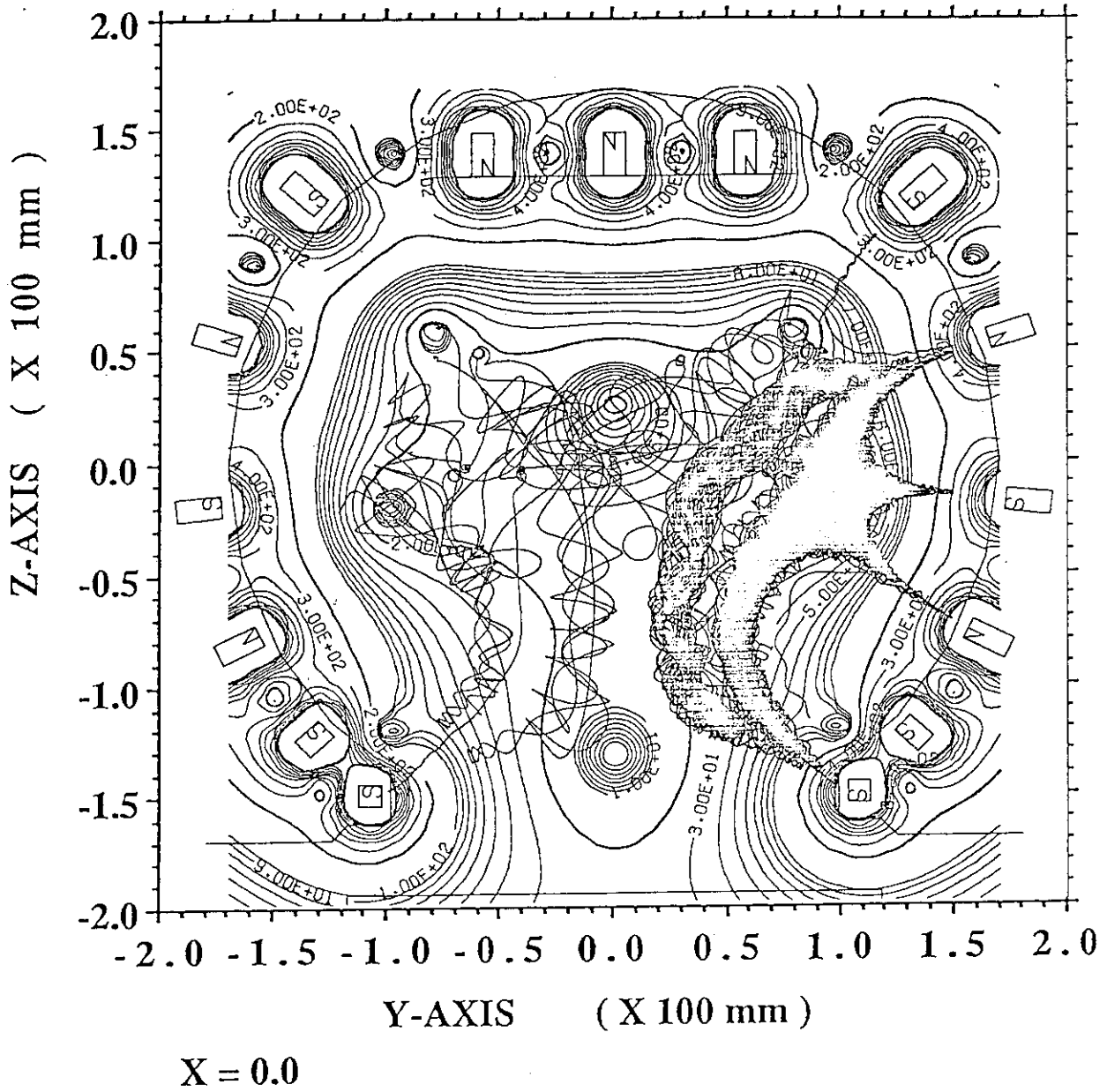
第 3.7 b 図 基本磁場配位 II での磁場ベクトル図



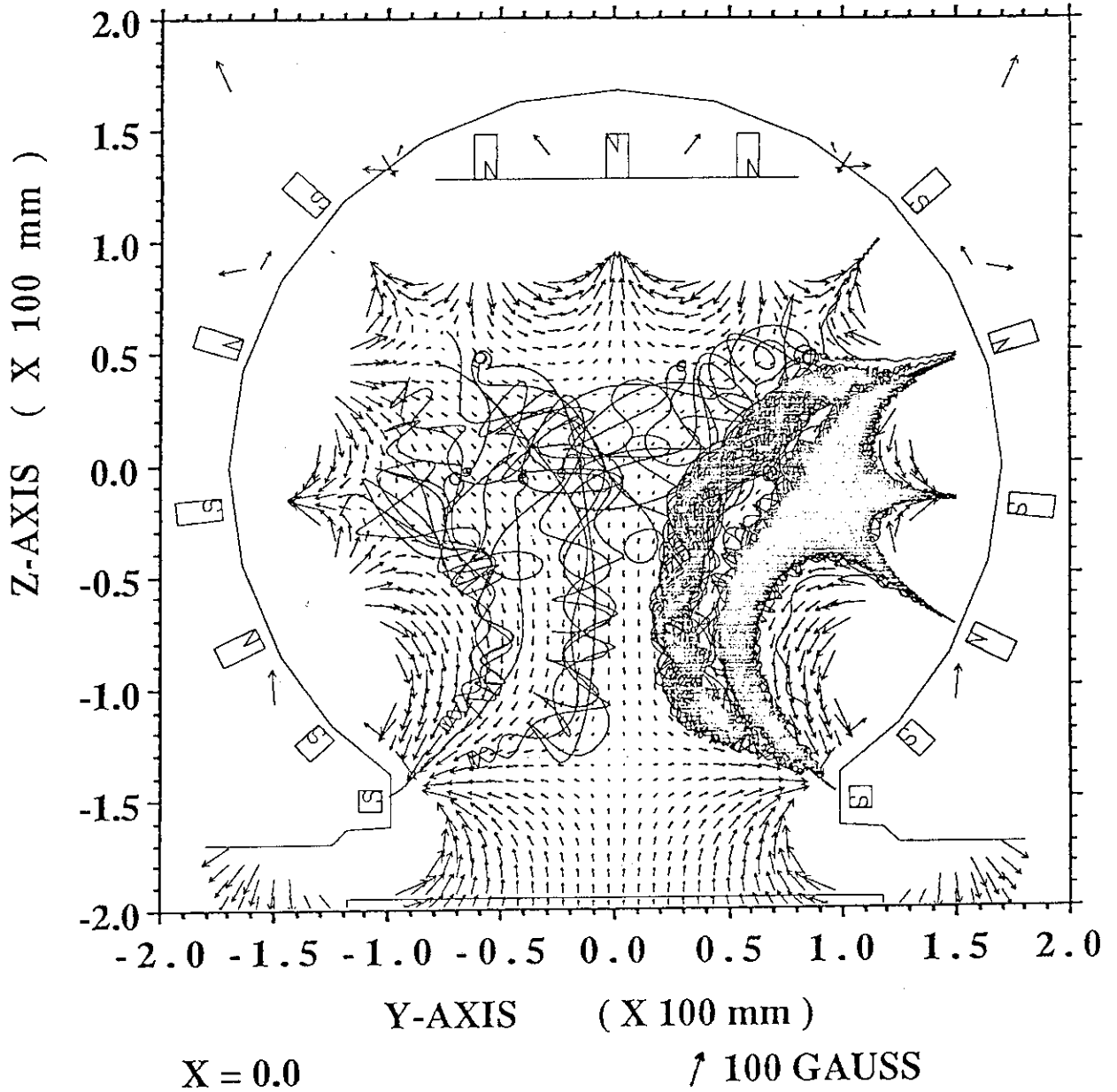
第 3.8 a 図 開口部磁場強度を下げ頂上部に磁石を 3 列追加した場合の  
磁場分布と電子軌道



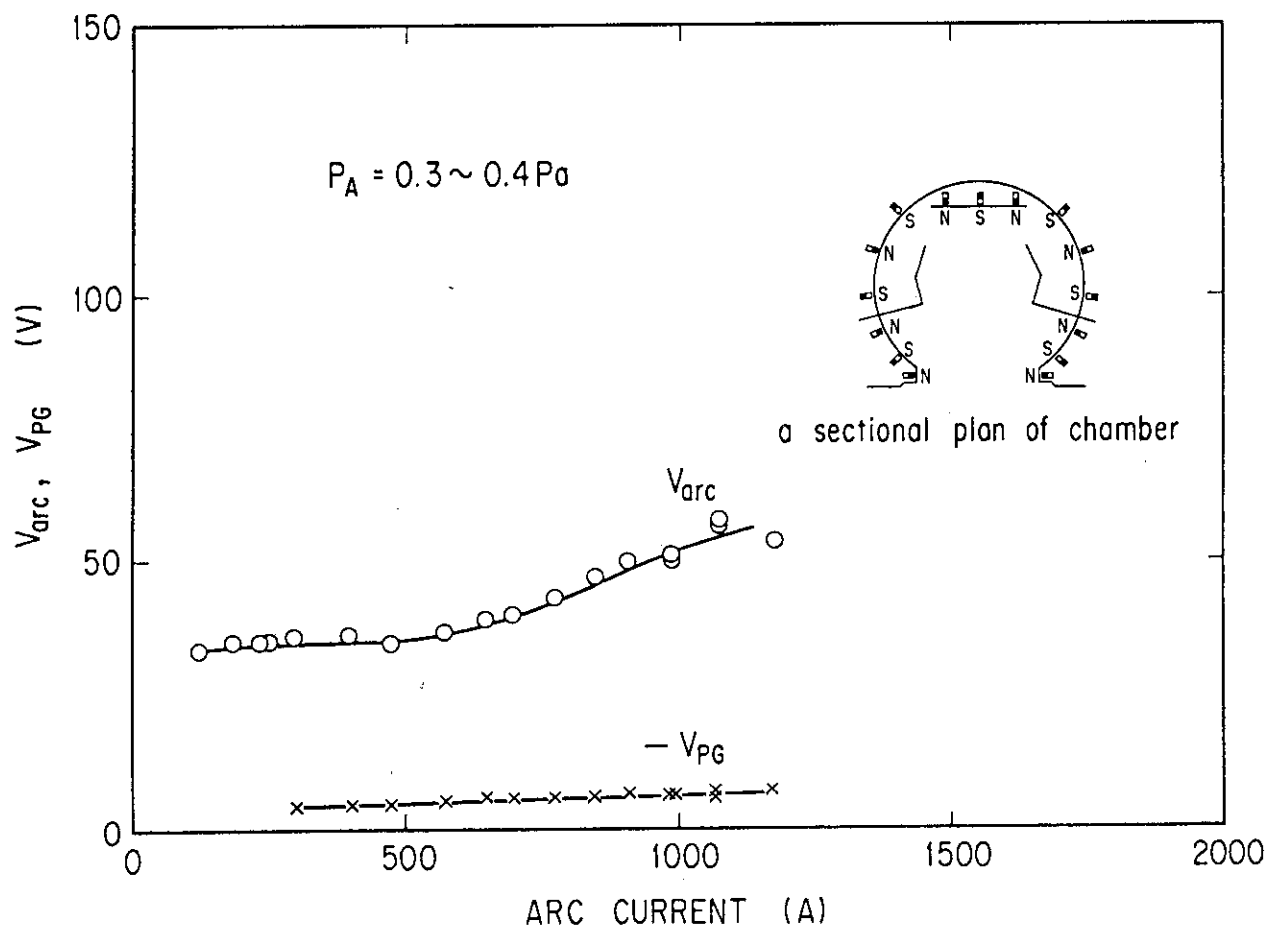
第 3.8 b 図 開口部磁場強度を下げ頂上部に磁石を 3 列追加した場合の  
磁場ベクトル図



第 3.9 a 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石を同極性にした場合で, フィラメント形状 I を用いた場合の磁場分布と電子軌道

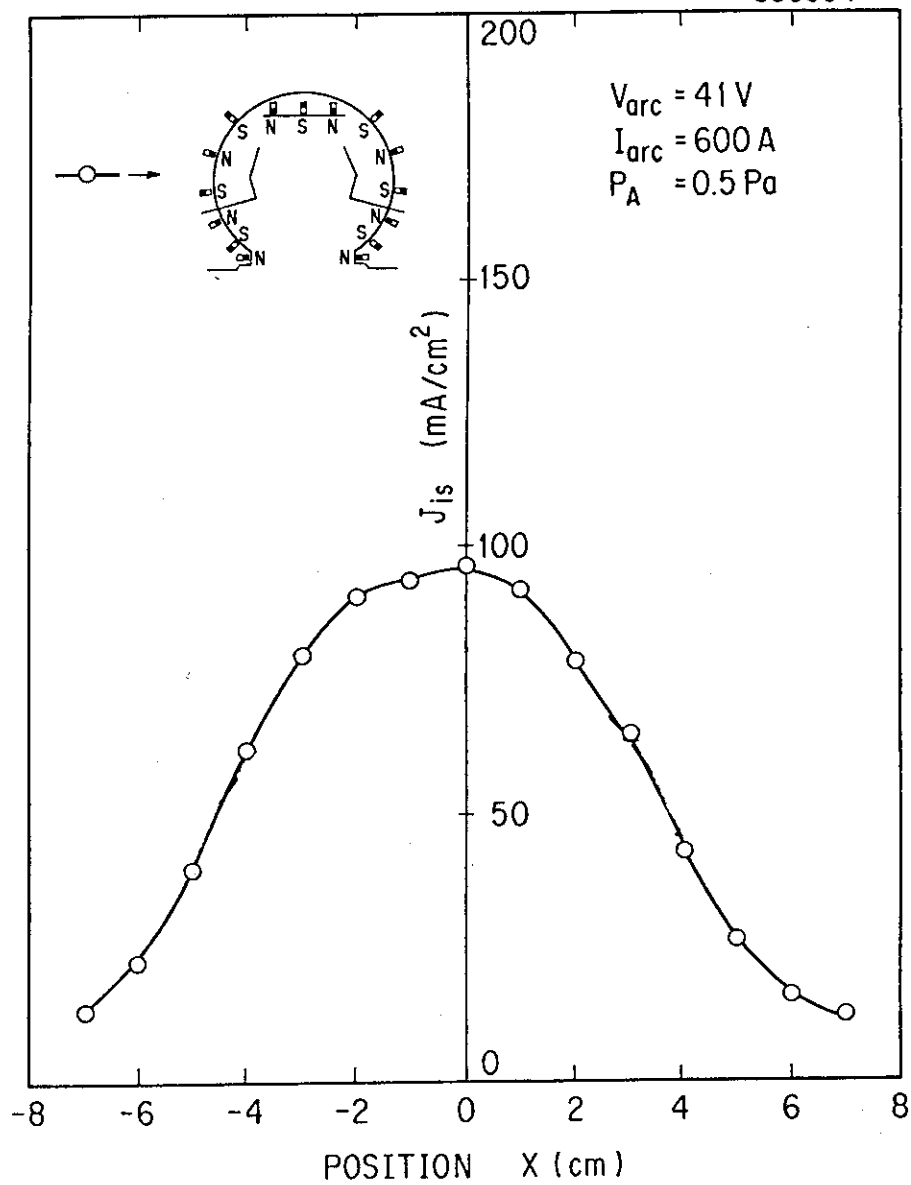


第3.9 b 図 開口部から1段目, 2段目の磁石を同極性にした場合で, フィラメント形状 I を用いた場合の磁場ベクトル図



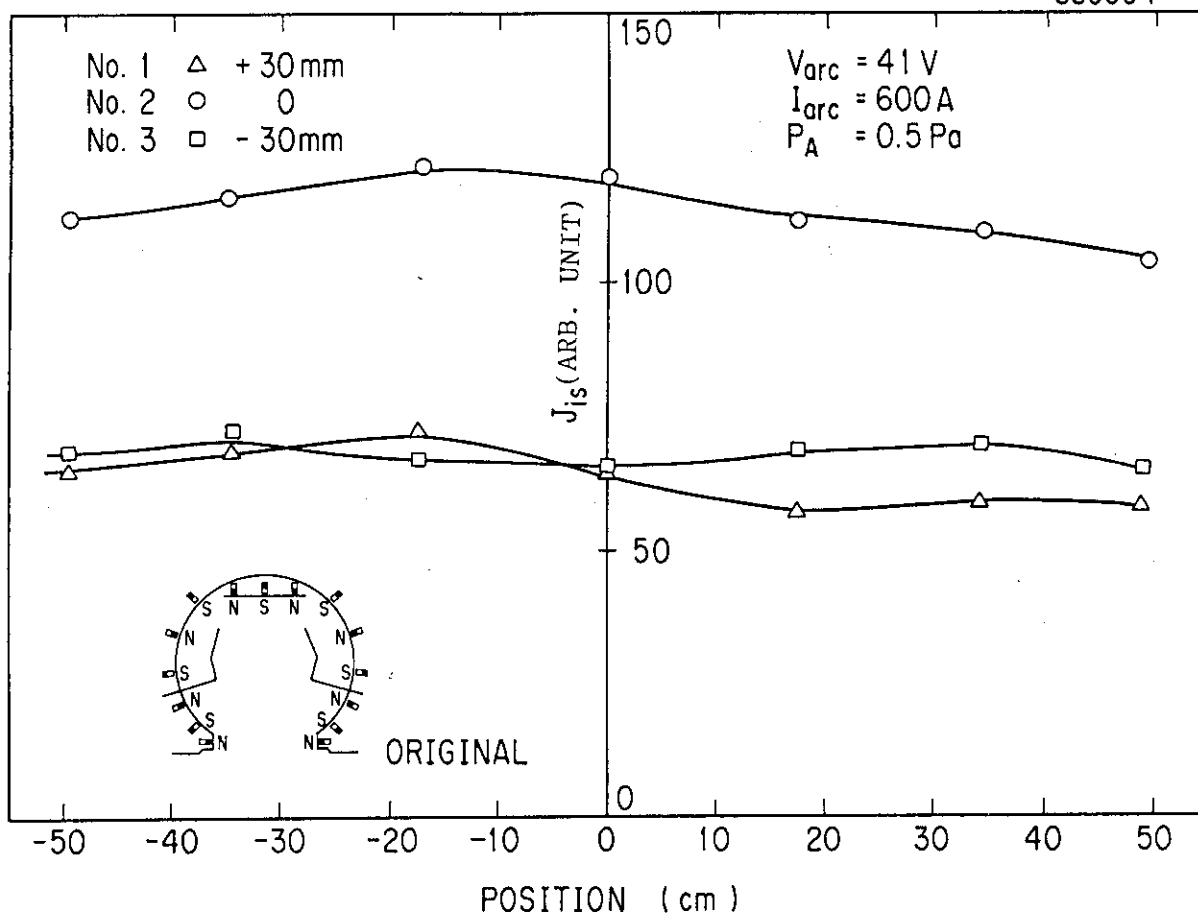
第 4.1 a 図 基本磁場配位 I でのアーク放電特性

880304



第 4.1 b 図 基本磁場配位 I での開口部短手方向のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

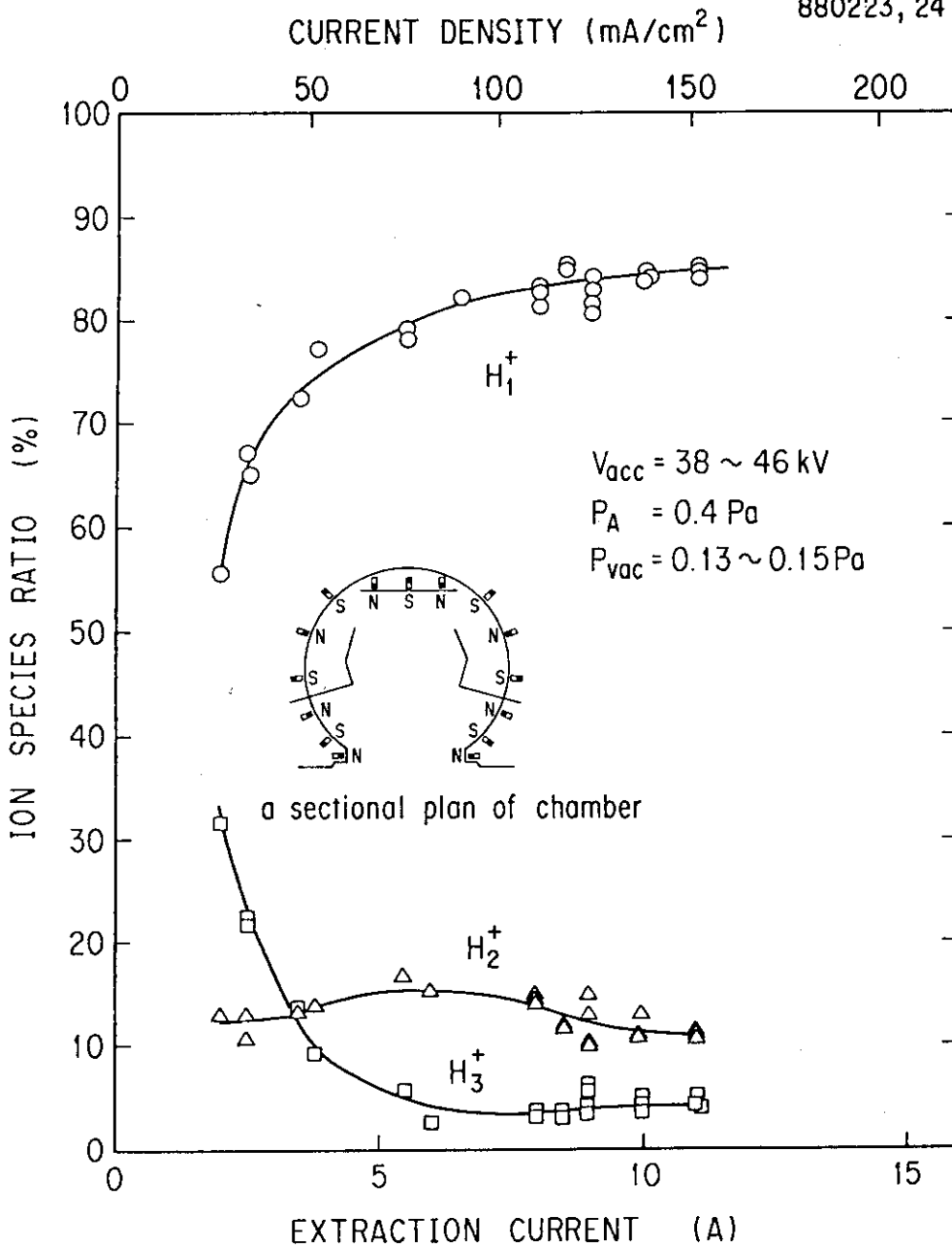
880304



第 4.1 c 図 基本磁場配位 I での開口部長手方向のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

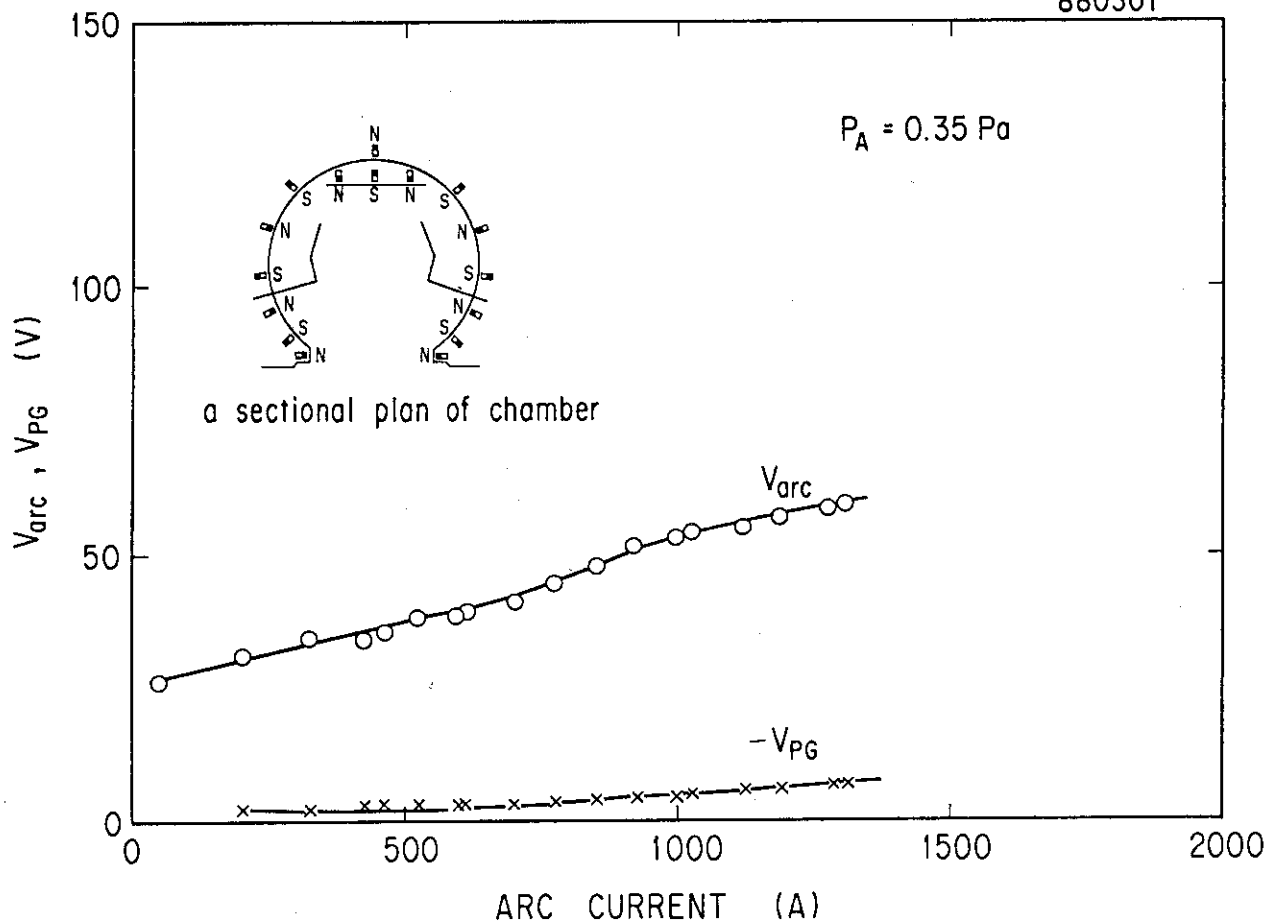


880223, 24



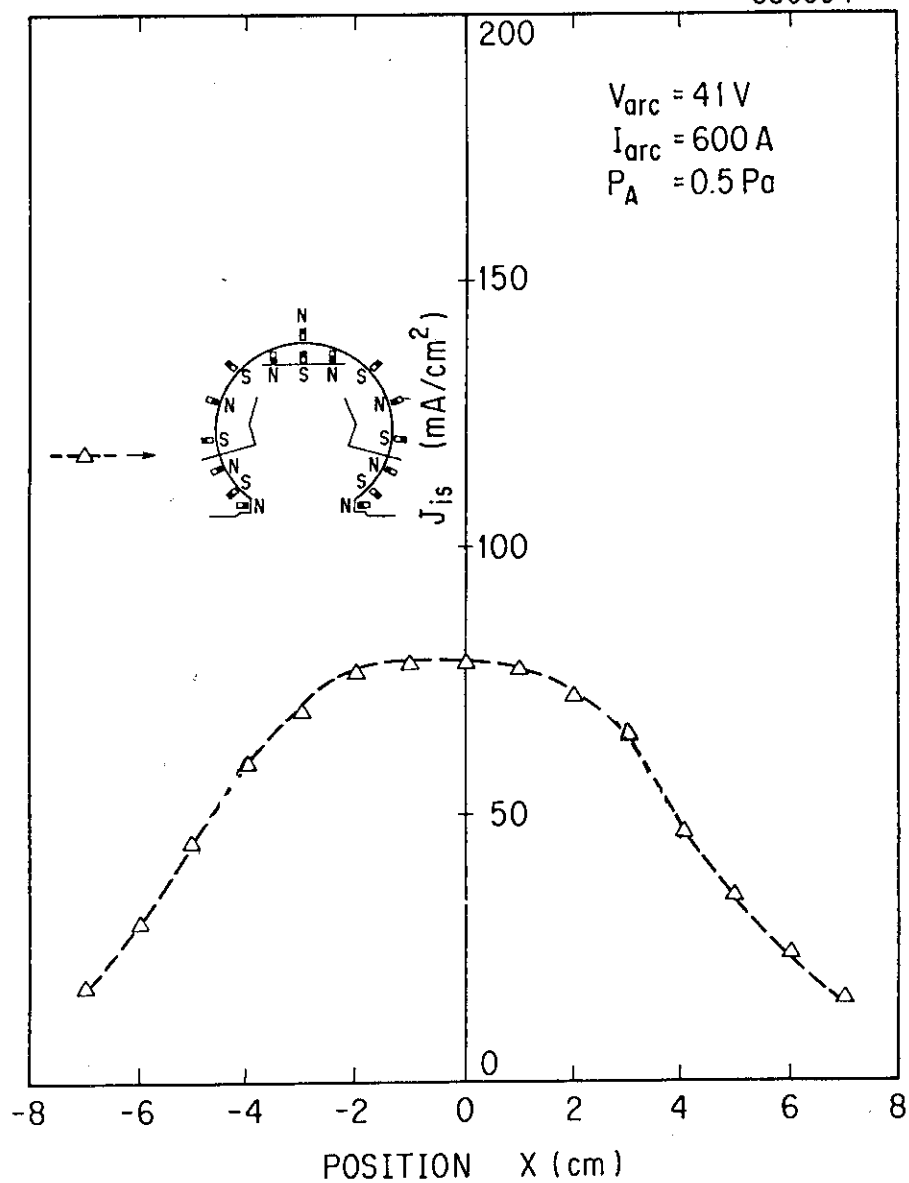
第 4.1 d 図 基本磁場配位 I でのイオン組成化

880301



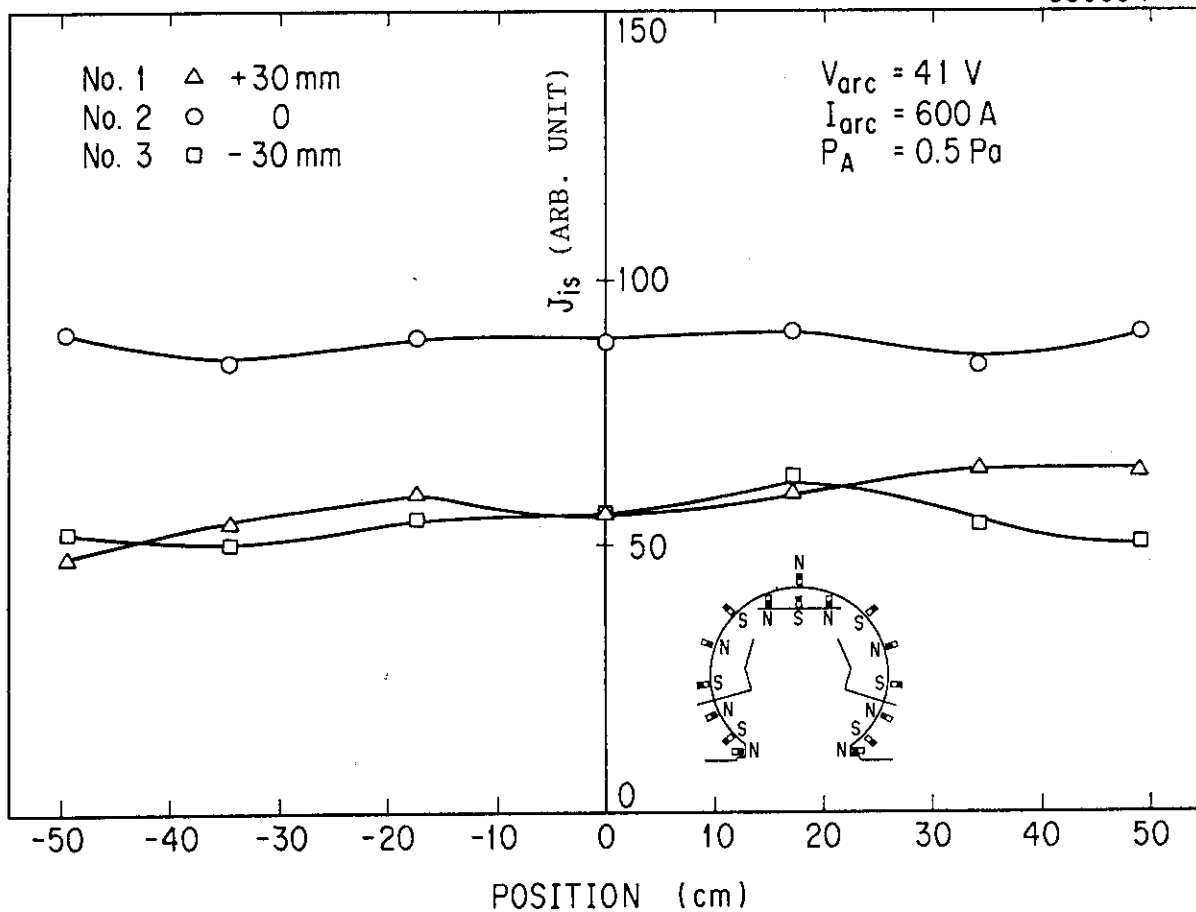
第 4.2 a 図 頂上部に磁石を 1 列追加した場合のアーク放電特性

880304



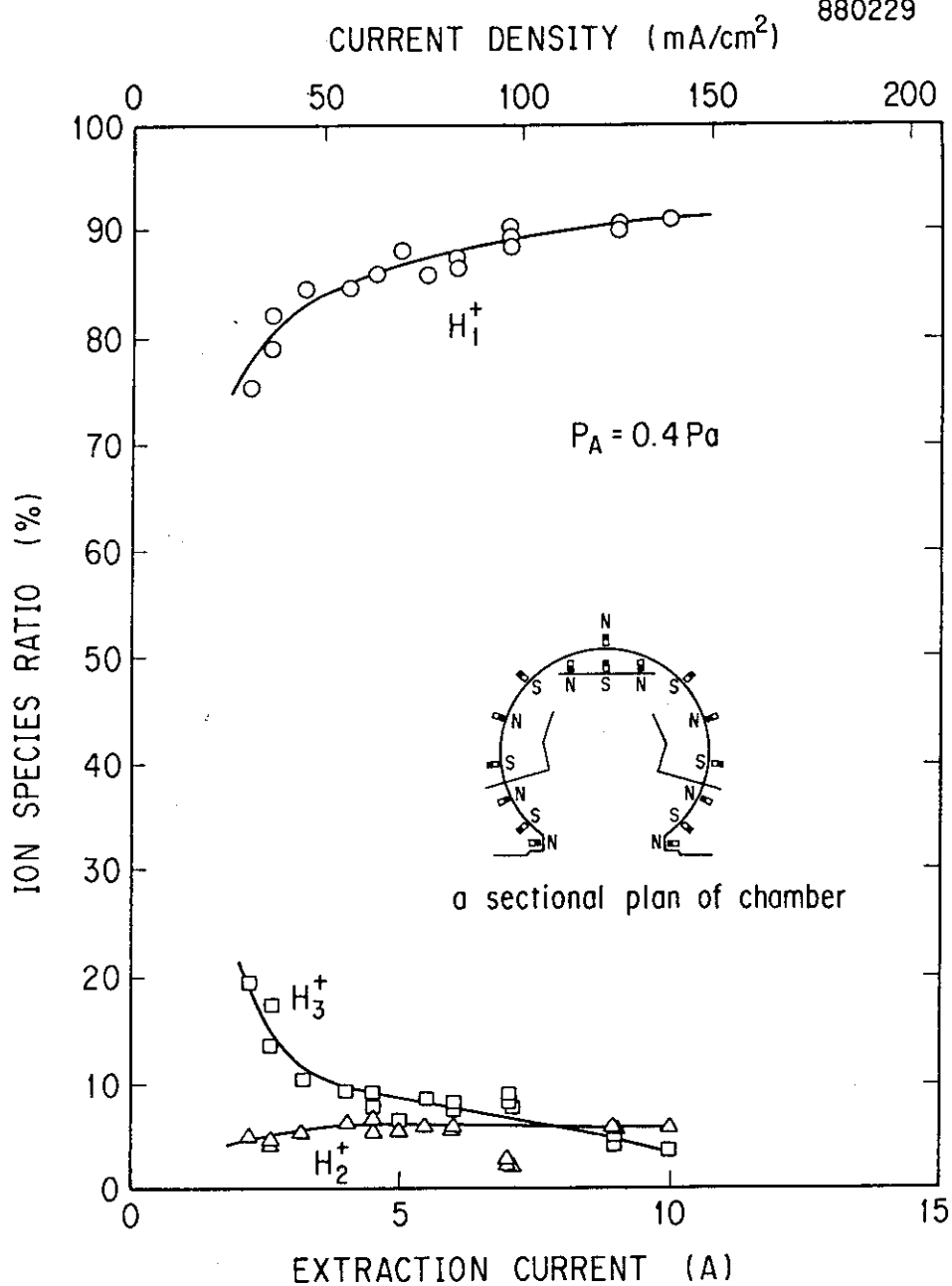
第 4.2 b 図 頂上部に磁石を 1 列追加した場合の短手方向イオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

880304

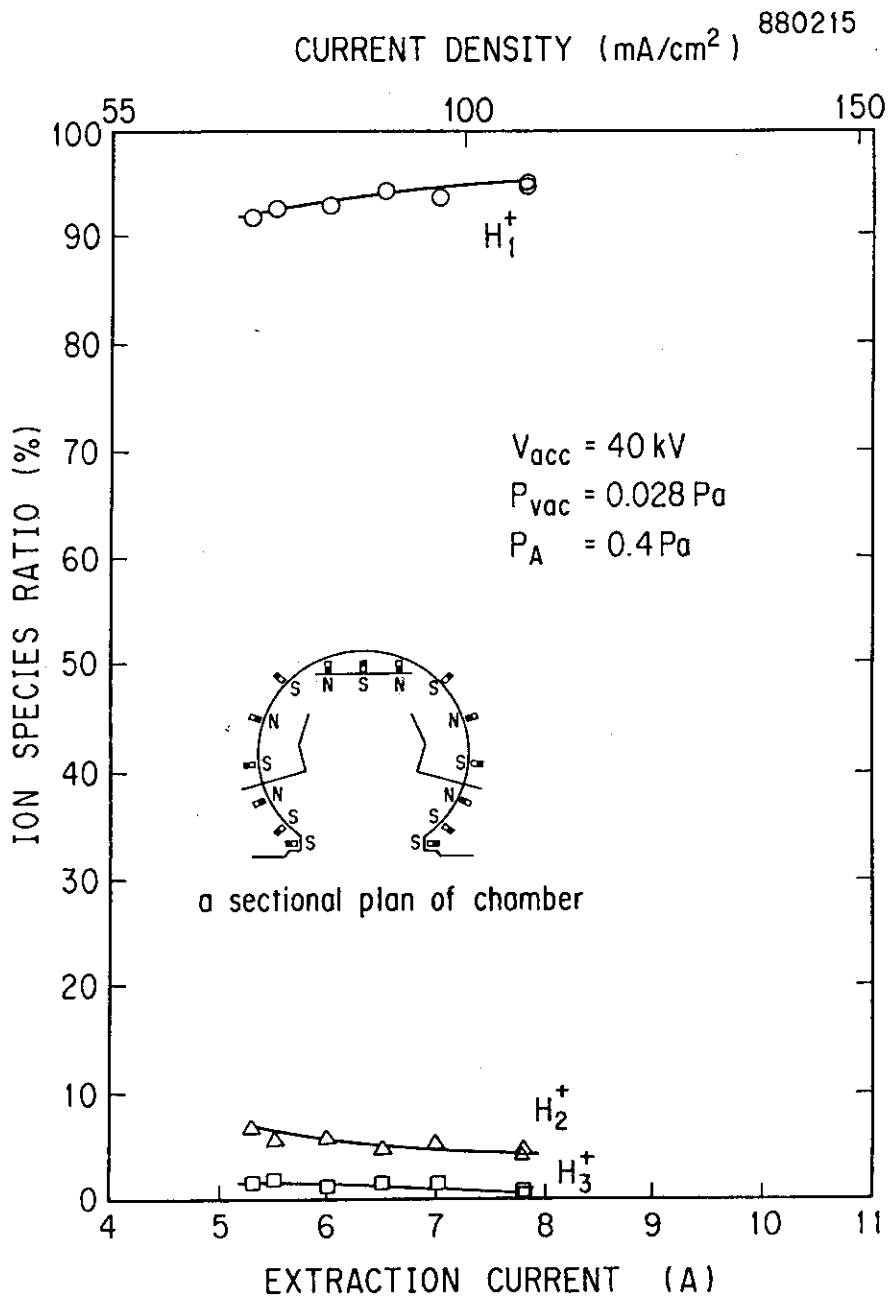


第 4.2 c 図 頂上部に磁石を 1 列追加した場合の長手方向イオン飽和電流密度 (J<sub>is</sub>) 分布

880229

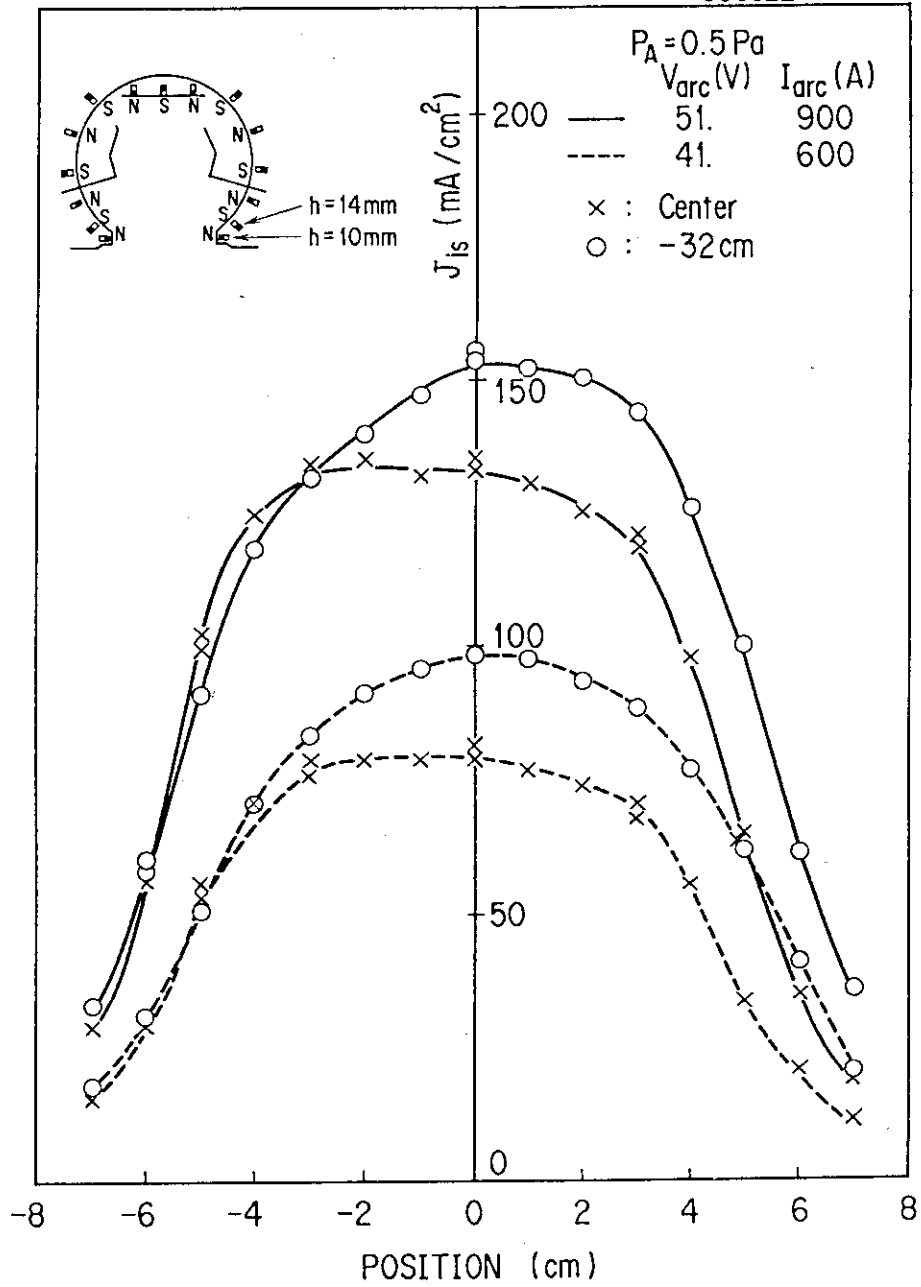


第 4.2 d 図 頂上部に磁石を 1 列追加した場合のイオン組成比



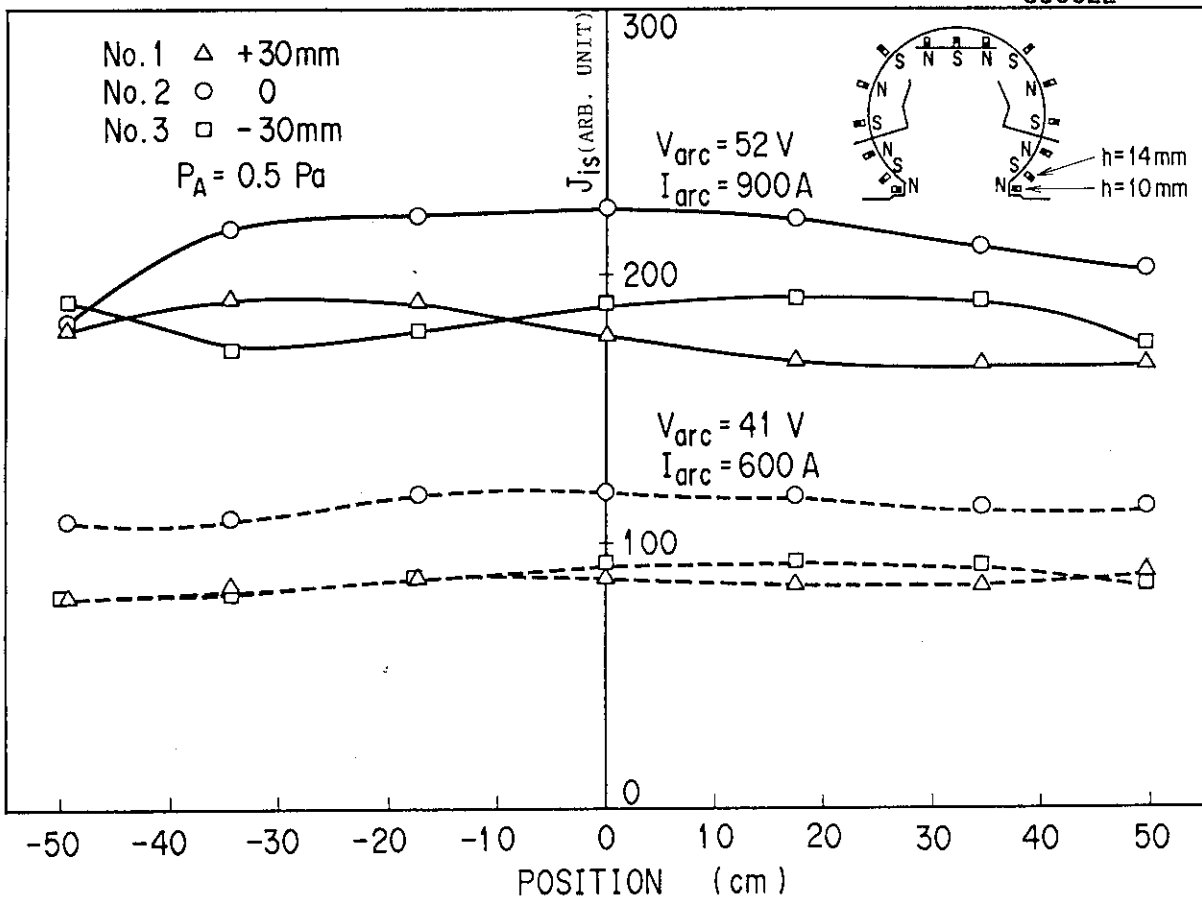
第 4.3 図 開口部から 1, 2 段目の磁石を同極性にした場合のイオン組成比

880322



第 4.4 a 図 開口部から 1 段目, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm にした時の短手方向のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

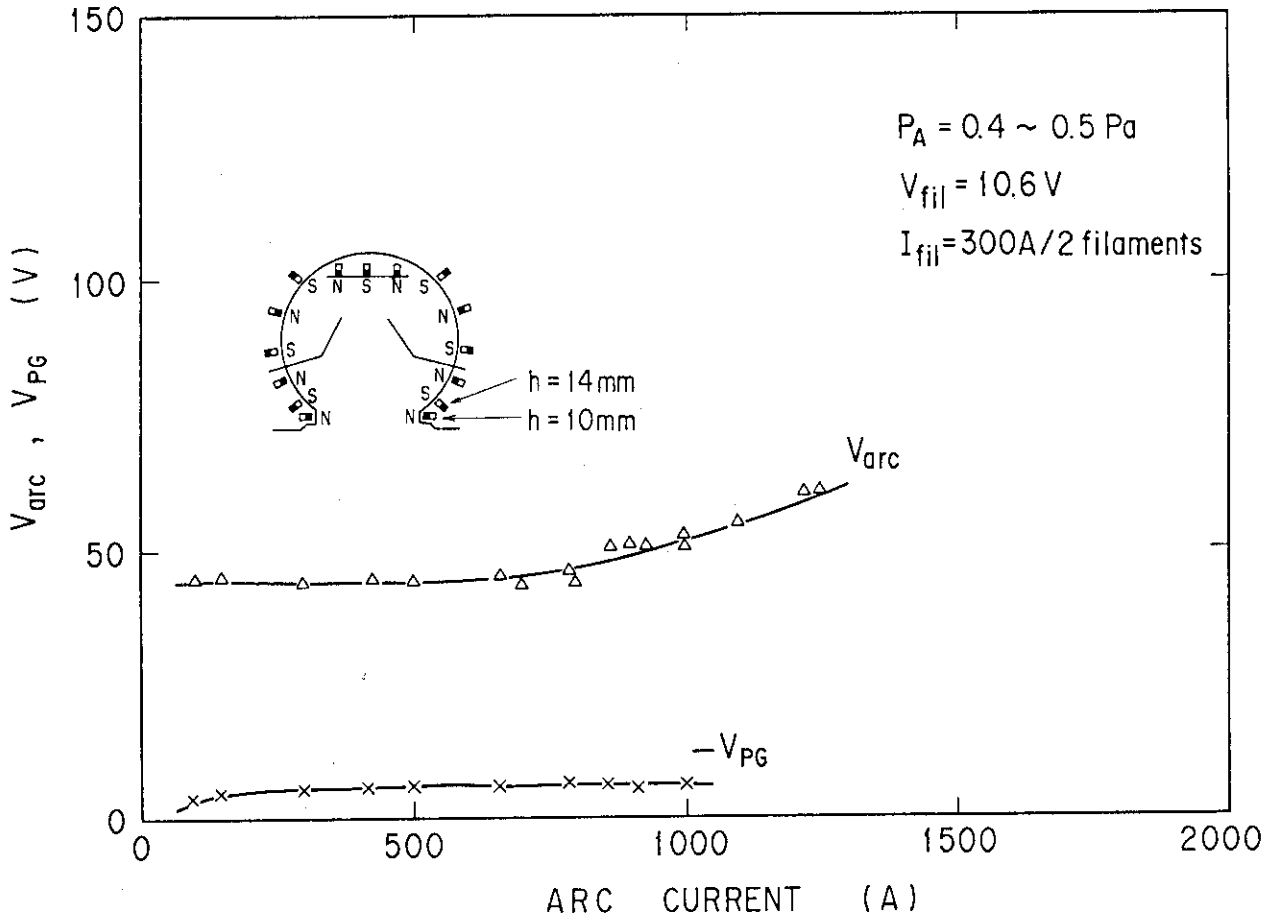
880322



第4.4b図 開口部から1段目, 2段目の磁石寸法をそれぞれ10mm, 14mmにした時の長手方向のイオン飽和電流密度( $J_{\text{is}}$ )分布

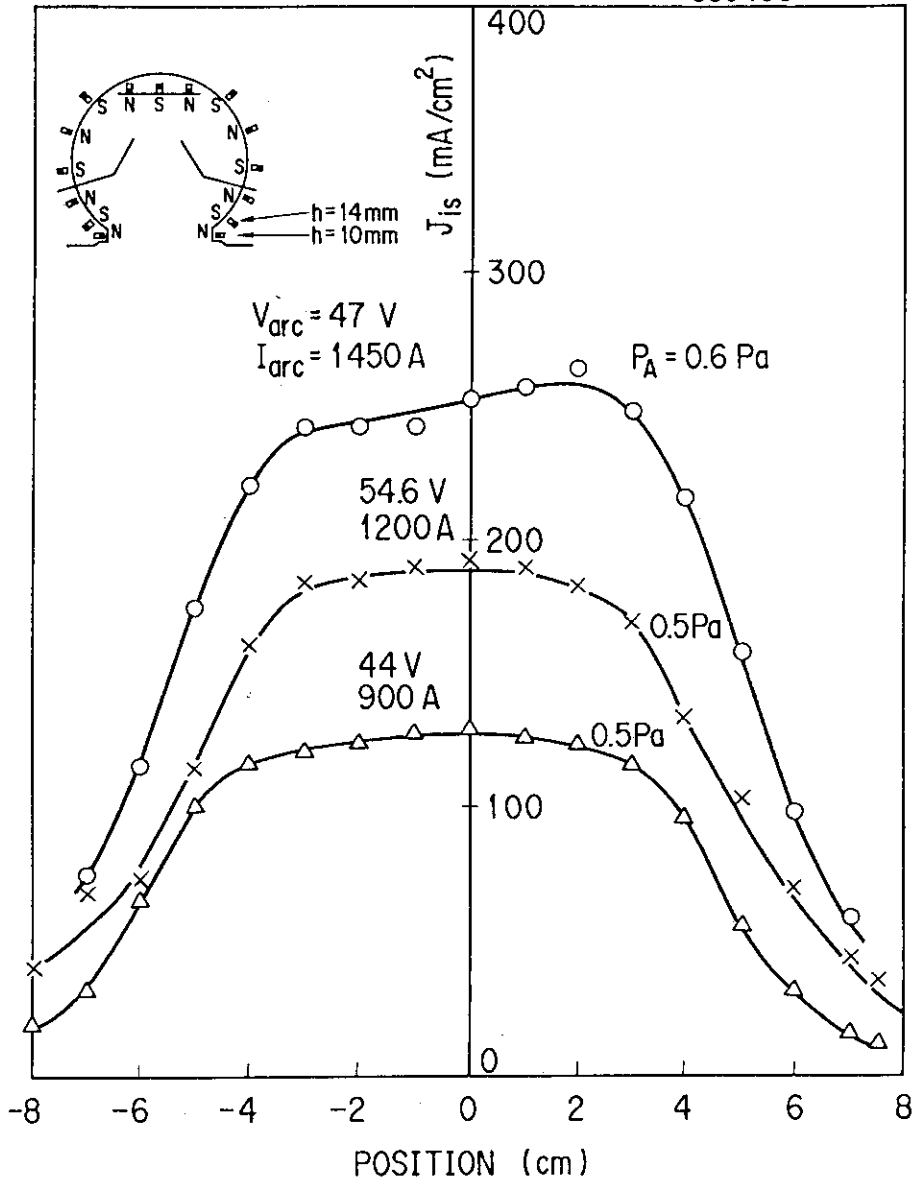


881012/881014



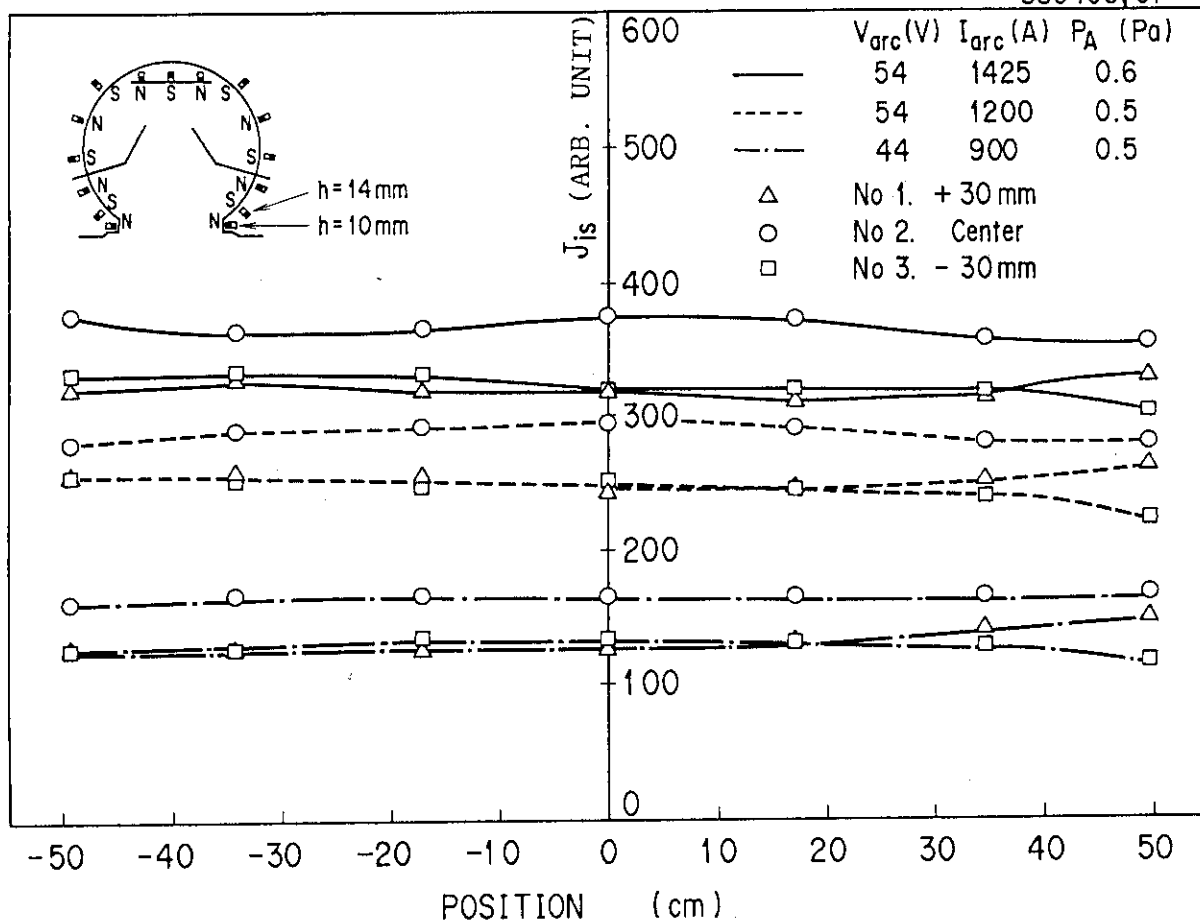
第 4.5 a 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm にし, フィラメント形状 II を用いた場合のアーク放電特性

880406



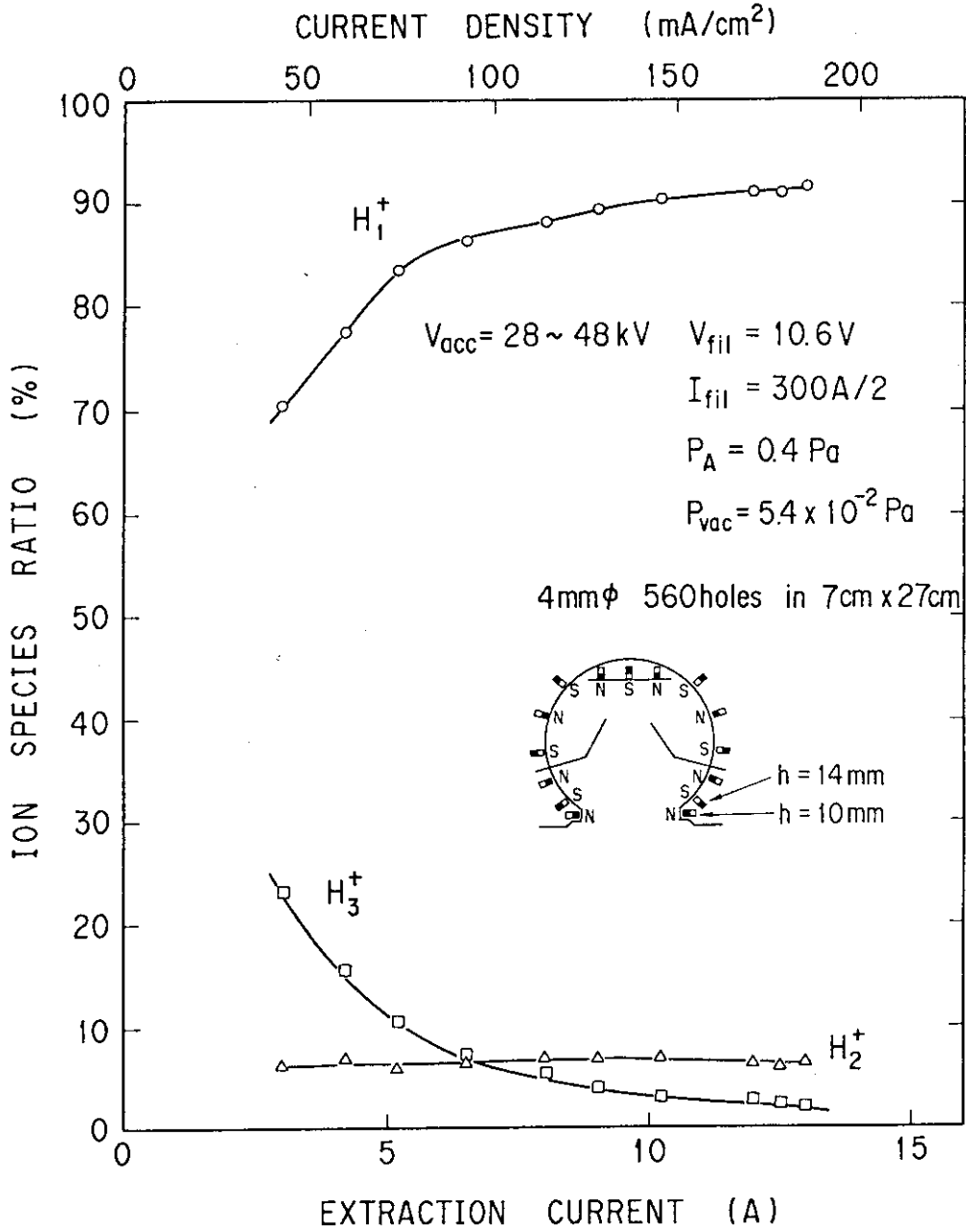
第 4.5 b 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm にし, フィラメント形状 II を用いた場合の短手方向イオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布.

880406,07

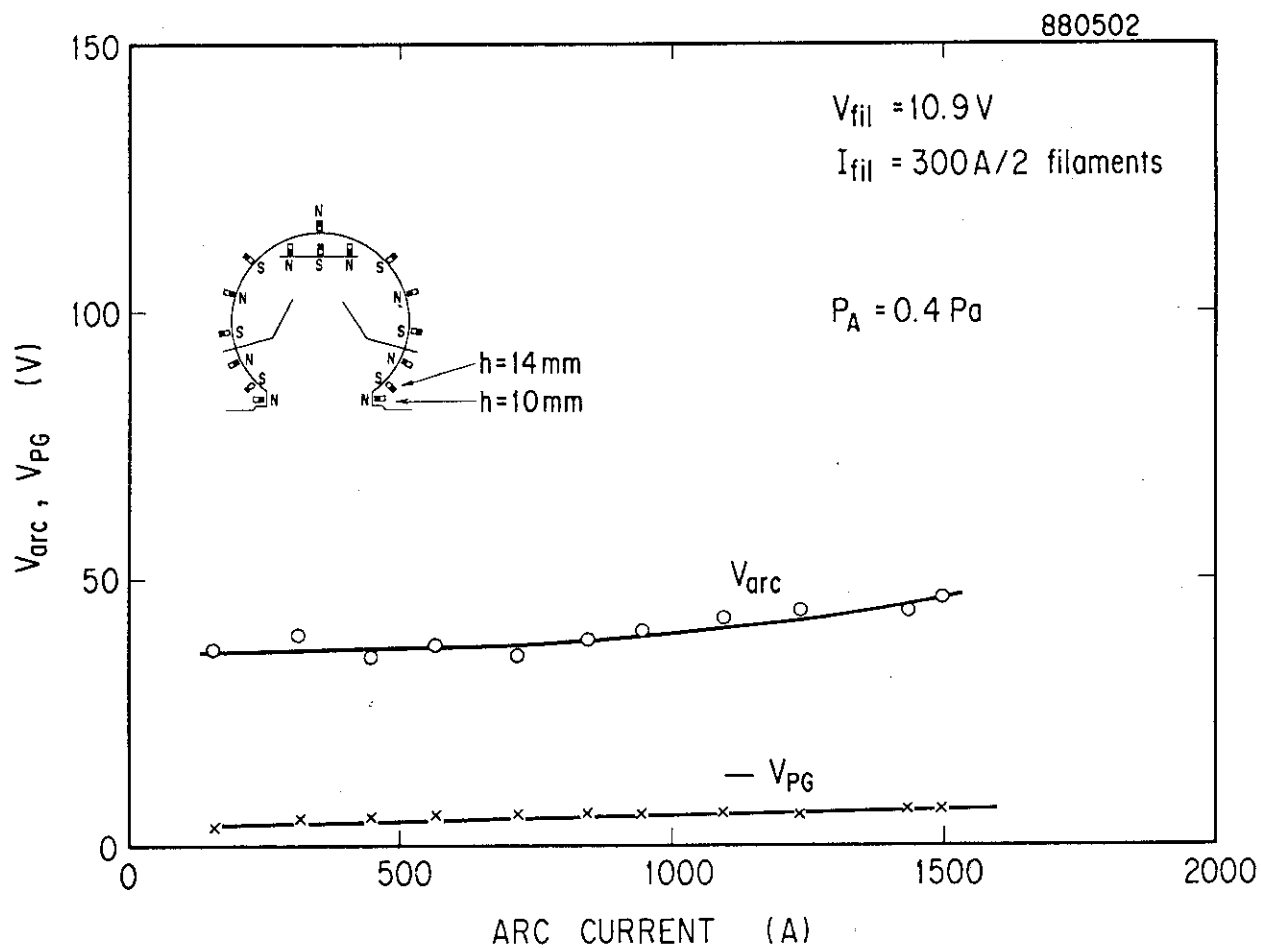


第 4.5 c 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm にし, フィラメント形状 II を用いた場合の長手方向イオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

881014

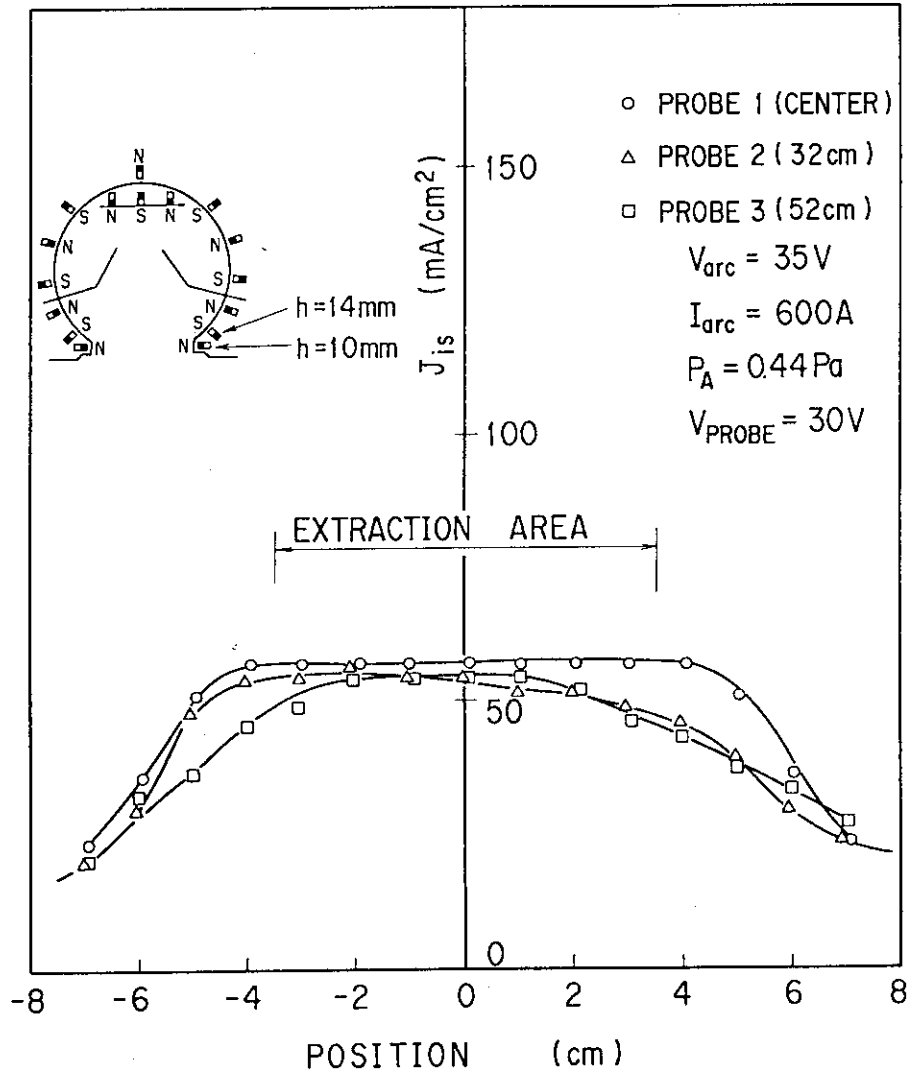


第 4.5 d 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm にし, フィラメント形状 II を用いた場合のイオン組成比



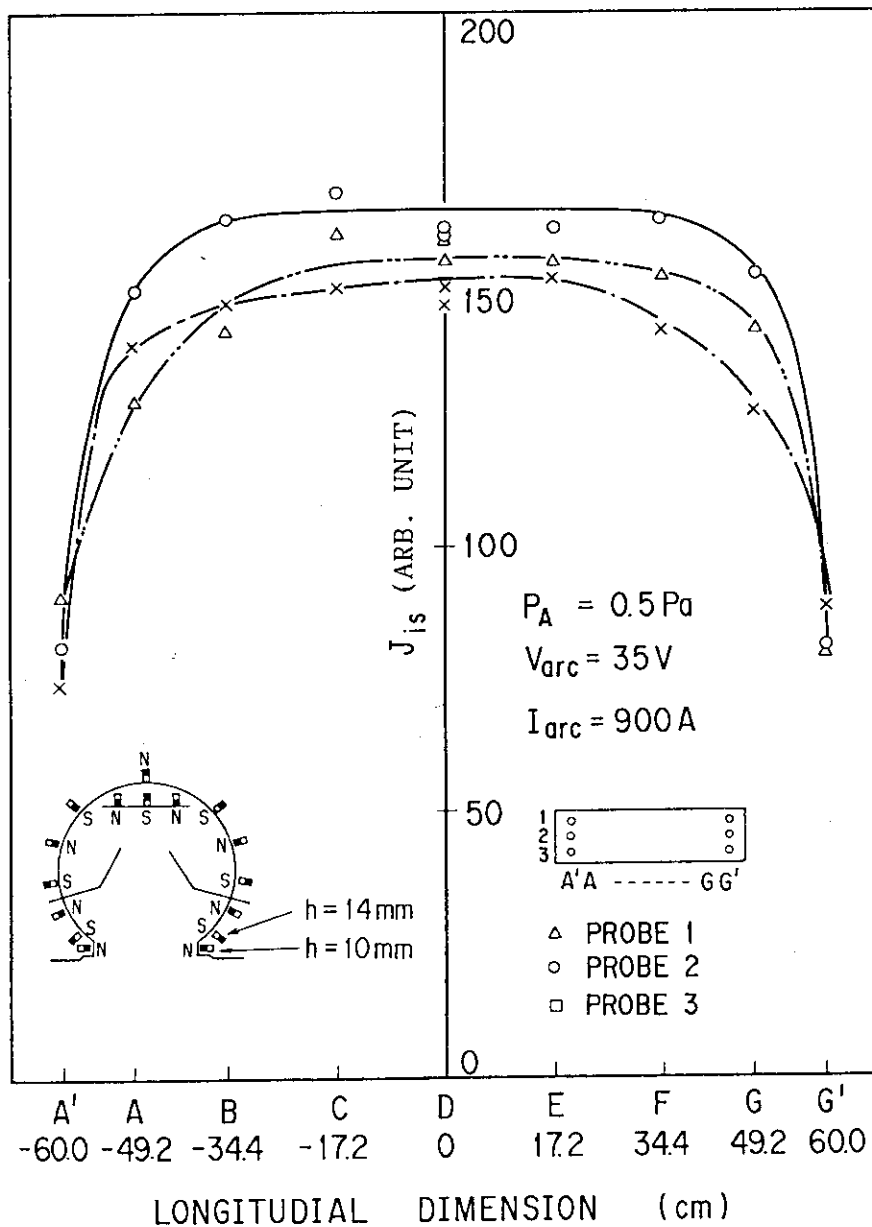
第 4.6 a 図 基本磁場配位 II (頂上部に磁石を一系列追加し、フィラメント形状 II を用いた場合) のアーク放電特性

881024



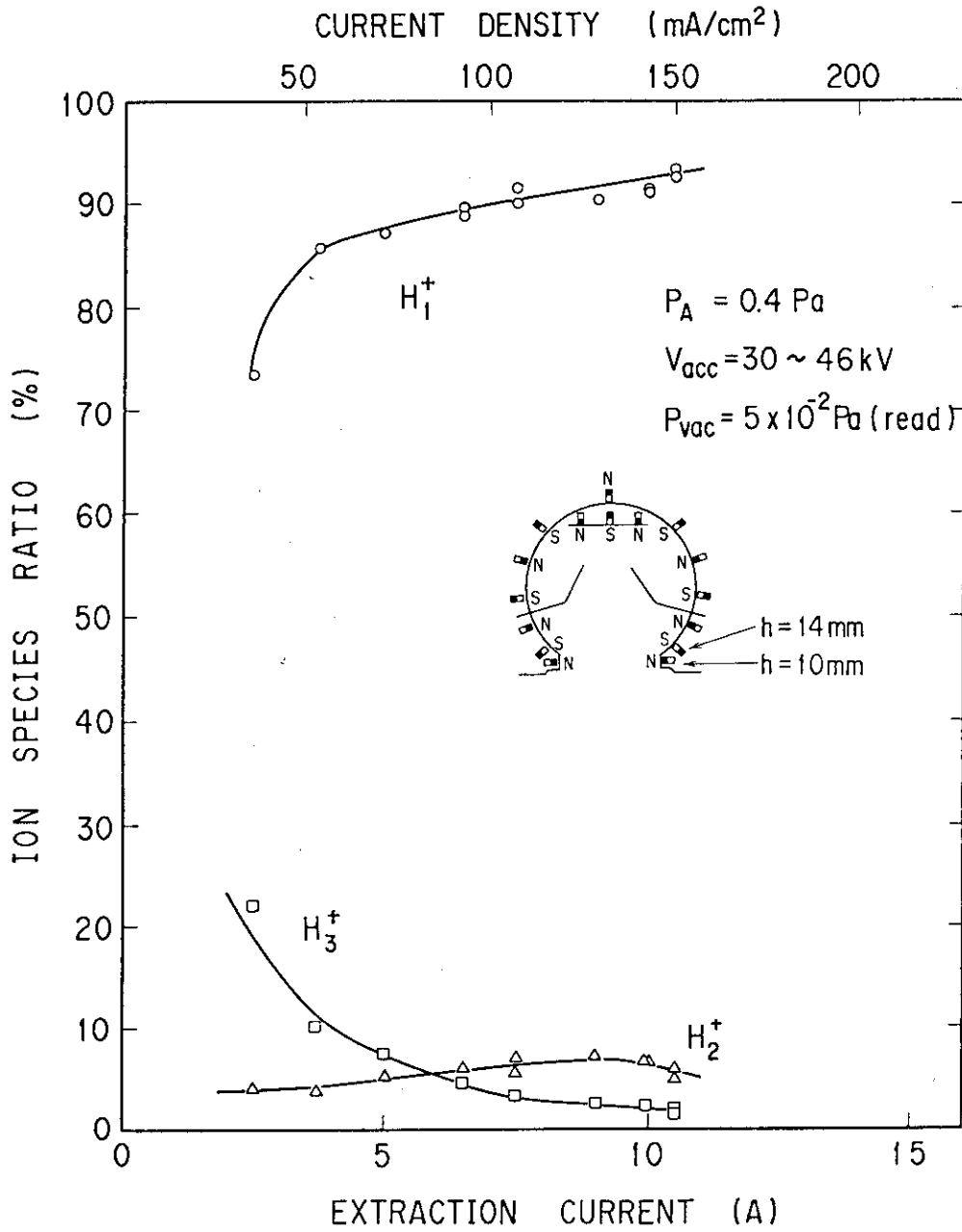
第 4.6 b 図 基本磁場配位 II における開口部短手方向のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

881024



第 4.6 c 図 基本磁場配位 II における開口部長手方向のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) 分布

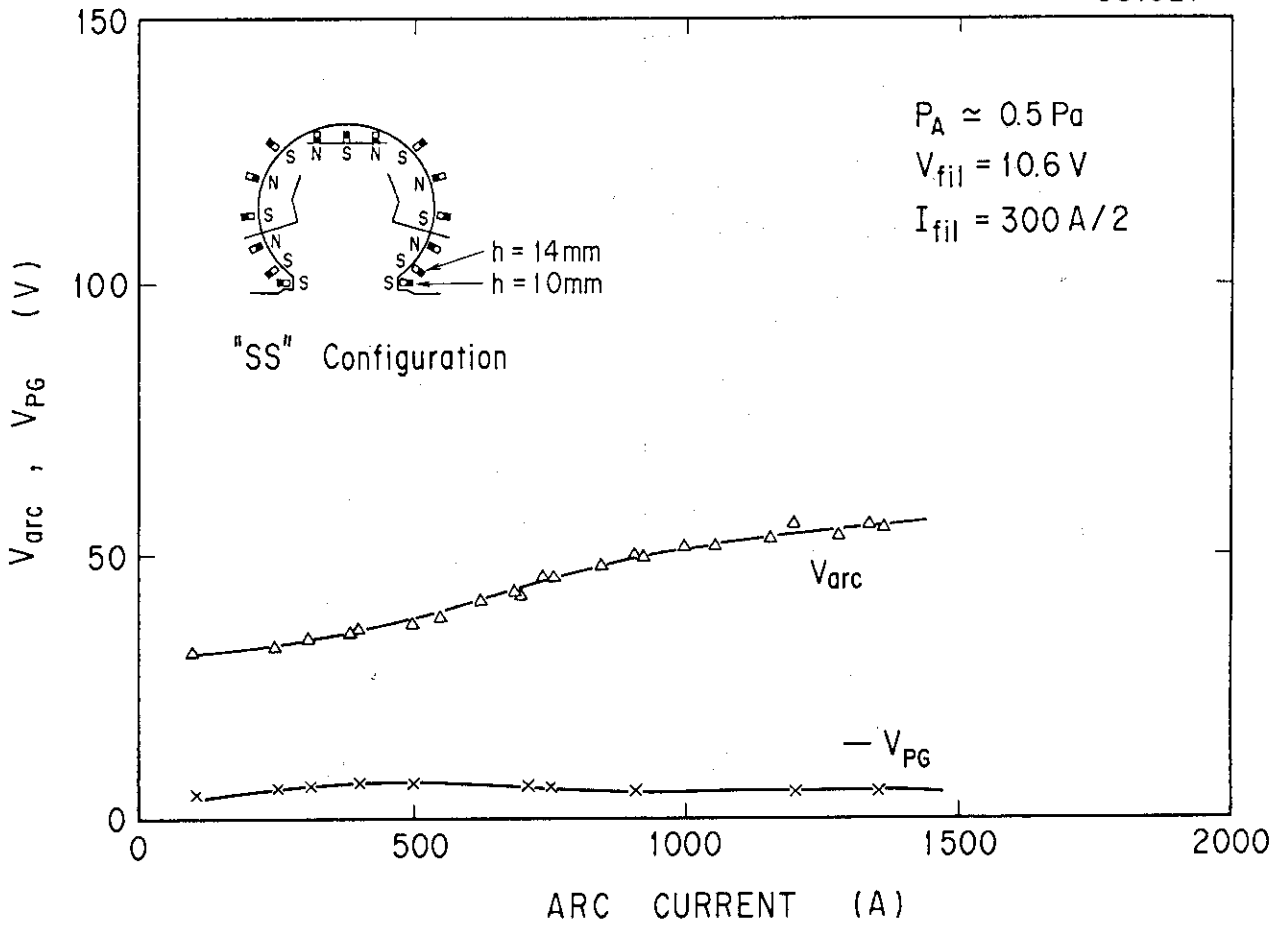
881019



第 4.6 d 図 基本磁場配位 II におけるイオン組成比

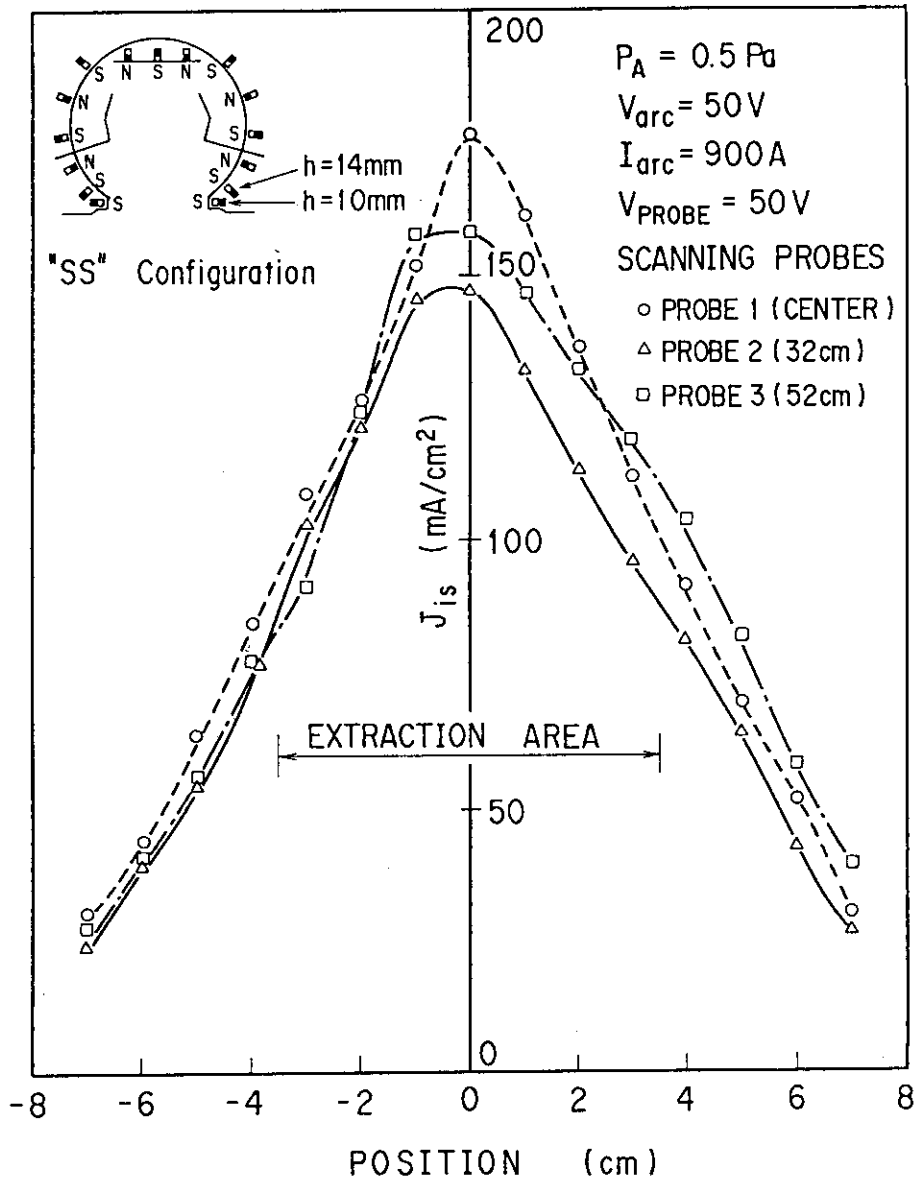


881027



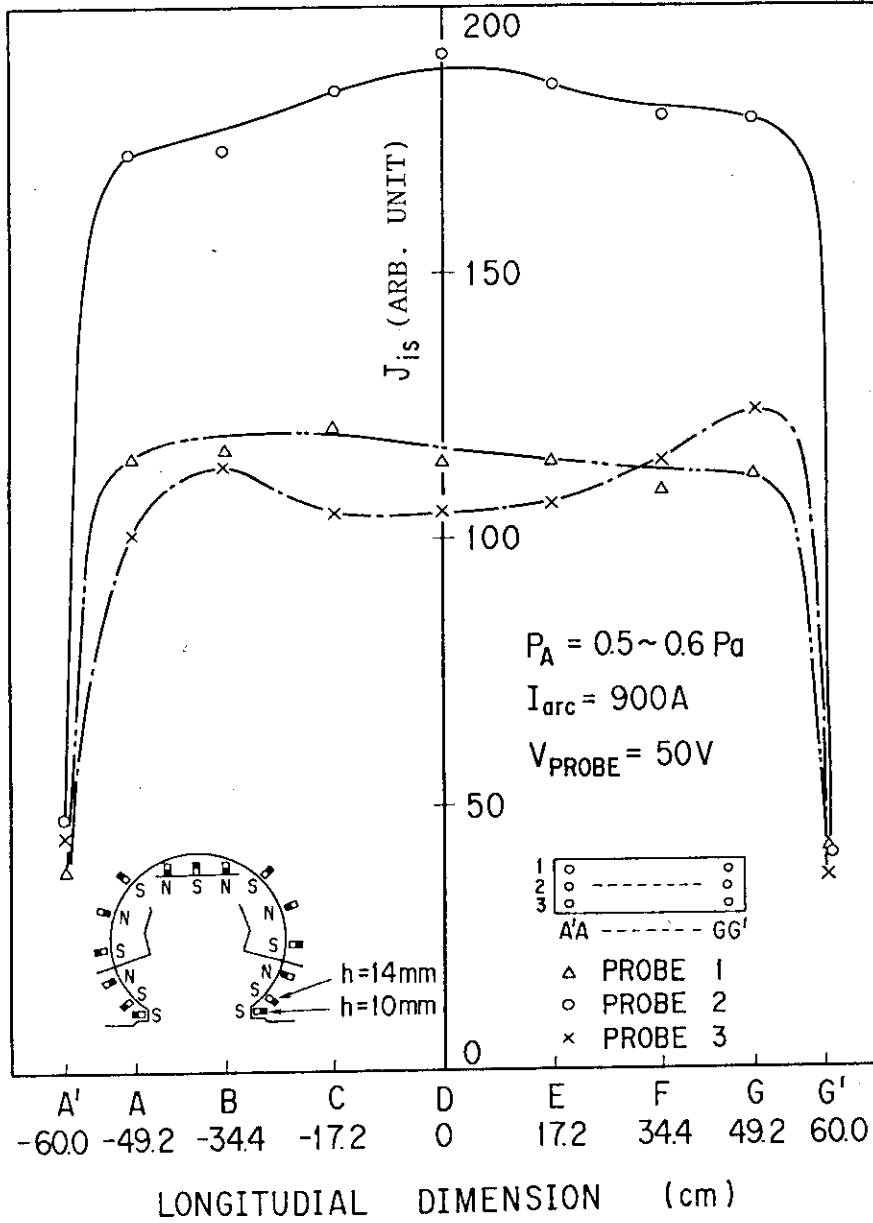
第 4.7 a 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm とし同極性とした場合のアーク放電特性, フィラメントは形状 I を用いた。

881026



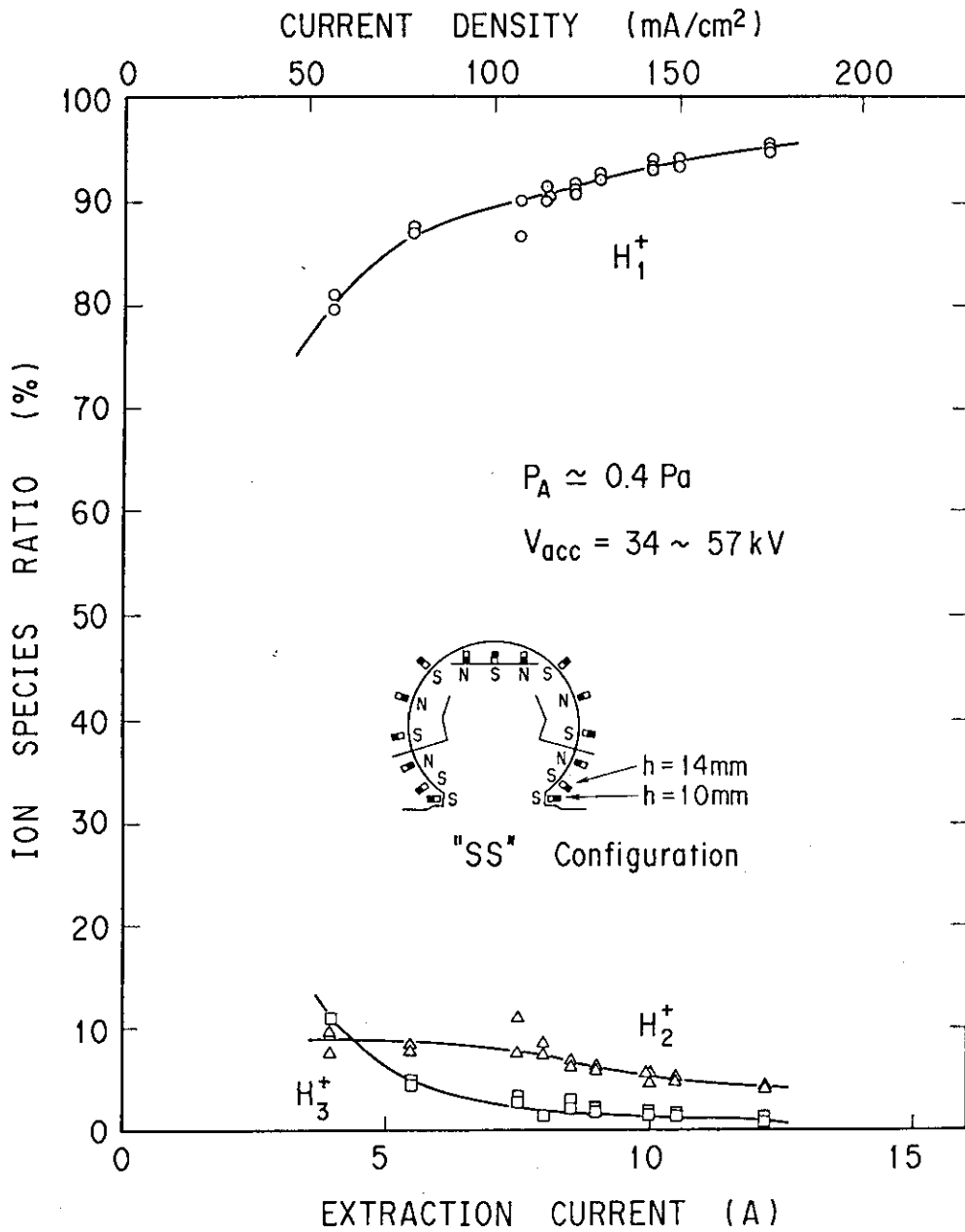
第4.7 b図 開口部から1, 2段目の磁石寸法をそれぞれ10mm, 14mmとし同極性とした場合のイオン飽和電流密度  $J_{is}$  の短手方向分布。フィラメントは形状 I を用いた。

881026



第 4.7 c 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm とし同極性とした場合のイオン飽和電流密度 ( $J_{is}$ ) の長手方向分布。フィラメントは形状 I を用いた。

881028



第 4.7 d 図 開口部から 1, 2 段目の磁石寸法をそれぞれ 10mm, 14mm とし同極性とした場合のイオン組成比。フィラメントは形状 I を用いた。