

JAERI-Tech

98-042



JT-60NB I 用正イオン源のパワー増大

1998年9月

河合視己人・秋野 昇・海老沢昇・本田 敦・伊藤孝雄
椛沢 稔・栗山正明・藻垣和彦・大賀徳道・大原比呂志
大森憲一郎・大島克己・薄井勝富

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。

入手の間合わせは、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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60NB I 用正イオン源のパワー増大

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

河合視己人・秋野 昇・海老沢 昇・本田 敦・伊藤 孝雄
椛沢 稔・栗山 正明・藻垣 和彦・大賀 徳道・大原比呂志
大森憲一郎・大島 克己・薄井 勝富

(1998年8月27日受理)

JT-60NB I は、1986年に水素ビームを用いたNB I 加熱実験を開始し、定格中性粒子ビームパワーの20MW入射に成功した。その後、1991年に、重水素ビーム対応、高エネルギー化の改造を実施し、重水素ビームのエネルギー110keVで40MWの入射パワーを得ることを目標に運転を行った。イオン源での放電破壊に対する対策を講じながら高ビームエネルギー領域での運転の安定化に努めたが、イオン源の基本的な構造上の理由から安定化を果たせなかった。このため、イオン源加速部の電極ギャップ長の変更を行なうことにより、イオン源運転の目標を高ビームエネルギー領域から大電流領域へ方針転換した。この結果、1996年7月に、重水素ビームのエネルギー91～96keVで、最大入射パワー40MWを達成することができた。

Increase of the Positive Ion Source Power in JT-60 NBI

Mikito KAWAI, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Atsushi HONDA, Takao ITOH,
Minoru KAZAWA, Masaaki KURIYAMA, Kazuhiko MOGAKI, Tokumichi OHGA,
Hiroshi OOHARA, Kenichiro OMORI, Katsumi OHSHIMA and Katsutomi USUI

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

(Received August 27 , 1998)

Neutral Beam Injection (NBI) heating experiment in JT-60 started in 1986, and the rated injection power of 20MW at 75keV with hydrogen was achieved after several month operation. In 1991, the ion sources and power supply had been upgraded for a higher beam energy up to 120keV with deuterium, following which the ion source operation re-started aiming for an injection power of 40MW at 110keV. In the operation, the beam acceleration voltage was tried to increase by modifying the ion source structure against the break-down which occurred frequently in the ion source. The beam acceleration was, however, unstable in a beam energy range of more than 105keV because of voltage-holding deterioration in the accelerator. Therefore we changed the strategy to increase the injection power : i.e. we tried to increase the beam current with keeping the beam energy. The structure of the source has been modified to be operated in a high current regime. As a result, the deuterium neutral beam injection of 40MW at 91-96keV was achieved in July 1996.

Keywords : JT-60, NBI, Ion Source, Injection Power, Deuterium, Break-down, High Beam Energy, High Beam Current

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of JT-60 NBI System and Positive Ion Sources | 2 |
| 2.1 Outline of JT-60 NBI | 2 |
| 2.2 Positive Ion Sources | 2 |
| 2.3 Progress of Ion Source Modification | 2 |
| 3. Source Modification for High Beam Energy Operation | 12 |
| 3.1 Modification of Ceramic Spacer in Accelerator | 12 |
| 3.2 Change of Accelerator Grid Gap Length | 13 |
| 3.3 Relation of Beam Current and Injection Power with High Beam Energy Source | 14 |
| 4. Electric Break-down between Accelerator Grids and its Countermeasure | 18 |
| 4.1 Deterioration of Voltage Holding in Operation Voltage of more than 95kV | 18 |
| 4.2 Frequent Break-down in Operation Voltage of more than 105kV | 19 |
| 4.3 Test Results of High Energy Ion Sources | 22 |
| 5. Increase of Injection Power Using High Beam Current Source | 27 |
| 5.1 Shortening of Accelerator Grid Gap Length | 27 |
| 5.2 Relation of Beam Current and Injection Power of Shorten Gap Source | 29 |
| 6. Concluding Remarks | 32 |
| Acknowledgements | 32 |
| References | 32 |

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. JT-60NBI 及び正イオン源の概要 | 2 |
| 2.1 JT-60NBI の概要 | 2 |
| 2.2 正イオン源 | 2 |
| 2.3 イオン源改造履歴 | 2 |
| 3. 高エネルギー化改造 | 12 |
| 3.1 加速部絶縁スペーサの改造 | 12 |
| 3.2 加速部電極ギャップ長の変更 | 13 |
| 3.3 第3期イオン源のパワー特性 | 14 |
| 4. 加速部放電破壊とその対策 | 18 |
| 4.1 運転電圧 95kV 以上での耐電圧劣化 | 18 |
| 4.2 運転電圧 105kV 以上での放電破壊頻発 | 19 |
| 4.3 高エネルギー化試験運転の結果 | 22 |
| 5. 大電流化によるパワー増大 | 27 |
| 5.1 電極ギャップ長の短縮化 | 27 |
| 5.2 第4期イオン源のパワー特性 | 29 |
| 6. まとめ | 32 |
| 謝辞 | 32 |
| 参考文献 | 32 |

1. はじめに

J T-60用中性粒子入射装置(以下、J T-60 NBIという)は1986(昭和61)年8月より、J T-60プラズマのNBI加熱実験を開始して以来、実験上の要請に応えるためのいくつかの改造、改良を加え、現在も各種のプラズマ高性能化実験のための重要な加熱装置として使用されている。

本NBIの当初の設計性能は、14基のビームラインユニットに設置された合計28台の正イオン源で、75keV、20MWの中性水素原子ビームをJ T-60プラズマに入射することであった[1]。その後、J T-60の高性能化改造に対応して、1989(平成元年)年11月から、重水素ビーム対応及び加速電源の最大出力電圧を100kVから120kVへの昇圧、イオン源の高エネルギー化などの改造を行い、1991(平成3)年7月から重水素ビーム運転を開始した。この時の目標は、ビームエネルギー110~120 keVで、入射パワー40MWの安定な運転を実現することであった。

この40MW入射の実現のため、イオン源のエイジングを集中的に行い、運転電圧を上昇させるための努力を重ねた。しかし、電圧上昇に伴い、イオン源内の電極間放電破壊とこれに起因するイオン源外部の放電破壊の頻発、さらにイオン源外部の絶縁スペーサの沿面放電が原因で運転時間と共に絶縁耐圧が劣化していく現象に見舞われた。この耐圧劣化現象に対し、イオン源外部に沿面放電バイパス用の球ギャップを設置するなどの対策を実施し、一定の効果を得ることができた。しかし、最終的には、高エネルギー領域での運転が不調で、最高で95keV、37MW程度の入射パワーにとどまった。そこで、高エネルギー化から大電流化へ方針転換し、運転電圧を95kV程度の比較的低い領域で大パワーを得るためにビーム電流を増大させることとした。このために一部ユニットのイオン源の加速部電極ギャップ長を短縮する改造を行なった。この改造後の特性試験の結果、40MW到達が可能なことを確認し、残りユニットのイオン源改造を実施した。1996(平成8)年7月のビーム入射実験運転で、目標である40MWの入射パワーを達成することができた。

本報告書では、まず高エネルギー化改造前のイオン源の構造、性能等の概略を述べた後、高エネルギー化後に実施した放電破壊対策等の試験結果、それに大電流化へ方針転換後に実施したギャップ長短縮イオン源の最適ギャップ長の選定及びその特性について述べる。

2. JT-60NBI及び正イオン源の概要

2.1 JT-60NBIの概要

JT-60正イオンNBIの全体構成を図2.1に示す。正イオンNBIはビームライン14ユニット、イオン源の台数28台、イオン源用電源、冷媒循環系、補助真空排気系、1次冷却系、制御系等で構成され、当初は全ユニットとも準垂直入射であったが、1992(平成4)年1月から、このうちの4ユニットを接線方向入射ユニットに改造して使用している。さらに、1997(平成9)年6月からは準垂直入射10ユニットのうち、3ユニットをJT-60のダイバータ部排気用に改造し、現在に至っている。

運転開始以来、12年を経過し、この間、図2.2に示すように、約1万2千ショットのJT-60へのビーム入射を実施し、各種のプラズマ高性能化実験に大きく貢献してきた。

2.2 正イオン源

JT-60NBI用の正イオン源の断面図全体構成を図2.3に示す。大きく分けてアークチャンバとフィラメント等で構成されるプラズマ生成部、それに第1正から接地までの4枚の電極とセラミックスペーサ等で構成されるイオン加速部に分類できる。

(1) プラズマ生成部

本イオン源は、ソースプラズマの空間的一様性の良いこと、生成効率及びガス効率の高いこと、などの特徴を持つバケット型(あるいは磁気多極型)と呼ばれるプラズマ源を採用している。フィラメントから放出される1次電子及び生成されるプラズマの閉じ込めを良くするためのラインカusp磁場を形成するために、アークチャンバの外部表面に強力な永久磁石を設置している。フィラメントはタングステン製のテーパ型ヘアピン形状のものが8本取付けられている。

(2) イオン加速部

加速部には、高輝度ビームを得られる2段加速方式を採用しており、2段加速のうちの2段目の電圧を変えることにより運転領域を広くとることが可能である。加速部は第1正電極、第2正電極、負電極、それに接地電極の計4枚の電極を持ち、第1正電極、第2正電極、接地電極の各支持用フランジをアルミナセラミック製のスペーサで絶縁する構造である。第1正と第2正の各電極支持用フランジ間の絶縁用セラミックスペーサをスペーサC、第2正と接地の各電極支持用フランジ間のそれをスペーサDと呼ぶ。

2.3 イオン源改造履歴

JT-60NBIは1986(昭和61)年に最初のビーム入射加熱実験を開始して以来、JT-60におけるNBI加熱実験に必要とされるビームを供給すべく、各種改良や機能追加を行ってきた。イオン源については、表2.1に示すように、おもに加速部の電極ギャップ長の変更を何度か行

ってきた。

表2. 1 イオン源の加速部電極ギャップ長の変更履歴

| | 期 間 | $d_1 : d_2$ [mm] | H^+ 種 | 設計値 | 到達値 |
|-----|--------------|------------------|---------|-------------|-------------------|
| 第1期 | '86/8~'87/10 | 5.0 : 6.5 | H^0 | 75keV 20MW | 75keV 21MW |
| 第2期 | '88/6~'89/10 | 4.0 : 5.0 | H^0 | 75keV 26MW | 75keV 26MW |
| 第3期 | '91/3~'94/10 | 4.5 : 10.0 | D^0 | 110keV 40MW | 95keV 37MW |
| 第4期 | '96/1~'97/4 | 4.5 : 8.0 | D^0 | 95keV 40MW | <u>96keV 40MW</u> |

- 注) 1. '89/11~'91/2 は、JT-60 高性能化改造の工事期間。
 2. ギャップ長: d_3 は 2.5mm 一定。
 3. '95/2~'10 の間は、 $d_2 = 10, 11, 14, 8$ mm の 4 種が混在。
 4. '97/6 以降は、入射可能ユニット数は 14 から 11 に減少。
 5. 第2期、第4期への改造は、ギャップ長のみの変更。

2. 3. 1 電極ギャップ長とビーム光学

(1) 電極ギャップ長と電界強度比

イオン源の加速部電極は、図 2. 4 のとおり、第1正電極 (Plasma Grid = PG)、第2正電極 (Gradient Grid = GG)、負電極 (Suppressor Grid = SG)、接地電極 (Exit Grid = EG) の4枚から構成されている。これら電極間の各距離を図 2. 4 に示すとおり、それぞれ、PG-GG 間を d_1 、GG-SG 間を d_2 、SG-EG 間を d_3 と呼ぶものとする。2段加速系のビーム光学は、1段目と2段目の電界強度比 f の他、各電極の幾何学的形状に大きく依存する。電界強度比 f は、各電極への印加電圧をそれぞれ、PGへは V_{acc} 、GGへは V_g 、SGへは V_s で表すと、

$$f \equiv E_1 / E_2 = [(V_{acc} - V_g) \times d_2] / [(V_g - V_s) \times d_1] \approx [(1 - \Gamma) \times d_2] / [\Gamma \times d_1]$$

である。ここで Γ はイオン源運転中に容易に変更可能な加速電源の電圧比 ($= V_g / V_{acc}$) である。 V_{acc} 、 Γ を一定にして加速電流を変化させる時、ビーム発散角は凹型のカーブとなり、発散角最小となる加速電流を最適加速電流 I_{opt} と呼ぶ。 d_1 、 d_2 、それに V_{acc} が一定の時、 Γ を小さくする (f は大きくなる) とレンズ作用も小さくなってビーム発散角も I_{opt} も大きくなる。逆に Γ を大きくするとレンズ作用も大きくなり、ビーム発散角と I_{opt} が小さくなる。

(2) ビームレットの収束法

各電極には、中心部 12cm × 27cm の領域に約 4 mm ϕ の円形孔が 1020 個明けられており、各孔から収束されたビーム (ビームレットと呼ぶ) が入射ポートの中心に向けて引き出される。各ビームレットを焦点に向けて正しく収束するために、図 2. 4 に示すように負電極の各引出し孔の孔軸は径方向に人為的にずらしている。電極中心から R の位置での径方向側への軸ずれ量 Δ は次の式に従っている。

$$\Delta = 4 \times d_2 \times \{1 + (V_{acc} - V_g) / (V_g + V_s)\} \times R / Z_f \approx 4 \times d_2 \times (1 / \Gamma) \times (R / Z_f)$$

ここで、 Z_f はビームの焦点距離であり、本イオン源の場合、 $R = 135$ mm、 $\Delta = 0.63$ mm であるため、 Z_f は次の式となる。

$$Z_f \approx 857.1 \times d_2 \times (1 / \Gamma) \text{ [mm]}$$

2. 3. 2 第1期イオン源

J T - 6 0 N B I の完成後、N B I 加熱実験を開始した 1986(昭和 61)年 8 月から翌年 10 月間に使用されたイオン源は、水素ビームエネルギー 75keV、最大入射パワー 20MW を得るように、電極のギャップ、孔径、板厚等を最適化していた [1]。電極ギャップ長は、 $d_1=5.0\text{mm}$ 、 $d_2=6.5\text{mm}$ 、 $d_3=2.5\text{mm}$ 、最適な Γ は 0.7、焦点距離 Z_f は 8.3m で設計された。これを第 1 期イオン源と呼ぶものとする。第 1 期イオン源における $\Gamma=0.65$ の場合の加速電流と入射パワーの関係を図 2. 5 に示す。

2. 3. 3 第2期イオン源

1988(昭和 63)年 6 月から翌(平成元)年 10 月までの間に使用されたイオン源は、ビームエネルギーは従来と同じ 75keV で、入射パワーを 20MW から 26MW に増大させるため、電極孔径、電極板厚など電極自体はそのまま、電極ギャップのみ $d_1=4.0\text{mm}$ 、 $d_2=5.0\text{mm}$ に変更し、最適 Γ を 0.7 として運転を行った。これを第 2 期イオン源と呼ぶものとする。電極の板厚はそのまま、ギャップ d_1 、 d_2 のみ縮小した場合、ビーム引出し面の電界強度は電極間の電界強度に比例して増加しないため、最適加速電流も電極間の電界強度に比例して増加しないことがわかった。第 2 期イオン源における $\Gamma=0.7$ の場合の加速電流と入射パワーの関係を図 2. 6 に示す。

2. 3. 4 第3期イオン源

1989(平成元)年 11 月から 1 年半をかけて、J T - 6 0 高性能化のための改造工事が行われ、これに対応して、J T - 6 0 N B I は従来の 75keV、20MW から一挙に $\sim 120\text{keV}$ 、40MW に性能を向上させるために、重水素ビーム対応及び加速電源の最大出力電圧を 100kV から 120kV へ昇圧するなどの改造を行った。イオン源については、ビームエネルギー 110keV 前後で、最大入射パワー 40MW 得ることを目標とし、第 2 期イオン源のセラミックスペーサ D の大気側沿面形状を変更し、電極ギャップ長は $d_1=4.5\text{mm}$ 、 $d_2=10.0\text{mm}$ に変更する改造を行った。これを第 3 期イオン源と呼ぶものとする。全体の改造に先行して、1989 年 4 月から 6 月の間に、14 ユニットのうちの 1 ユニットを用いて、加速電源及び偏向磁石電源の増力を実施し、第 3 期イオン源と組み合わせた確認試験運転を行った。その結果、ビーム引出し運転で最大 105kV、62A、0.15s、加速電源のビームなし無負荷運転で最大 114kV まで到達でき、電源が正常に運転できることの確認と、イオン源のエージングをさらに十分に行えば 110kV 前後の高電圧領域での運転も可能であるとの見通しを得た後、全ユニットの改造を実施した。

このイオン源について、1990(平成 2)年 7 月から 10 月にかけて J T - 6 0 N B I 原型ユニットで水素ビームの特性試験を行った [2] 後、1991(平成 3)年 3 月から実機において水素ビーム運転を開始し、同年 7 月から重水素ビーム運転を開始した。これ以後、40MW 入射のため、イオン源のエージングを集中的に行い、運転電圧を上昇させるための努力を重ねたが、電圧上昇に伴い、イオン源の内部及び外部の放電破壊の頻発、さらに外部放電破壊が原因で運転時間と共に絶縁耐圧が劣化していく現象に見舞われ、種々の対策の検討を行なった。しかし、最終的には、本イオン源を用いた高エネルギー領域での安定な運転は放電破壊多発により達成不能であった。

このため、1995(平成7)年1月から、ギャップ長 d_2 を11.0mmと14.0mmの2種にさらに拡大して、運転可能電圧の上昇を試験したが、やはり良い結果は得られず、結局、ギャップ長変更などの従来イオン源を部分改造することによって高エネルギー領域の安定なビーム入射運転を実現することは、不可能という結論に達した。

2. 3. 5 第4期イオン源

第3期イオン源の結果より、高エネルギー領域での運転を断念し、逆に90~95kV程度の比較的低エネルギー領域で大ビーム電流の運転を行うことにより大パワーを得ることに方針転換し、1995(平成7)年6月に一部ユニットのイオン源のギャップ長 d_2 を8.0mmに短縮して特性試験を実施した。これを第4期イオン源と呼ぶものとする。特性試験結果から40MWの入射が可能であることを確認し、1996(平成8)年1月から、全イオン源のギャップ長 d_2 を8.0mmに変更して運転を行い、同年7月に実際の入射実験運転で、目標の40MWの入射パワーを達成することができ、現在に至っている。

第3期及び第4期のイオン源の特性について、第3章以降でさらに詳しく述べる。

JT-60用正イオンNBI装置の構成

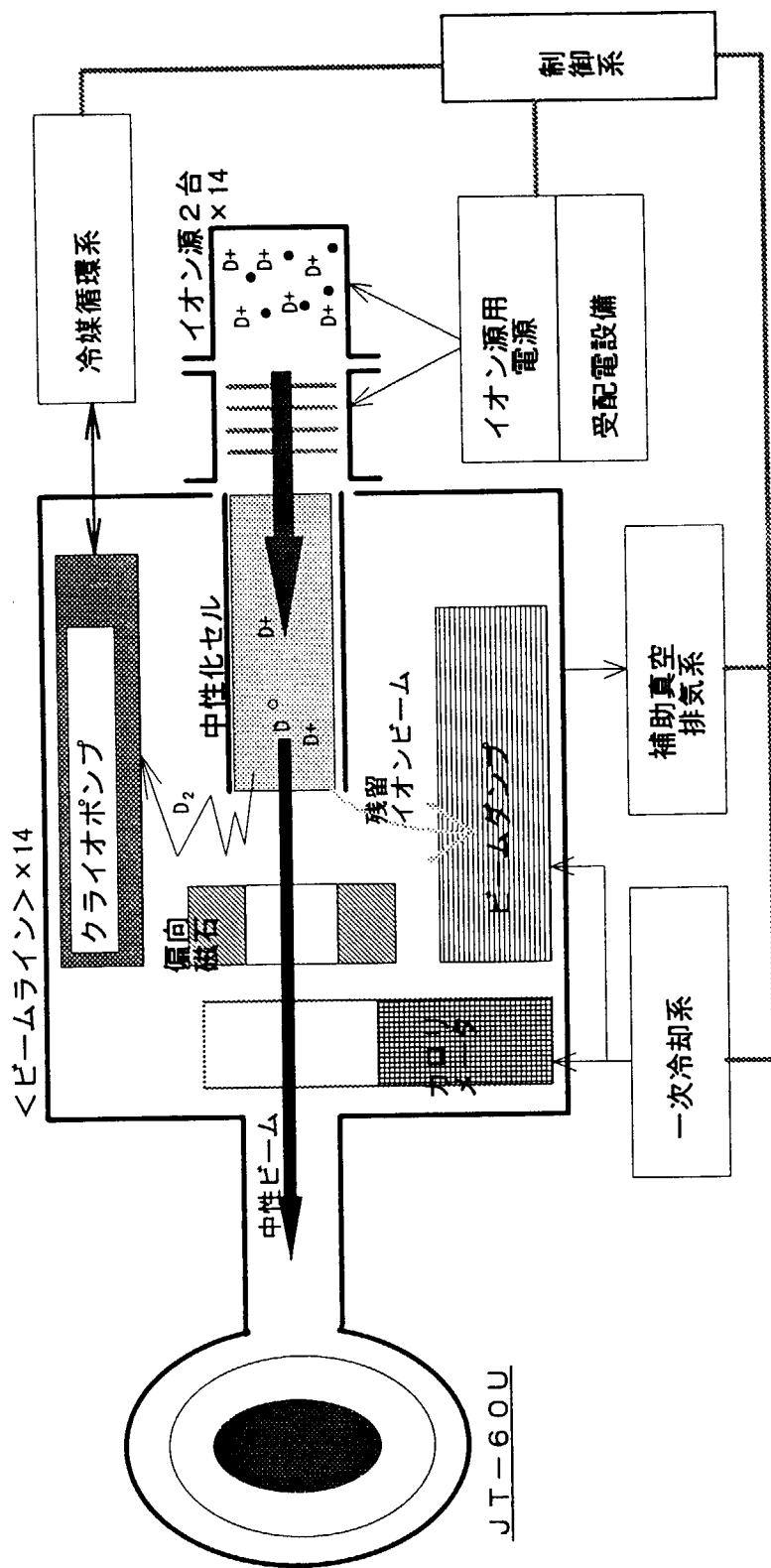
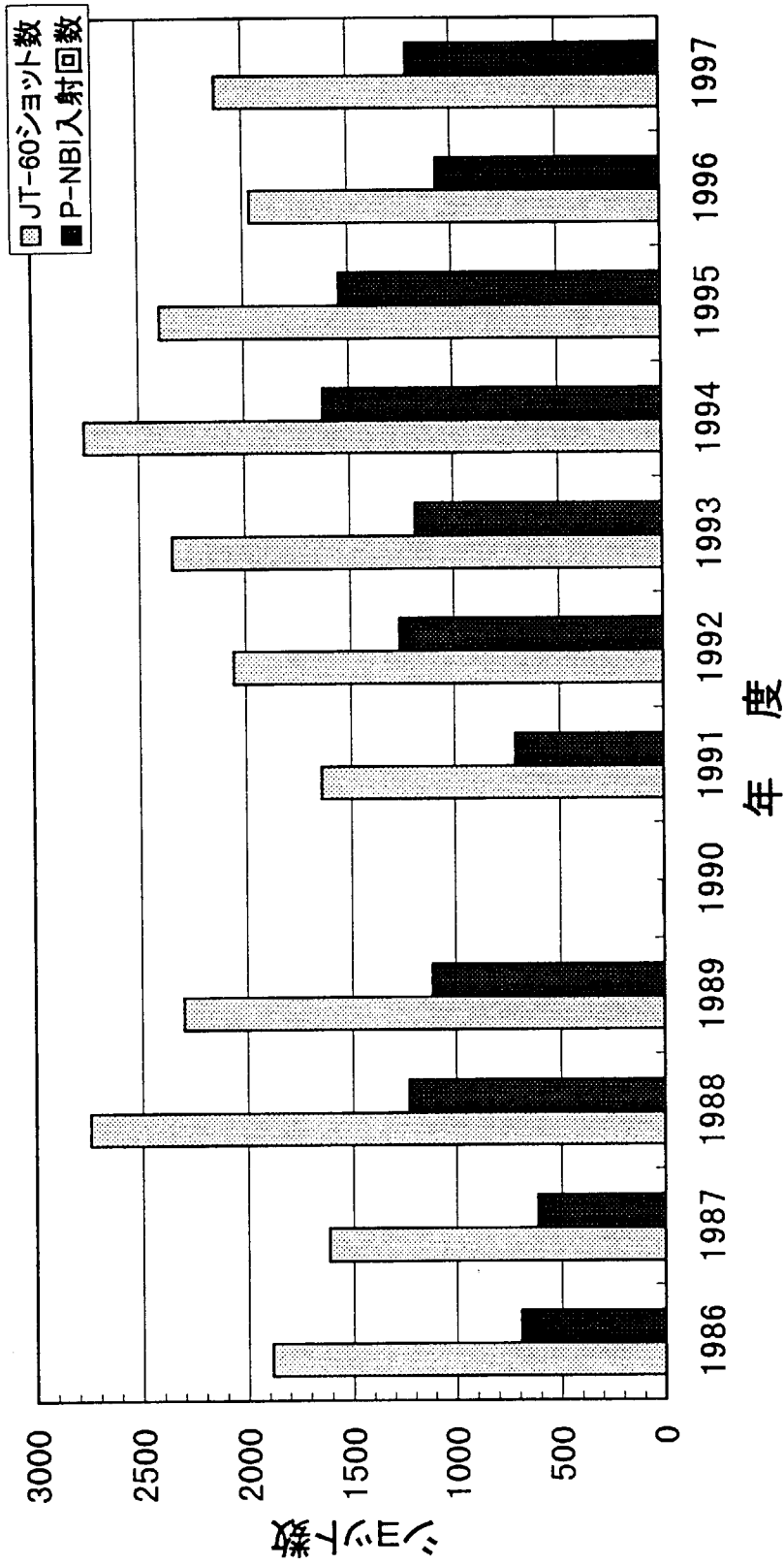


図 2. 1 JT-60正イオンNBIの構成



JT-60 P-NBI入射回数(1986~1997)

JT-60 実験放電回数 : ~24,000

P-NBI入射回数 : ~12,000

図2. 2 JT-60 正イオンNBIの年度別入射回数
「P-NBI」は正イオンNBIをさす。

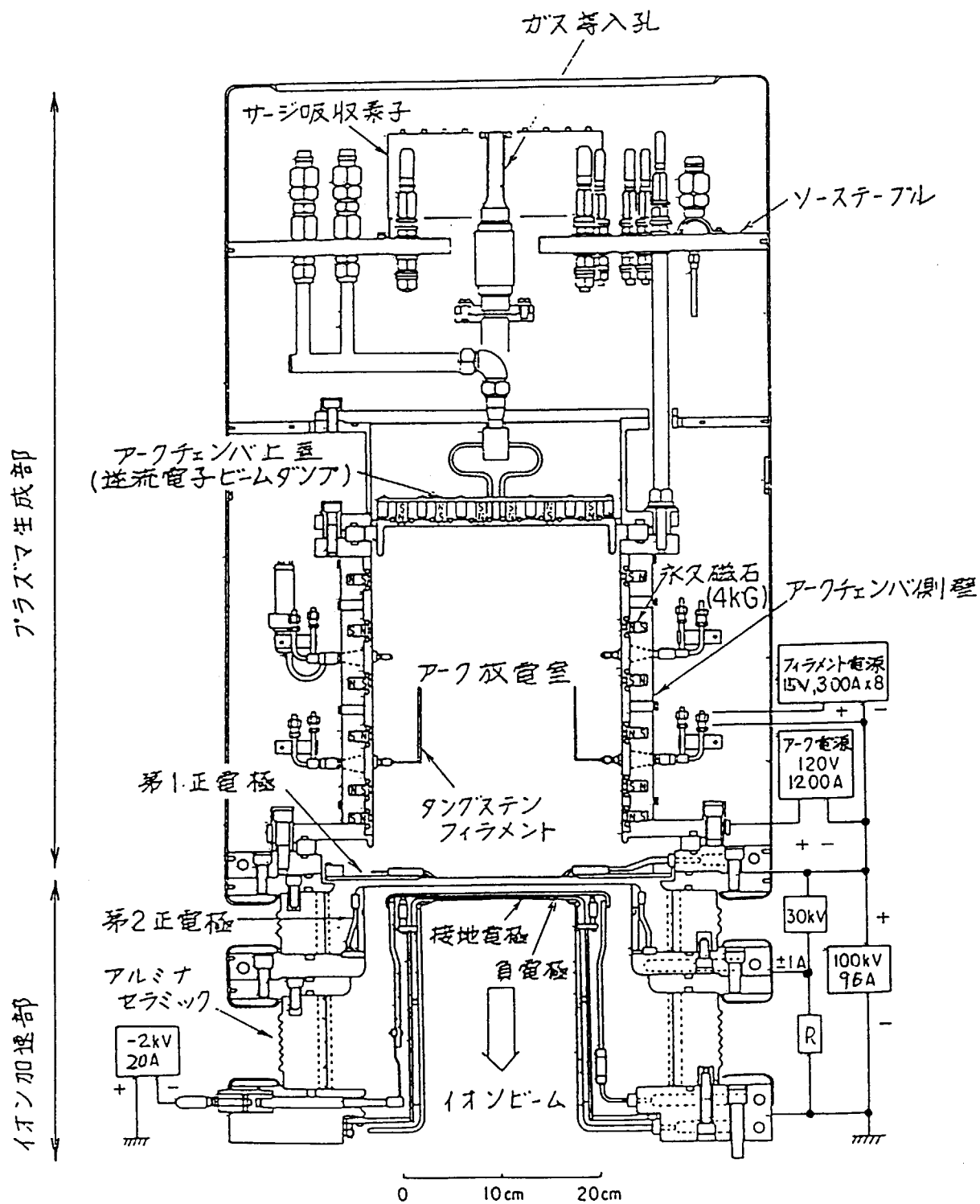


図2. 3 JT-60NBI用正イオン源の構成

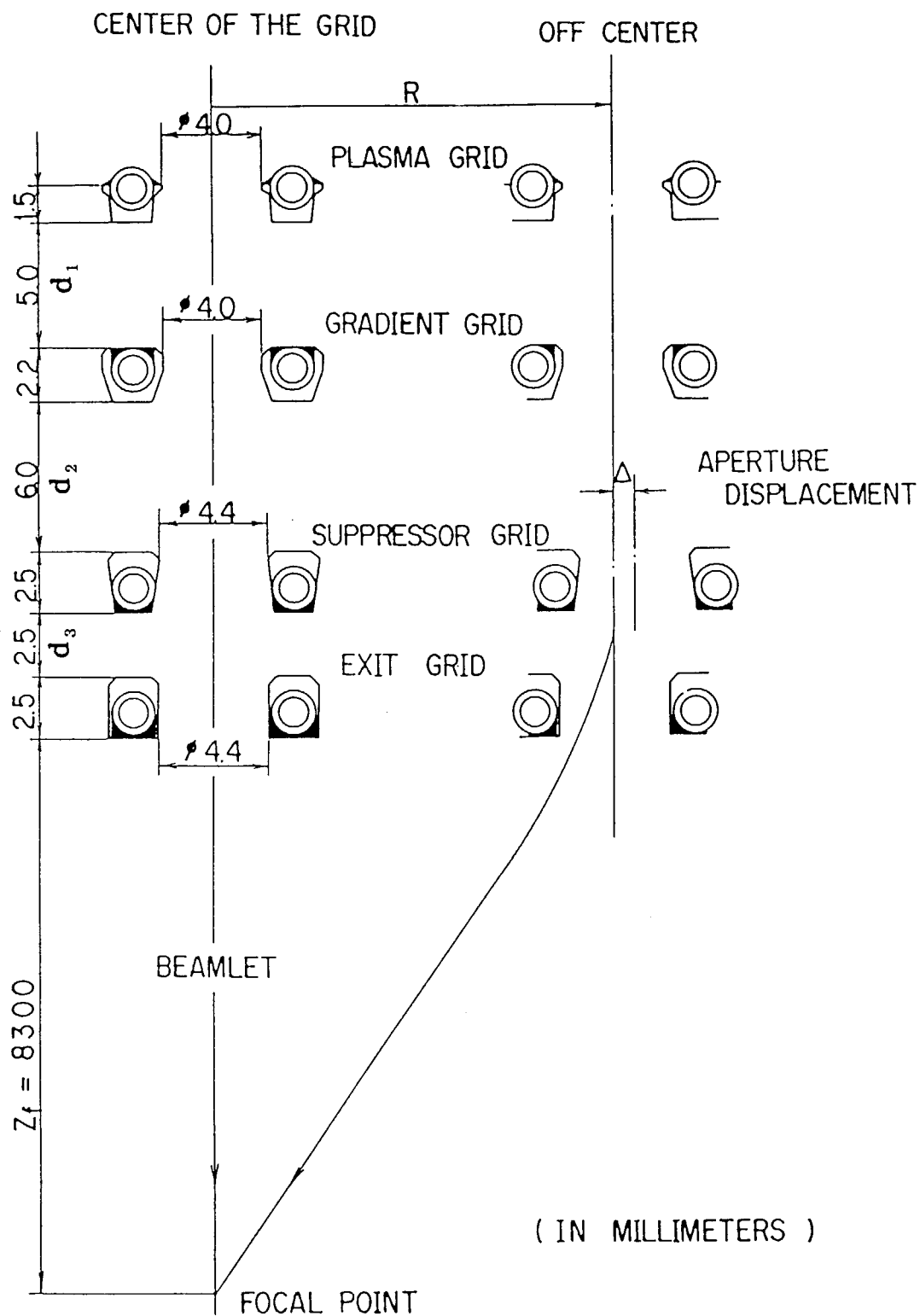


図2. 4 イオン源加速部の電極構成

d_1 、 d_2 及び Z_f の各寸法は第1期イオン源の場合を示す。

$d_3 = 2.5\text{mm}$ 、 $R = 135\text{mm}$ 、 $\Delta = 0.63\text{mm}$ は固定値。

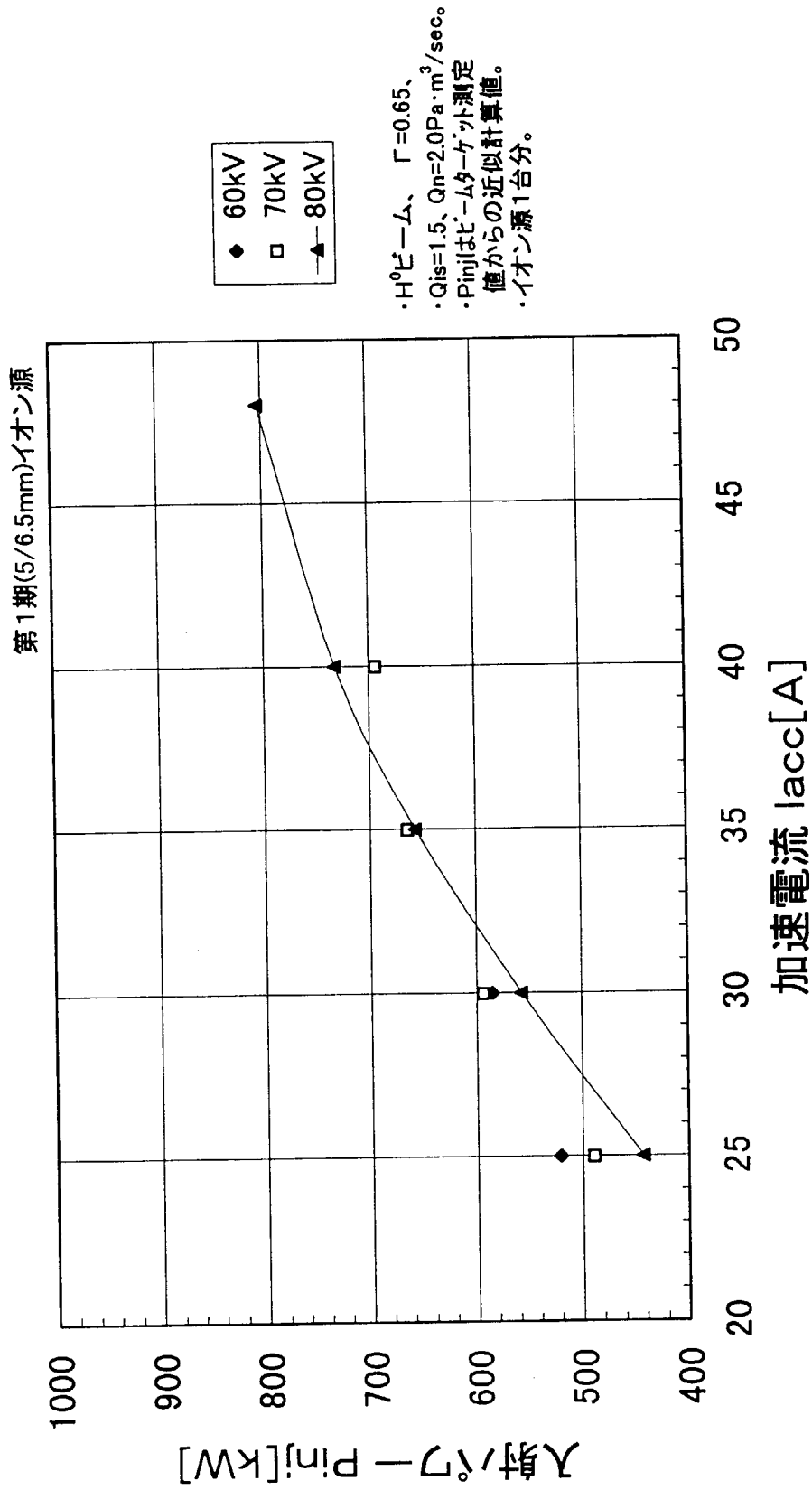


図2. 5 第1期イオン源の加速電流と入射パワーの関係 (水素ビーム)
イオン源1台分のデータを示す。

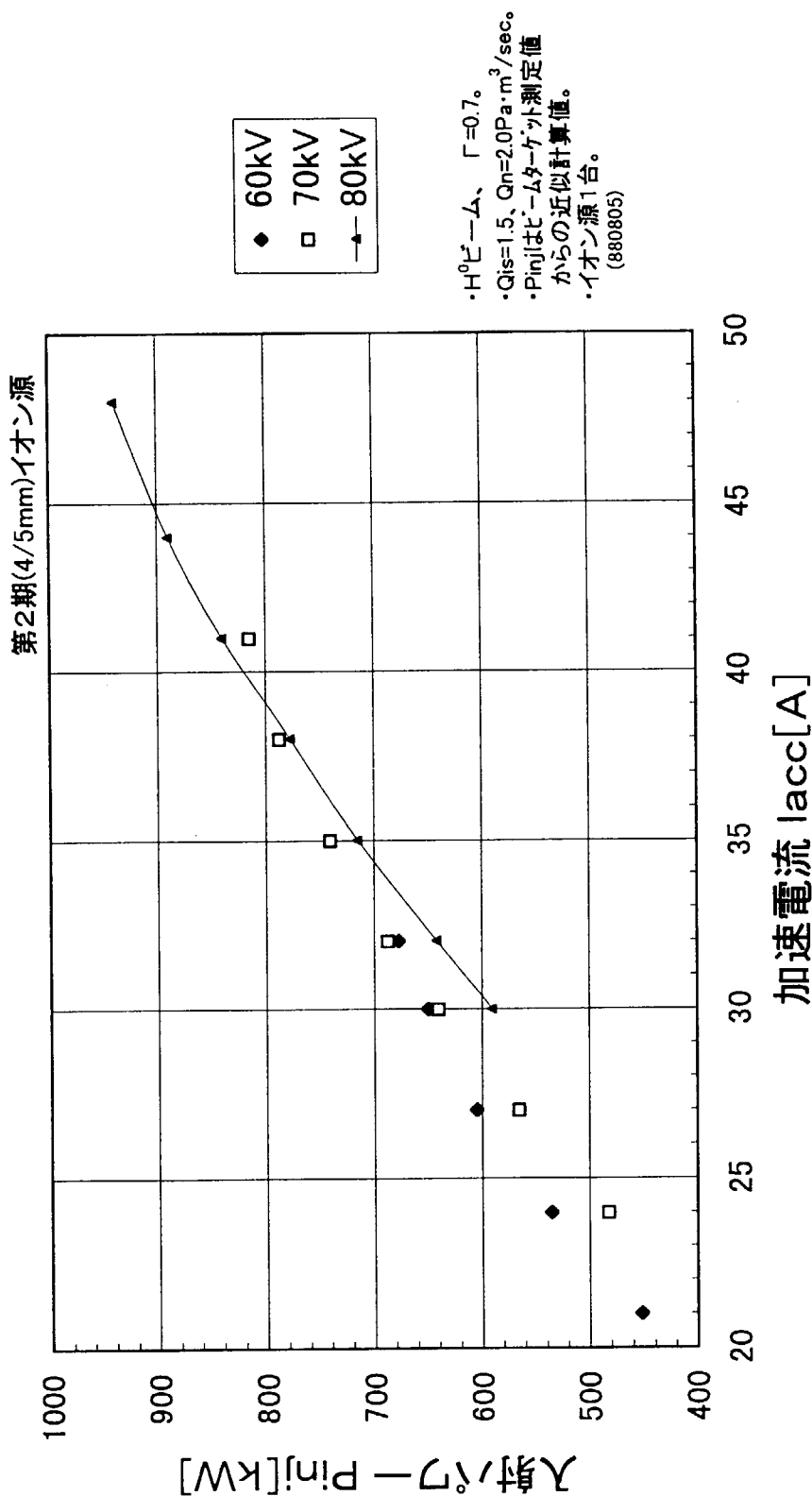


図2. 6 第2期イオン源の加速電流と入射パワーの関係 (水素ビーム)
イオン源1台分のデータを示す。

3. 高エネルギー化改造

第 2.3.4 項で述べたとおり、平成元(1989)年 11 月から一年半をかけて行われた JT-60 の高性能化改造に対応して、イオン源はビームエネルギーを従来の 75keV から 120keV へとアップさせる高エネルギー化改造を行った。その詳細は、以下のとおりである。

3. 1 加速部絶縁スペーサの改造

イオン源加速部の第 2 正電極と接地電極の間に設置されている、絶縁用のセラミックスペーサ D の形状を図 3. 1 に示す。高エネルギー化後のスペーサ D の最大印加電圧は、加速電圧 120kV、 $\Gamma = 0.833$ の時の 100kV である。この一番厳しい条件における電界分布について、スペーサ D の従来形状のものと形状変更したものとを比較を行った。その結果を図 3. 2 に示す。大気側沿面のヒダが 7 カ所ある従来形状の場合、このヒダのすきまに電界の集中が見られ、100kV 印加時には 31.3kV/cm と、空気の絶縁破壊電界の 30.5kV/cm 以上で、従来形状のままでは絶縁耐圧が不足することがわかった。一方、現状の沿面形状の、7 カ所のヒダのうち、中間の 5 カ所を削り取って平滑とし、上下両端の 2 カ所のヒダのみ残す形にした場合、同じ条件の最大電界は 17.9kV/cm となり、60% 以下に低減できることがわかった。また、7 カ所のヒダすべてを削り取って平滑とした場合、最大電界は 18.3kV/cm で、2 カ所のみ残した沿面形状の方がわずかに性能の良いことがわかった。

さらに、外部沿面にヒダがない平滑形状の模擬スペーサ D と模擬電極支持用フランジを組合せ、イオン源内部に SF₆ ガスを充填してイオン源外部の耐電圧試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- ① 模擬スペーサ D と模擬フランジとを固定する埋込ボルトの先端を面取りすると、面取りしない場合に比べ、約 10kV 程度の耐電圧の上昇が期待できる。
- ② 従来フランジのコロナシールドの下側の部分にある 3mm の段差をなくして平板形状とし、コロナシールドも撤去すれば、耐電圧をさらに上昇できる。

この試験結果による最適条件は、先端面取りの埋込ボルトと平板化フランジを使用し、湿度 47% 以下の場合で、100kV 10 分間で放電破壊 1 回のみ、リーク電流 20 μ A という良い結果が得られた。なお、本試験において、周囲湿度、内部真空度や模擬電極の有無などの周囲条件により耐電圧性能は大幅に変動することがわかった。

以上より、セラミックスペーサ D は、従来の表面に 7 カ所あるヒダのうち、中間の 5 カ所を削り取り、上下両端の 2 カ所のみ残す形状変更を行うことに決定した。また、耐電圧試験で性能向上に効果のある 2 つの方法のうち、面取り埋込ボルトは採用し、フランジの平板化改造は容易でないため、採用しなかった。こうして改造したスペーサ D は、イオン源外部の耐電圧性能として、単体試験電圧 88kV 5 分間を放電破壊しないで維持することができた。この結果、 $\Gamma = 0.75$ の場合は 117kV、 $\Gamma = 0.80$ の場合は 110kV 程度までの加速電圧の印加が可能であると判断した。

3. 2 加速部電極ギャップ長の変更

イオン加速部の電極ギャップ長は、第2.3.1項に述べたとおり、ビーム光学上、最も重要な要素の一つである。これまでの運転実績及びビーム軌道計算コード BEAMORBT を用いて、ギャップ長を変更した時のビーム光学特性の概略予測検討を行った。

(1) ギャップ長 d_1 の検討

加速電圧 V_{acc} と電圧比 Γ を固定した時の最適加速電流 I_{opt} は V_{acc} の 1.5 乗に従って増加（チャイルド-ラングミュア則）するが、 I_{opt} の増大に伴い、プロトン比も大きくなるため I_{opt} は V_{acc} の 1.6~1.7 乗に従って増大していく。電界強度比 $f \approx 0.54$ 、運転電圧比 $\Gamma \approx 0.7$ 、プロトン比 90% のイオン源に於ける、水素ビームの最適加速電流 I_{opt}^H の経験的な関係式として、

$$I_{opt}^H = 2.35 \times E_1^{1.71} \text{ [A]}$$

があるので、これを重水素ビームに換算して、

$$I_{opt}^D = I_{opt}^H / \sqrt{2} = 3.32 \times E_1^{1.71} \text{ [A]}$$

の式を用いて d_1 の目安を求めた。

電界強度 E_1 [kV/mm] は、 $E_1 = (V_{acc} - V_g) / d_1$ より、 $V_{acc} = 120$ kV、 $\Gamma = 0.75$ の条件では、 $V_g = V_{acc} \times \Gamma$ なので、 $I_{opt}^D = 43.6$ A を得るための E_1 は 6.77 kV/mm で、この時の d_1 は 4.43 mm となる。

(2) ギャップ d_2 の検討

イオン源の運転可能な上限の電界強度は、経験的に 11 kV/mm とされているが、高電圧領域で少しでも安定な運転をめざすために、また、 d_2 が大き過ぎると電界強度比 f が大きくなりすぎ、ビーム発散角が大きくなり過ぎる可能性が高いために、電界強度は 9 kV/mm 程度となる d_2 を求めるものとした。

$V_{acc} = 120$ kV、 $\Gamma = 0.75$ の時、 $V_g = 90$ kV、 $V_s = -2$ kV 固定なので、

$$d_2 \geq (V_g - V_s) / 9 = 10.2 \text{ [mm]}$$

となる。

(3) ビーム軌道計算

以上の検討結果をもとに、 d_1 を 4.0 mm と 4.5 mm の 2 種、 d_2 は 10.0 mm の条件について、ビーム軌道計算コードを用いて計算した。その結果、 d_1 の 4.0 mm と 4.5 mm との比較では、後者の I_{opt} がやや小さくなる以外、大きな差はなかった。今回、この計算コードを使用するにあたって、第 1 正電極のビーム引出し孔の半径方向にどの点まで軌道計算するか指定の方法が容易でなく、この指定の仕方により結果が変わるため、精度良い評価は行えなかった。 d_1 を 4.0 mm と仮定すると、 f が 0.81 と大きく、ビーム発散角が大きくなり過ぎる可能性があったこと、また、従来の運転実績より、 E_1 は 6 kV/mm 以上は必要であるとの判断から、 d_1 は 4.5 mm とすることに決定した。

この結果、最終的には、加速部電極のギャップ長は、 $d_1 = 4.5$ mm、 $d_2 = 10.0$ mm とした。

3. 3 第3期イオン源のパワー特性

第3期イオン源を用いて、1990(平成2)年7月から10月にかけて、JT-60NB I原型ユニットで、水素ビームについての特性試験を行った[2]後、実機NB Iでは翌年3月からの水素ビーム運転に引き続き、同年7月から重水素ビーム運転を開始した。重水素ビームの特性試験は、原型ユニットでは重水素ビームを扱えないため、加熱実験の合間に実機の1ユニットを用いて行った。このため、測定時間が大幅に制限され、一回の測定で必要な全パラメータのデータを取得できず、何度かに分けて少しずつ測定を行うという変則的な特性試験となった。原型ユニットの場合、模擬NB Iポートの先に設置されたビームターゲットへの入射パワーを測定して実際にプラズマに入射されるパワーを評価できるが、実機の場合、カロリメータへの入射パワーを測定してこのパワーからNB Iポート内での損失を計算し、実際の入射パワーを評価することになる。このため、測定時のビームパルス幅が最長0.5秒に制限されて水温差信号のS/N比が悪い、カロリメータ下流に設置されている3種類のビームリミタでカットされるビーム成分も含めたパワーを測定している、の2つの理由により試験データの精度は若干低くなる。

重水素ビームの加速電流と入射パワーの関係を図3.3に示す。40MWの入射のためには、1ユニット当たり2.86MWのパワーが必要であり、このためには、105~110kV程度以上の高電圧での運転が必要になることがわかる。

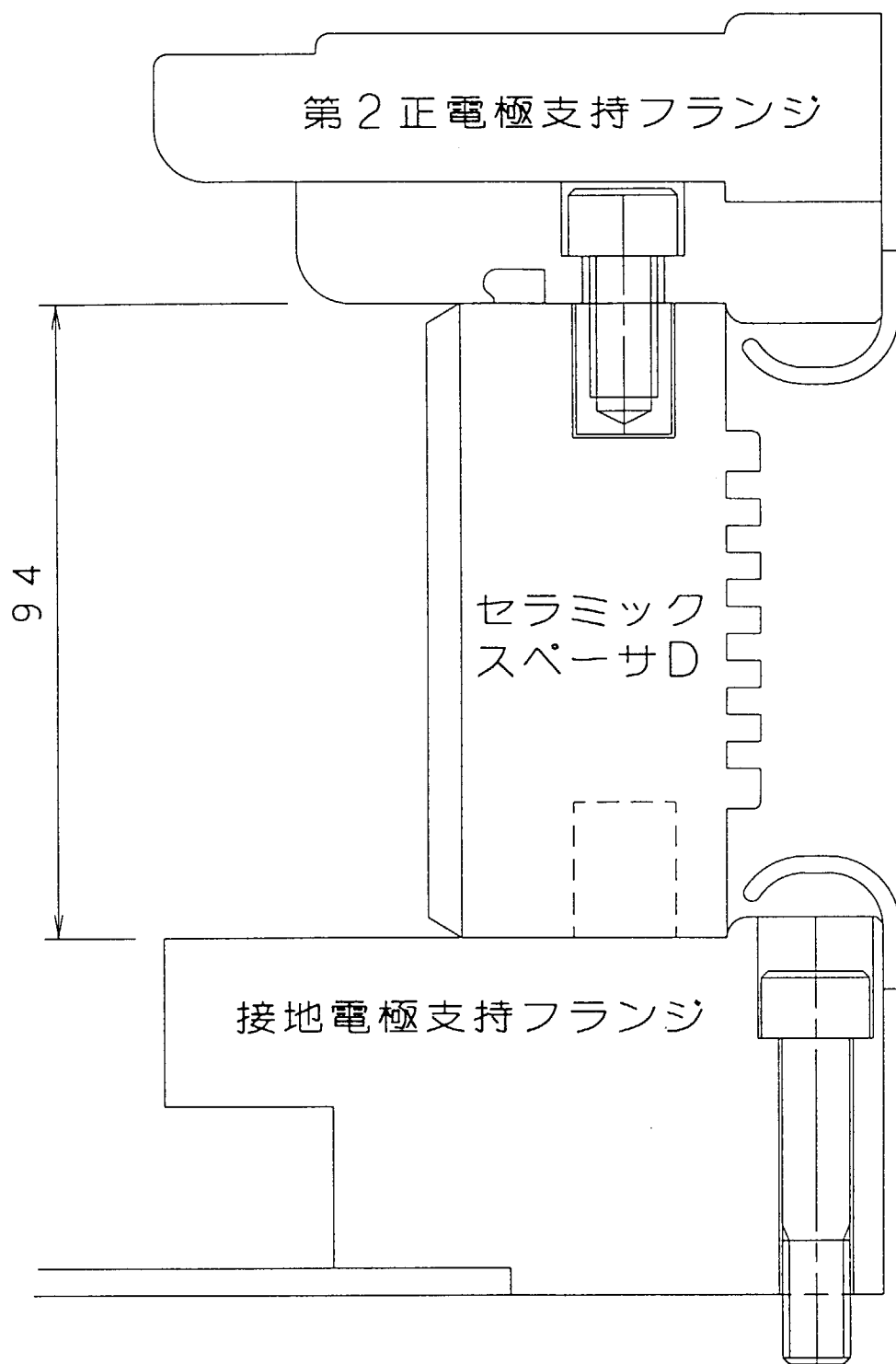
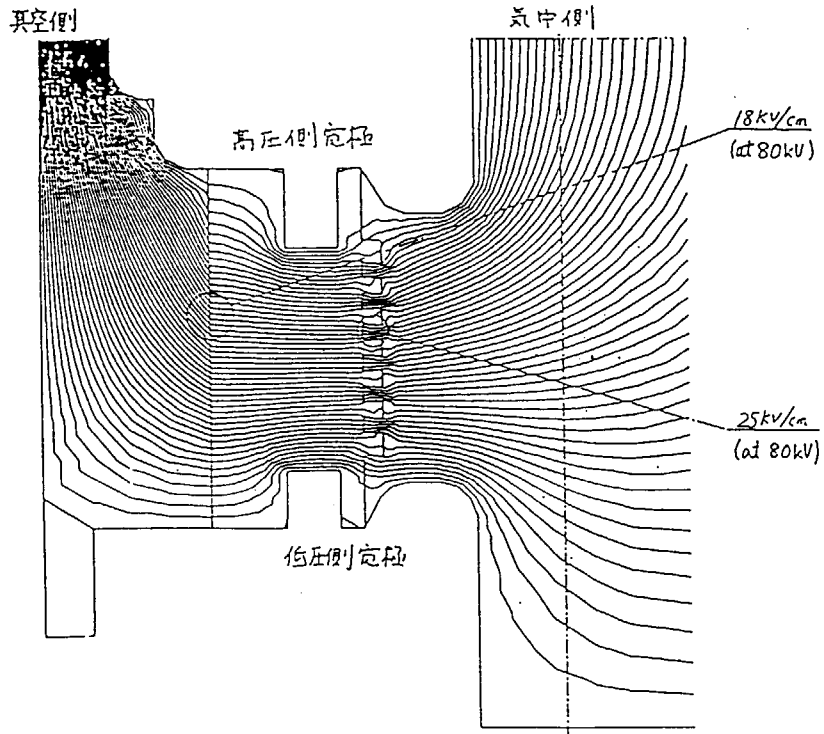


図3. 1 絶縁用セラミックスペーサDの断面形状 (変更前)

☆変更前；25kV/cm at 80kV(31.3kV/cm at 100kV)



☆変更後；14.3kV/cm at 80kV(17.9kV/cm at 100kV)

⇒7カ所のヒダのうち、中間の5カ所削り取ることで、電界集中を57%緩和

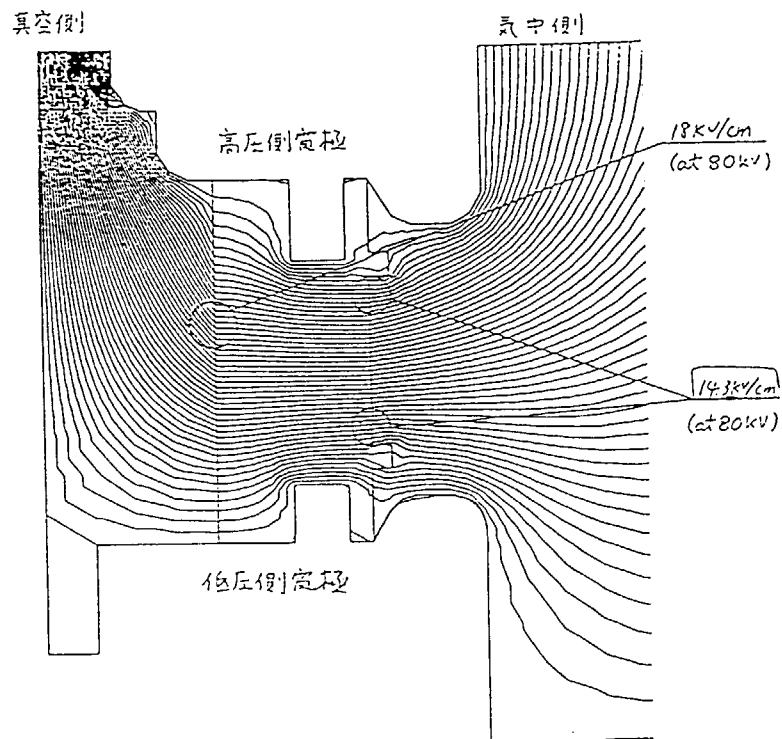


図3. 2 スペーサDの形状変更前後の電界分布

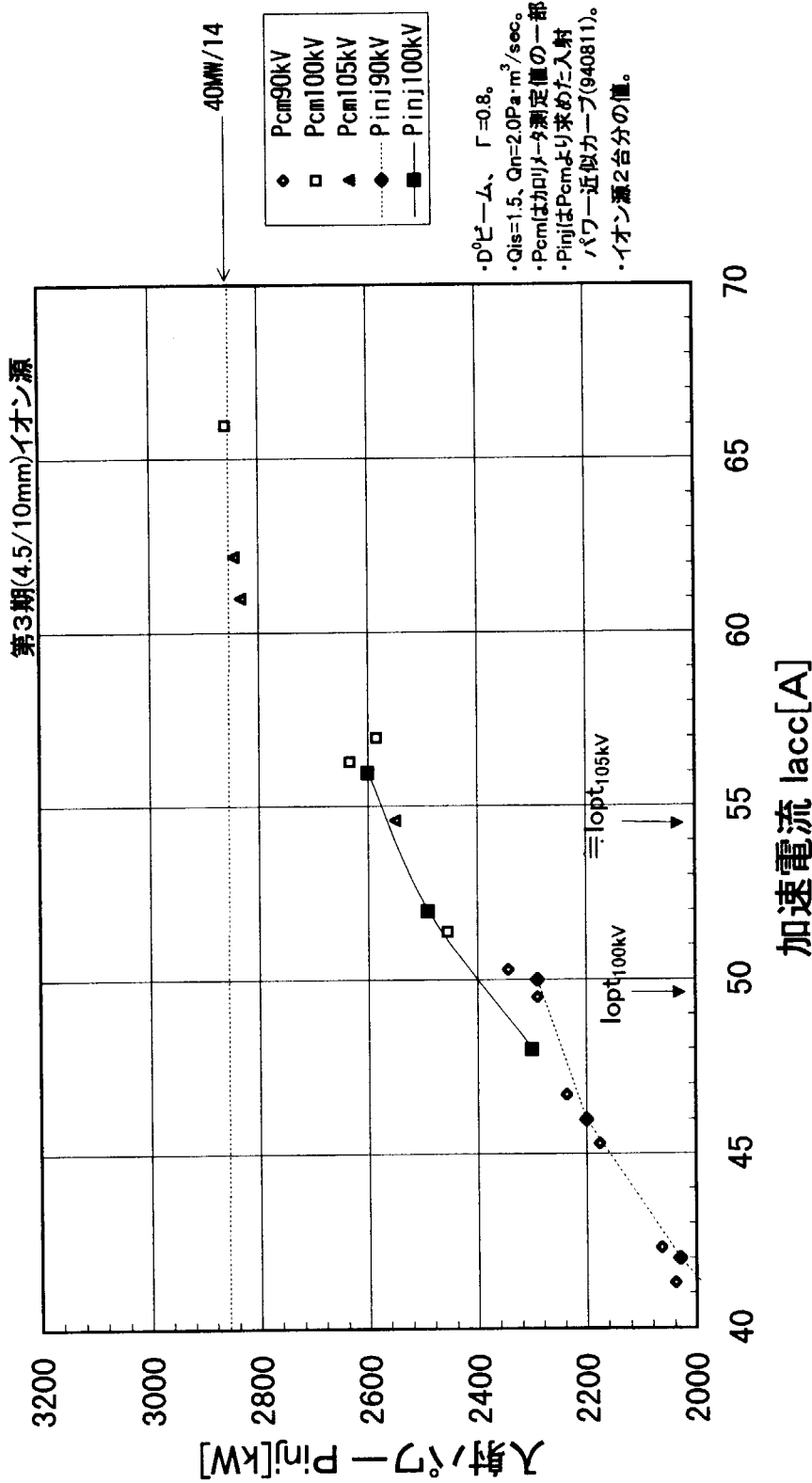


図3. 3 第3期イオン源の加速電流と入射パワーの関係 (重水素ビーム)
イオン源2台合計のデータを示す。
 I_{opt} はその加速電圧における最適加速電流を示す。

4. 加速部放電破壊とその対策

既存のイオン源を改造することにより、高エネルギー領域での安定なビーム出力を得ることを目標に運転を行った。しかし、イオン源の内部あるいは外部で放電破壊が頻繁に発生し、安定な高エネルギービーム出力を達成できなかった。本章では、運転電圧上昇に伴って頻発した放電破壊の影響を最小限に抑えるために実施した対策とその結果について述べる。

4. 1 運転電圧 95kV 以上での耐電圧劣化

4. 1. 1 絶縁スペーサの大気側浴面放電

第3期イオン源について、40MW入射のために必要な100kVを超える高電圧領域のイオン源のコンディショニング運転を精力的に実施した。しかしながら、95kV～100kV程度まではエージングが順調に進むものの、さらに運転を継続しているうちに、一度放電破壊が発生すると80kV程度まで設定運転電圧を大幅に下げないと放電破壊の頻発により、ビームの引出しができなくなった。さらに悪化が進むと75kV程度でも放電破壊が頻発する傾向が現れた。この状態のイオン源を点検すると、第1正と第2正各電極間絶縁用のセラミックスペーサCの大気側表面に黄色あるいは黒のすじ状の放電痕と、各電極支持用フランジに設置されているコロナシールド表面に無数の点状の放電痕が確認された。これらをアルコール等できれいに清掃すると、その後しばらくの間は耐電圧が回復し、95kV前後の運転ができるが、運転再開後3日目頃から再び悪化し始め、4日目には明らかに劣化するという現象が繰り返し発生した。

この耐電圧劣化の原因は、スペーサCの大気側の浴面放電が繰り返されるうちにスペーサ表面が放電痕で汚染されたためであった。スペーサCへの印加電圧は最大30kVに対して、スペーサC単体の絶縁耐電圧試験は44kV5分間で実施されており、十分な絶縁性能のはずである。それにも関わらずこの浴面放電の発生した原因について検討した結果、以下のとおりと推測された。JT-60NBIの加速電源は直流側でのオン/オフのスイッチング素子としてGTO（ゲートターンオフサイリスタ）を使用しているため、放電破壊検出後の加速電源の遮断動作が真空管でスイッチングする場合に比べて約一桁遅い100マイクロ秒程度である。イオン源内部の第2正電極と負電極間で放電破壊が発生した場合、第2正と負の各電極が短絡状態のため、瞬間的に第1正、第2正の各電極間に加速電源出力全電圧が印加された後、遮断時間内に減衰していくことになる。スペーサCの絶縁耐力を超える電圧が印加される時間は数十マイクロ秒程度の短時間ではあるが、スペーサCの大気側浴面放電が発生する。そして、この現象が何度も繰り返されるうちにスペーサCの大気側表面の汚れが加速度的に進み、最後には通常の印加電圧だけでも大気側浴面で放電破壊が発生してしまう。なお、米国GA社のダブルレットIII-D用NBIでもJT-60NBI用イオン源に類似点の多い2段加速方式イオン源を運転条件も近い状態で使用しているが、こちらは真空管によるスイッチングのため、ここに述べたような問題はまったく発生していない。

4. 1. 2 沿面放電バイパス用球ギャップ

以上の推測結果に基づき、第1正電極と第2正電極間に絶縁性能以上の異常な高電圧が瞬間的に印加されてもスペーサCの大気側沿面で放電しないようにするための対策案を検討した。その結果、イオン源外部の第1正と第2正の各電極支持用フランジ間に沿面放電バイパス用球ギャップを取付け、異常電圧はこのギャップにバイパスさせて放電させる方法を採用することにした。

スペーサCの沿面放電防止バイパス用に設置した球ギャップの形状、設置状況を図4. 1に示す。このギャップを実際のイオン源と試験用高電圧発生器と組み合わせ、放電特性試験を実施した。その結果は図4. 2に示す。この結果をもとに、1992(平成4)年6月より実機イオン源に球ギャップを装着して実動作試験を行った。その結果、スペーサCの沿面放電は抑制でき、従来のように運転時間に比例してスペーサC表面に放電痕や汚れが増大していくことはほとんどなくなった。しかし、全体の運転可能電圧は球ギャップ設置前より低下してしまった。この原因はギャップ長が20mm未満では、ギャップ間で一旦放電破壊が生ずると、30~40ミリ秒後の再立ち上げ時に再度放電破壊を生じやすいこと、またこのギャップの支持金具と対向する接地電極コロナシールドとの間に放電痕が多数観察され、支持金具形状が適切でないために電界歪みが生じ、支持金具を起点に放電を頻発していることがわかった。

1993(平成5)年1月より、この球ギャップの支持金具を改良し、ギャップ長を20~22mm程度で最適化したことにより、95kV程度以上の高電圧運転を継続しても3~4日で耐電圧が劣化するという現象は発生しなくなった。この結果、スペーサCの表面とコロナシールドの放電痕もほとんど観測されなくなり、沿面放電バイパス用球ギャップの効果が確認できた。

4. 2 運転電圧105kV以上での放電破壊頻発

4. 2. 1 105kV以上での運転結果

球ギャップ改良によるスペーサCの沿面放電の抑制効果を確認後、~110kV程度での安定な運転の実現を目標に、コンディショニング運転を1993(平成5)年3月に集中的に行った。95~105kVの電圧範囲を中心に、パルス幅0.5秒を約1400ショット行った結果、14ユニットのうち、100kV以上に到達したユニットは10ユニット、全ユニット中で到達した最高値は112kVであった。また、100kV程度以下では、運転を継続していくと耐電圧は徐々に上昇するが、105kV程度以上の運転を継続していくと耐電圧が突然劣化し、60~70kV程度まで大幅に運転電圧を下げてから再び地道にエージングをやりなおさなければならない現象が複数ユニットで発生した。この原因は第4. 2. 2項のような推定原因が考えられるが明確ではないため、本イオン源の同年4月以降の運転電圧は最高でも103kV以下とすることに決定した。なお、運転後のイオン源点検の結果、スペーサCの沿面放電抑制用に設置した球ギャップの効果は、高電圧運転でもおおむね維持されていたが、イオン源に個性があるためか、ギャップ長を全ユニット同一ではなく、一部ユニットについてはさらにギャップ長を微調整した方が良い結果の得られることがわかった。

最高運転電圧を103kV以下としたイオン源エージング運転により、実験入射時の運転可能電圧を100kVまで上昇させることを目標としてその後も精力的に運転を行った。しかし、NBI加熱

実験のために必要なパルス幅 3～5 秒程度を安定に入射できる実用的な運転電圧は、好調時でも 90～95kV 程度であった。

4. 2. 2 放電破壊の原因推測と対策

放電破壊頻発の原因を推測し、それぞれについて検討した結果は次のとおりである。

(1) 絶縁部からの光電子

a. 推測内容

原研でのイオン源の開発研究の過程で、イオン源内部の放電破壊により運転電圧を上昇できなかった時に、原因の一つとして、絶縁スペーサ部においてビーム光による光電効果で放出された電子が放電破壊を誘発していることがあった。この対策として、絶縁スペーサ内部表面とビーム軌道が直接対向することがないように、この空間に遮光シールドを追加設置することにより、運転可能最大電圧を 80kV から 100kV に上げることができた実績があった。今回の放電破壊の多発もこれが原因の可能性があった。

b. 検討結果

1994 (平成 6) 年 8 月に、2 台のイオン源について、絶縁スペーサ C 及び D 部の真空側に図 4. 3 に示すようなアルミニウム製の光電子対策用遮光シールドを設置し、光電子の影響の有無を確認する試験を行った。その結果、本イオン源の場合には、このシールドを設置しても運転電圧向上の効果はないことが確認できた。

(2) 電界強度過大及び絶縁スペーサ D 耐電圧不足

a. 推測内容

電圧比 Γ の標準値 0.80 の場合、加速電圧 $V_{acc}=100\sim 110\text{kV}$ の領域では、ギャップ d_2 間あるいは第 2 正と接地電極フランジ間のセラミックスペーサ D の負担電圧は 80～88kV となる。この時、ギャップ d_2 間の電界強度は 8.0～8.8kV/mm となり、経験的な上限値 11kV/mm には達しないが余裕が小さくなっているため、この電極間の放電破壊が多発していた可能性がある。また、スペーサ D 単体の耐電圧試験値は 88kV であるため、スペーサ D 部での外部沿面放電が多発していた可能性がある。

b. 検討結果

イオン源の電極ギャップ長 d_2 を拡大して、電界強度を下げることにより内部放電破壊を抑制できないか、また、スペーサ D の高さを増すことにより外部放電破壊を抑制できないかについて試験した。1995 (平成 7) 年 1 月より、4 台のイオン源について、ギャップ長 d_2 を 10mm から 14mm に拡大し、そのうちの 2 台については、さらにスペーサ D の高さも現状の 94mm から 124mm に拡大して試験した。スペーサ D を 124mm 高さに拡大することにより、スペーサ D 単体の耐電圧は現状の 88kV 5 分間から 100kV 10 分間に耐えられる性能に向上する。この試験の結果、ギャップ長 d_2 及びスペーサ D 高さの両方を拡大したイオン源は他のイオン源より、放電破壊頻度はやや減少し、わずかながら効果があった。しかし、ギャップ長 d_2 を 14mm に拡大しただけのもの及びギャップ長 d_2 を 11mm に変更しただけの残り 20 台のイオン源については、変更前と明確な差は現れなかった。以上の結果より、本イオン源の場合、ギャップ長 d_2 及びスペーサ D 高さの両方

を拡大した場合にのみ、放電破壊発生の抑制にわずかの効果があるが、単にギャップ長 d_2 のみ拡大しても放電破壊抑制効果はないことが確認された。なお、この試験のために行ったギャップ長拡大の結果、運転電圧は上昇しないのに、最適加速電流が大きく減少したため、入射パワーはさらに小さくなった。

(3) 流入サージエネルギー増大による電極損傷

a. 推測内容

電極間放電破壊の発生時の電極損傷は、電源機器及び配線等の持つ浮遊容量 C と運転電圧 V で決まるエネルギー ($=CV^2/2$) の流入によってもたらされる。このエネルギーがすべて電極へ流入することを抑制するために、イオン源用電源の出力ケーブル端付近にサージブロッカーが設置されている。その性能は最大加速電圧 100kV の場合に、流入サージ電流がピークで 500A 以下、流入エネルギーが一回の放電破壊あたり 7 J 以下に抑制するものである。

加速電源の 120kV 化改造の際に、このサージブロッカーの性能向上の改造は行わなかったため、100kV を超える運転ではこのサージ抑制性能の仕様を満たしていない。浮遊容量に蓄えられるエネルギーは、例えば、90kV と 110kV との比較では 1.49 倍となるうえに、コアの磁気飽和の可能性も生ずる。このため、105kV 程度以上の高電圧運転中の放電破壊発生時には電極に流入するサージエネルギーが急激に増大する可能性があり、これが電極表面に微小突起を作り、これが 105kV 以上の運転中に突然に耐電圧が劣化し、回復に地道なエージングが必要となる原因だった可能性がある。

b. 検討結果

サージブロッカーの性能向上のために、コアの断面積を増大するのは物理的に困難なため、バイアス電流を増大して、 $V \cdot \text{sec}$ を稼ぐ方法について検討した。しかし、現状 0.066~0.077 $V \cdot \text{sec}$ の性能が最大でも約 6% と改善の程度が小さ過ぎることがわかった。また、この問題は 105kV 以上の高電圧領域運転中の耐電圧劣化現象との関連が強く、95~100kV 程度の運転での放電破壊多発の原因とは考えにくいことからこの確認試験は実施しなかった。

(4) 電極の変形、損傷

a. 推測内容

イオン源電極の変形量は高エネルギー化後の運転以降目立つようになり、運転後のイオン源内部点検の結果、電極のたわみや歪みが大きい ($\sim 0.5\text{mm}$) もの、あるいはイオン源の第 2 正電極で表面蒸着層及びモリブデン母材の層剥離と電極引出し孔の周囲に小クラックなどの損傷が発見された例があった。これら変形、損傷は電界の分布や強度を変えることになるので放電破壊多発の原因の可能性はある。

b. 検討結果

運転休止期間の点検で電極の変形や損傷が発見されたイオン源がその直前の運転で他のイオン源に比べて、特に目立って放電破壊が多かったという記録はなく、また、変形量が一定限度 ($\pm 0.3\text{mm}$) を超えた電極は発見次第、整形修正や交換の対策を行っているが、その後の運転で放電破壊頻度が低いという傾向は明確に現れたことがない。これらのことから放電破壊多発の主要原因ではないと判断した。

(5) セラミックスペーサ内面の汚れ

a. 推測内容

イオン源の内部点検の結果、スペーサC及びD共、真空側の表面が銅のスパッタ跡や幾筋かの沿面放電の痕跡が見られた。この結果から、真空側のセラミックスペーサ表面で沿面放電している可能性がある。

b. 検討結果

このスペーサ内面の洗浄、清掃等の対策は容易に行うことができず、確認不能であった。

(6) 電極支持構造物の耐電圧不足

a. 推測内容

電極支持構造物は図2. 3に示される、各電極を各電極支持用フランジに取付けるための各部品である。これらの現状形状等が高電圧運転時には耐電圧性能に問題のある可能性がある。

b. 検討結果

この問題も、改造等は容易に行うことができず、確認不能であった。

(7) その他の検討項目

a. SF₆ガス絶縁

イオン源全体を絶縁性能の高いSF₆ガス雰囲気中に置いて単体試験を行った結果、容易に100kVまでイオン源外部の放電破壊発生を抑制することができた。この方法を実機にも採用できればイオン源外部の放電破壊発生の問題は一挙に解決できる。このため、ガスをどのようにシールするか、放射化の問題をどうするかなどについて具体的に検討したが、実現可能な方法が見つからず、実施不能であった。

b. 減速電源電圧

JT-60NBIの減速電源の最大出力値は-2kVであり、この-2kV一定で運転を行っている。高ビームエネルギー領域の運転では、これをさらに大きくしないと逆流電子を抑制できずに放電破壊発生を誘発している可能性がある。このため、定格出力増大の検討を行ったが容易に改造することはできなかった。

4. 3 高エネルギー化試験運転の結果

4. 3. 1 高電圧領域での運転結果

既存のJT-60NBI用イオン源は、もともと75kV用の設計であり、これに部分改良を加えて高電圧領域での運転を目標としてきたが、高電圧領域で安定な運転を行うことは困難であることがわかった。これまでの検討結果から、100kV以上で安定な運転を行なうには、最初から高エネルギー用に設計したイオン源及びサージ抑制性能や加速電源遮断性能を持ったイオン源用電源を用いる必要があることを示唆している。本イオン源の場合、放電破壊多発の原因が何かは特定できなかったが、加速部(電極支持部構造、絶縁スペーサ長など)を根本的に改造しない限り、~105kV以上の運転は不可能であると結論づけられる。

4. 3. 2 電圧比 Γ 変更によるパワー増大

これまでの検討結果より、第3期イオン源による40MW入射は達成困難なことがわかった。しかし、少しでも大パワーをという実験上の要求に応えるため、応急的な入射パワー増大のための処置として、加速電圧比 Γ を従来の $\Gamma=0.8$ から0.75に小さくして、同一加速電圧なら最適加速電流を大きくすることにより、入射パワーを増大する方法を検討した。この場合、入射パワーも増大する半面、ビームの発散角が大きくなるため、イオン源の加速部電極の熱負荷が厳しくなる。このため、慎重に電極熱負荷特性試験を行い、入射パワーを約10%増大させる運転条件の場合、電極熱負荷は約50%増大するが、設計許容値内で運転できることを確認し、1993(平成5)年7月末から $V_{acc}=90kV$ のみ、 $\Gamma=0.75$ の運転を可能とした。これにより、大入射パワーの必要な実験項目に限定して入射実験を行うことが可能になり、1993(平成5)年7月26日に、 $\Gamma=0.75$ 、95keV、37MWの入射を達成した。さらに不足データの追加測定を行い、翌年1月からは $V_{acc}=50\sim 95kV$ のすべての電圧範囲も運転可能とした。

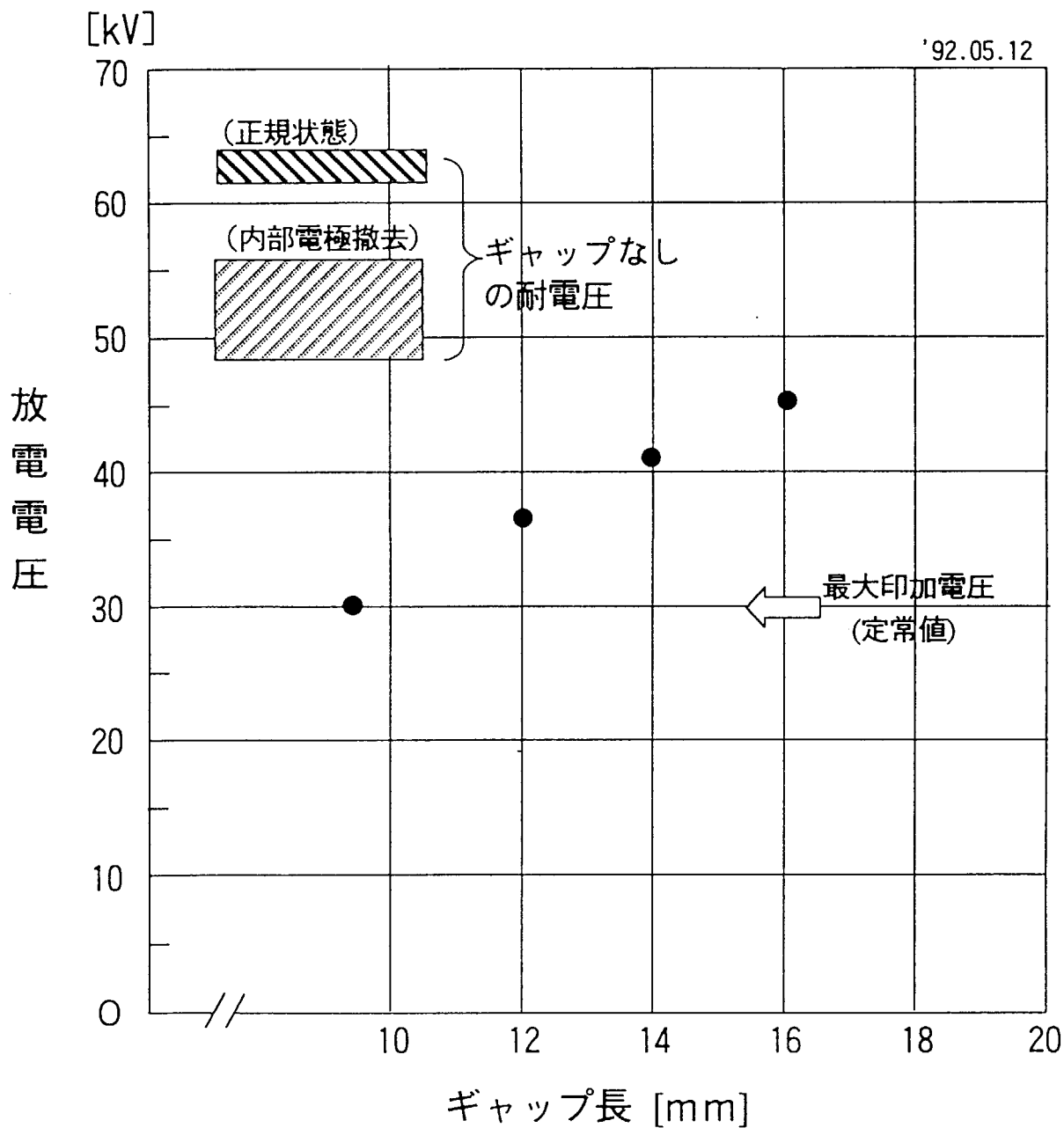


図4. 2 沿面放電バイパス用球ギャップと放電電圧

高圧電源は試験用高電圧発生器を使用。

球ギャップは支持金具等改良前のものを使用。

「ギャップなしの耐電圧」の正規状態とは計4枚の加速部電極を取付けたままの状態を指し、内部電極撤去とはこれら電極及び電極支持部品等を取り外した状態を指す。

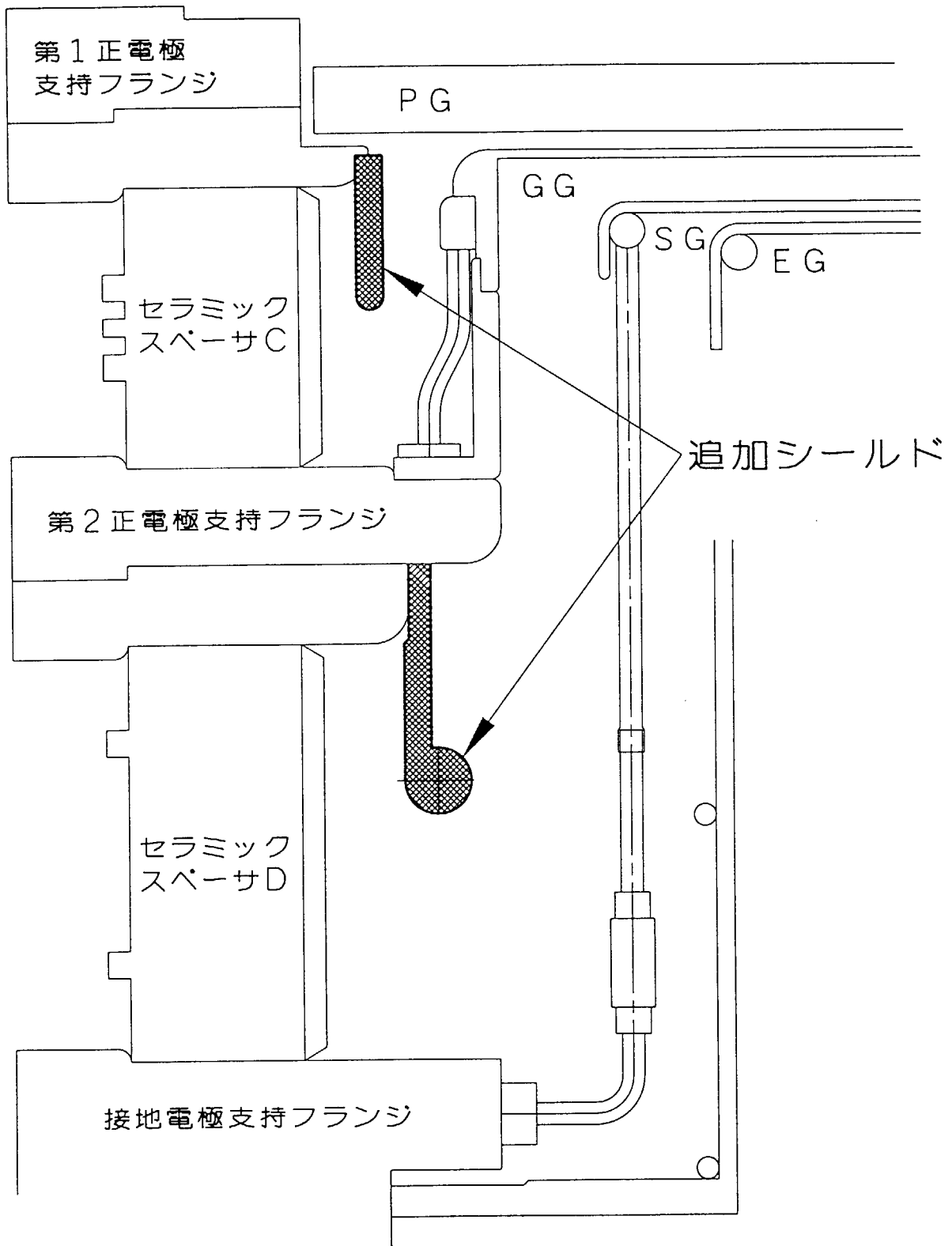


図4. 3 光電子対策用遮光シールド取付図
シールドの材質はアルミニウムである。

5. 大電流化によるパワー増大

第4章に述べたように、第3期イオン源を用いた高エネルギー化の目標は、放電破壊の多発により達成が困難と結論づけられた。これらの運転実績で、90～95kV 程度ならば、パルス幅～3秒程度の入射の場合にもかなり安定であることが確認できたため、目標を高エネルギー運転領域から、90～95keV 程度の低エネルギー、大電流の領域で運転を行うことにより 40MW 入射を達成することに方針転換した。このために、電極ギャップ長 d_2 を 10mm から 8mm に短縮して特性試験を行った。

5. 1 電極ギャップ長の短縮化

ギャップ長短縮の検討にあたって、第3期イオン源($d_2=10\text{mm}$)の実測データから求めた I_{opt} 近似式を用いて、まず、 $d_2=10\text{mm}$ から 11mm に拡大した時の最適加速電流、入射パワーのそれぞれの予測値と実測値の比較を行い、1mm 程度のギャップ変更ならば、これらが良く一致することを確認した。この後、同様にギャップ長短縮時の $d_2=8\text{mm}$ と 9mm について最適加速電流等の予測値を求め、比較検討の結果、 d_2 を 8mm とすることに決定した。

5. 1. 1 11mm ギャップの場合の予測値と実績値との比較

(1) 電界強度比と焦点距離

2段加速のビーム光学は、ギャップ長 d_1 、 d_2 、電圧比 Γ と第2.3.1項の電界強度比 f 及び焦点距離 Z_f の関係式を用いて概略特性を評価できるのでこれを用いて予測した。この場合、第3期イオン源 ($d_2=10\text{mm}$)、 $\Gamma=0.75$ の場合を基準として、これに近い f 、 Z_f となる 11mm の場合の各 Γ を求めると、 f 値では 0.77、 Z_f 値では 0.83 となり、一致しない。このため、 f 及び Z_f 両値に該当する数値の平均を予測値とすることにした。

(2) 予測値と実測値との比較

第3期イオン源($d_2=10\text{mm}$)の実測値から求めた近似計算式を用いて、11mm ギャップの場合の加速電圧 $V_{acc}=90\text{kV}$ 時の最適加速電流 I_{opt} 予測値を求め、実績値との比較を行った。

①第3期イオン源の場合の I_{opt} 計算式

$$I_{opt} = 0.02304 \times V_{acc}^{1.541} \times \Gamma^{-2.692} = 23.66 \times \Gamma^{-2.692} \quad [\text{A}]$$

② 11mm の予測値と実測値

$\Gamma = 0.80$ の時、予測値 $I_{opt} = 43.1 \text{ A}$ 、 $P_{inj} = 1.82 \text{ MW}$ 、

実測値 $I_{opt} = 43 \text{ A}$ 、 $P_{inj} = 1.8 \text{ MW}$

$\Gamma = 0.75$ の時、予測値 $I_{opt} = 51.3 \text{ A}$ 、——

実測値 $I_{opt} = 53 \text{ A}$ $P_{inj} = 1.9 \text{ MW}$

*注) 予測 P_{inj} は電流値による単純な比例配分 ($= P_{inj}^{10} \times I_{opt}^{11} / I_{opt}^{10}$)

この結果より、最適加速電流 I_{opt} は、第3期イオン源の I_{opt} 計算式より求めた予測値と実測値とは良く一致しており、また、第3期イオン源の入射パワーに電流増分を考慮して求める入射パ

ワー Pinj も概略予測には十分使用可能であると判断した。

5. 1. 2 短縮ギャップ長の検討

(1) d₂ 短縮時の予測

ギャップ長 d₂ を 9 mm 及び 8 mm に短縮し、加速電圧 V_{acc} = 90kV の場合の、最適加速電流 I_{opt}、入射パワー Pinj について、第 5.1.1 項と同様に各概略予測値を求めた。

| | f 基準 | Z _f 基準 | 平均 | |
|------------|-------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| ① 9 mm の場合 | 条件 { | Γ = 0.730 | Γ = 0.677 | Γ = 0.70 |
| | | f = 0.740 | f = 0.954 | f = 0.857 |
| | | Z _f = 10.6m | Z _f = 11.4m | Z _f = 11.0m |
| | 予測値 { | I _{opt} = 55.2 A | I _{opt} = 67.6 A | I _{opt} = 61.8 A |
| | | Pinj = 2.3 MW | Pinj = 2.8 MW | Pinj = 2.6 MW |
| ② 8 mm の場合 | 条件 { | Γ = 0.706 | Γ = 0.602 | Γ = 0.65 |
| | | <u>f = 0.741</u> | f = 1.18 | f = 0.958 |
| | | Z _f = 9.7m | <u>Z_f = 11.4m</u> | Z _f = 10.5m |
| | 予測値 { | I _{opt} = 60.4 A | I _{opt} = 92.8 A | I _{opt} = 75.5 A |
| | | Pinj = 2.5 MW | Pinj = 3.9 MW | Pinj = 3.2 MW |

9 mm の場合には、90kV、Γ = 0.70、62 A 程度が標準で、~2.6MW 程度が、8 mm の場合には、90kV、Γ = 0.65、76 A 程度が標準で、~3.2MW 程度が得られると予測できる。

(2) 短縮ギャップ長の選定

これまでの運転で、90kV 前後の電圧ならばパルス幅 3 秒程度の入射の場合にも比較的安定であるという実績がある。目標の 40MW をこの程度の電圧でクリアするためには、前項の予測結果からギャップ 9 mm ではパワー不足であり、ギャップ d₂ = 8 mm とすることに決定した。

5. 1. 3 8 mm ギャップの再予測

(1) 最適加速電流、入射パワー

最適加速電流予測値 I_{opt} は、前項と同様に求めた。なお、Γ = 0.65 の場合、加速電源の最大出力が 84.5kV であるため、前項の 90kV から 84.5kV の場合について予測した。入射パワー Pinj については、求めた I_{opt} と図 3. 3 の第 3 期イオン源の加速電流と入射パワーの特性カーブを用いて予測した。

Γ = 0.65、0.70 に対する各 I_{opt}、Pinj は次のとおりである。

Γ = 0.65、84.5kV では、I_{opt} = 69 A、P_{CM} = ~2.5 MW

Γ = 0.70、90kV では、I_{opt} = 64 A、P_{CM} = ~2.45 MW

これらの運転条件では、合計 Pinj として、33~34 MW と予測できる。

また、同様に、加速電流対入射パワーカーブから、90kV、50 A の時の Pinj 値を読取ると、

d₂ = 10 mm の場合、Pinj = 2.1~2.2 MW

| | |
|-------------------|------------------------------------|
| $d_2=11\text{mm}$ | $\text{Pinj}=1.8\sim 1.9\text{MW}$ |
| $d_2=14\text{mm}$ | $\text{Pinj}=1.7\sim 1.8\text{MW}$ |

となり、10mm は 11mm のおよそ 16% 増、11mm は 14mm のおよそ 6% 増で、短ギャップほど効率が高い傾向にある。10mm から 8mm としたことによるこの増分を、約 10% と仮定し、さらに $I_{opt}+10\%$ の電流値で運転することにより、90kV 付近の比較的安定な領域での 40MW 入射達成が可能と判断した。

なお、ビーム発散 $\omega_{1/6}$ は発散そのものを精度良く実測する手段がなく、加速電流対カロリメータへの入射パワー特性カーブから計算式で間接的に求めていることに起因する誤差が大きく、比較結果は参考扱いとした。

5. 2 第4期イオン源のパワー特性

5. 2. 1 特性試験結果

第4期イオン源($d_2=8\text{mm}$)の加速電流と入射パワーの関係を図5. 1に示す。

(1) 予測値との比較

第5. 1節の最適加速電流と入射パワーの各予測値との比較は次のとおりであり、実測データは予測値に対し、 I_{opt} 、 Pinj とも $\sim 5\%$ 程度の差であった。

| | 予測 | 実測 |
|----------------------|-------------|------------|
| $\Gamma=0.65$ 84.5kV | 69A、2.5MW | 66A、2.6MW |
| $\Gamma=0.70$ 90kV | 64A、2.45MW | 62A、2.55MW |
| $\Gamma=0.75$ 90kV | 56.5A、2.3MW | 54A、2.35MW |

(2) 40MW 到達の可能性

40MW の入射パワーを得る運転条件は、第4期イオン源では 95kV、 $\sim 75\text{A}$ である。

$$\Gamma=0.70 \quad 95\text{kV}, 75\text{A} \quad (I_{opt}+9\%) \quad , P_{CM}=3.0\text{MW}, P_{PG}=99\text{kW}$$

$$\Gamma=0.75 \quad 95\text{kV}, 70\text{A} \quad (I_{opt}+21\%) \quad , P_{CM}=2.9\text{MW}, P_{PG}=85\text{kW}$$

現状では、全ユニット 95kV での安定な運転は厳しく、また、 I_{opt} からの電流増分は+10%が上限である。このため、 $\Gamma=0.70$ とし、 $V_{acc}=90\sim 95\text{kV}$ 、 $I_{opt}+10\%$ 程度の条件で運転すれば、比較的安定に $\sim 40\text{MW}$ の入射が可能である。この条件でのPG熱負荷は、フィラメント、アークからの入熱分を差引くと99kWが66kW程度となり、許容範囲内である。

すなわち、第4期イオン源は、最適加速電流の増大により、第3期イオン源では 105kV、 $\sim 65\text{A}$ の運転が必要であったのに比べて、約 10 \sim 15kV 低い電圧で合計 40MW 前後の入射パワーが得られる。

5. 2. 2 運転結果

第4期イオン源は、1996年1月から本格的に運転を開始し、同年7月18日、JT-60実験放電番号 E26926 で、14ユニット合計でエネルギー 91.8 \sim 96.6keV、40MW を達成した。その時の結果を図5. 2に示す。

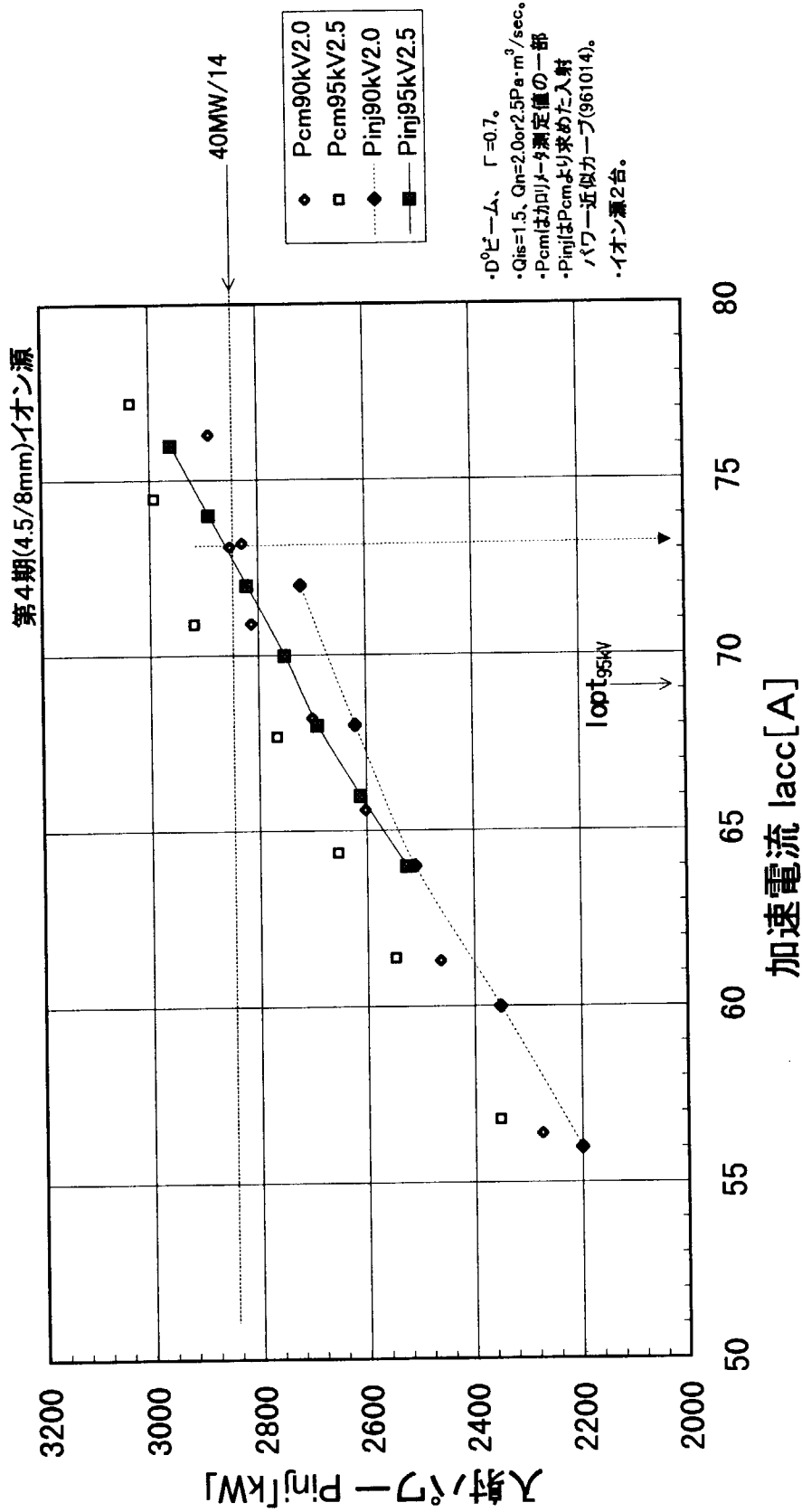


図5. 1 第4期イオン源の加速電流と入射パワーの関係 (重水素ビーム)
イオン源2台合計のデータを示す。

[Spec No. 070]

DATE: 96/07/18 t=0: 10:53:36

E026926

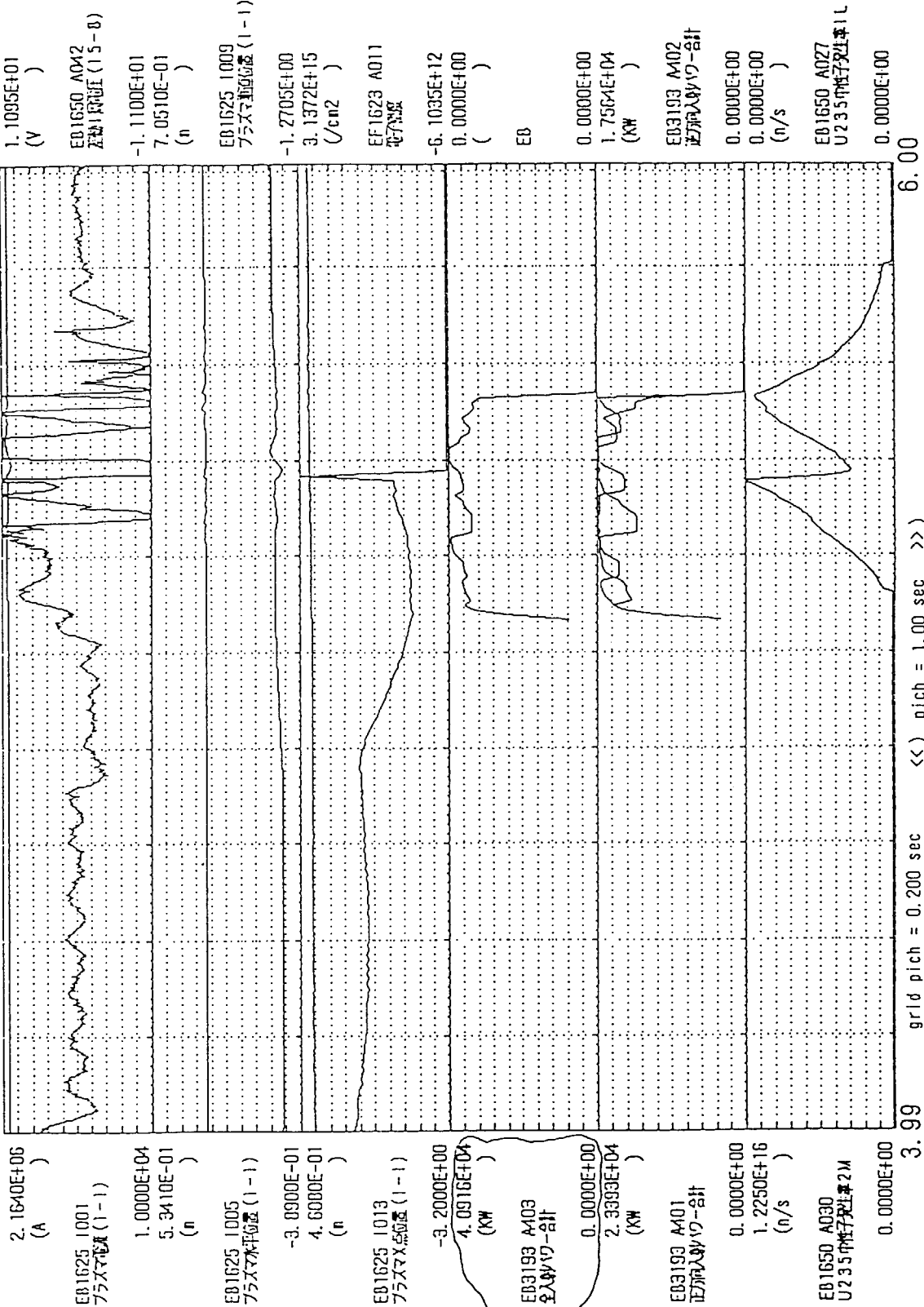


図5. 2 40MW 入射達成時の入射パワー、プラズマ電流等の波形
「EB3193A403 全入射パワー合計」の項目が合計入射パワーを示す。

6. まとめ

JT-60用正イオンNBIにおいて、イオン源を改造することにより入射パワーの増大を試みた。その結果は以下のとおりである。

1. ビームエネルギー 110keV、入射パワー 40MW を目標とした運転中、約 95kV 以上の領域で、運転時間に比例してイオン源外部の放電破壊の頻度が増加した。この原因は第1正、第2正間の絶縁スペーサ両端の印加電圧が瞬間的に絶縁耐電圧を超過するためとわかり、この対策として、沿面放電バイパス用球ギャップを取付け、解決できた。
2. 球ギャップ対策後、約 105kV 以上の領域の運転中に、放電破壊が頻発する現象が発生したため、さらに各種対策を実施したが、結局、加速部構造を根本的に改造しない限り、100～105kV 以上の領域の安定な運転は不可能であった。このため、95keV 程度の低エネルギーで、40MW 入射を達成することに方針転換した。
3. 高エネルギー用から大電流用とするために、一部ユニットを使って加速部ギャップ長を 10mm から 8mm に短縮しての特性試験を行なった。この結果、1ユニット当たり 2.86MW のパワーが得られることが確認できた。この結果をもとに、全 14 ユニット (28 台イオン源) のギャップ長の短縮化を実施し、1996年7月の実験運転において、重水素ビームにより 91～96keV で 40MW の入射パワーを達成した。

謝 辞

JT-60NBI用正イオン源のパワー増大のための各種検討を行なうにあたって、終始、暖かい励ましとご指導をいただきました核融合装置試験部並びに炉心プラズマ研究部両部の船橋部長及び核融合装置試験部の清水次長に感謝いたします。また、イオン源の各種特性、試験方法等についての有益なご助言をいただいた核融合工学部NBI加熱研究室の奥村室長、炉心プラズマ研究部計画室の石田主任研究員に感謝いたします。

参考文献

- [1] 栗山正明ほか：JAERI-M87-169, “JT-60粒子入射加熱装置の設計及び技術開発”(1987).
- [2] 河合視己人ほか：私信

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 |

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 | ジーメンス | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表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 | b |
| バール | 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 fm = 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

(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る。

換算表

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

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

動粘度 1 m²/s = 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 |

JT-60NB-1用正イオン源のパワー増大