



JAEA-Technology

2005-002



JP0650002

単段多孔型長ギャップ加速電極による 水素負イオンビームの加速

H⁻ Ion Beam Acceleration in a Single Gap Multi-Aperture Accelerator

渡邊 和弘 高柳 智弘 奥村 義和 花田 磨砂也
井上 多加志 柏木 美恵子 森下 卓俊 谷口 正樹

Kazuhiro WATANABE, Tomohiro TAKAYANAGI, Yoshikazu OKUMURA
Masaya HANADA, Takashi INOUE, Mieko KASHIWAGI
Takatoshi MORISHITA and Masaki TANIGUCHI

核融合研究開発部門
加熱工学研究グループ

Plasma Heating Technology Group
Fusion Research and Development Directorate

January 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

単段多孔型長ギャップ加速電極による水素負イオンビームの加速

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門
核融合エネルギー工学研究開発ユニット
渡邊 和弘・高柳 智弘⁺¹・奥村 義和・花田 磨砂也・
井上 多加志・柏木 美恵子・森下 卓俊⁺¹・谷口 正樹

(2005年11月7日受理)

高エネルギー負イオン加速器の単純化開発の初期試験として、負イオン引き出し部電極と接地電極から構成したギャップ長 0.5 m の単段多孔型加速電極による負イオン加速試験を行った。本加速電極を用いて長ギャップ耐電圧特性の測定及び改良を実施した後、水素負イオンビームの加速を行い、以下の結果を得た。

長ギャップにおける負極高電位部の電界緩和は、放電破壊を防止する観点で短ギャップの場合に比べてより重要であることが分かった。一方、接地電極側の電界集中部分に関する電界緩和は、耐電圧性能向上に殆ど寄与しないことを確認した。水素ガス導入による耐電圧上昇が従来の5段加速系と同様に観測されたが、耐電圧上昇の効果は5段加速系より顕著であり、ガスの導入により 300 kV 以上の耐電圧上昇が得られた。また、真空放電からグロー放電への遷移領域の圧力距離積($p \cdot d$ 積)は、ほぼ 0.2 Pa·m であり、他のギャップ長での測定値と良く一致することを確認した。14 mm ϕ の引き出し孔 25 個から水素負イオンを引き出し、500 keV、300 mA (82 A/m^2)、パルス幅 1 秒の負イオンビームを安定に加速した。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

⁺¹量子ビーム応用研究部門 陽子加速器施設開発ユニット

H⁻ Ion Beam Acceleration in a Single Gap Multi-Aperture Accelerator

Kazuhiro WATANABE, Tomohiro TAKAYANAGI⁺¹, Yoshikazu OKUMURA
Masaya HANADA, Takashi INOUE, Mieko KASHIWAGI,
Takatoshi MORISHITA⁺¹ and Masaki TANIGUCHI

Division of Fusion Energy Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 7, 2005)

As a study of simplification in a high energy negative ion beam accelerator, a single gap multi-aperture accelerator whose gap length is 0.5 m has been designed and tested. Experiments on the voltage holding characteristics of the long gap and the negative ion beam acceleration test have been performed.

It was confirmed that an effect of electric field relaxation at the negative high voltage side is effective to prevent breakdown. On the contrary, electric field relaxation at the ground potential side did not improve the voltage holding. An increase of the breakdown voltage by feeding hydrogen gas in the accelerator was observed. A high voltage of 300 kV was increased by gas feeding. A p.d (pressure x distance) product for a transition from vacuum breakdown to glow discharge was about 0.2 Pa.m, which agreed well with another condition of gap lengths. The negative hydrogen ion beams of 300 mA (82 A/m^2) was accelerated up to 500 keV for pulse duration of 1 s from 25 apertures of 14 mm in diameter each.

Keywords: Negative Ion, Acceleration, Long Gap, Electrostatic Accelerator, Single Stage Accelerator, Multi-aperture Accelerator

⁺¹Proton Accelerator Facility Development Unit, Quantum Beam Science Directorate

目 次

1. はじめに.....	1
2. 単段多孔型加速器構造と試験装置.....	1
3. 実験結果と考察.....	2
3.1 絶縁管の無負荷耐電圧特性.....	2
3.2 単段加速電極の耐電圧特性.....	4
3.3 電界緩和と電界形状修正リング.....	4
3.4 負イオンビーム加速試験.....	5
4. まとめ.....	6
謝辞.....	7
参考文献.....	7

Contents

1. Introduction.....	1
2. Configuration of Single Gap Multi-aperture Accelerator and experimental setup.....	1
3. Experimental results and discussion	2
3.1 Voltage holding characteristics of the insulator column	2
3.2 Voltage holding characteristics of the single gap multi-aperture accelerator....	4
3.3 Effect of field relaxation for the negative high voltage side and ground potential side	4
3.4 Negative ion beam acceleration	5
4. Summary.....	6
Acknowledgement.....	7
References.....	7

This is a blank page.

1. はじめに

核融合プラズマの加熱や電流駆動のためには、ビームエネルギーが 1 MeV 級の負イオン中性粒子入射装置(NBI)が必要とされている。国際熱核融合実験炉 (ITER) 用 NBI では、1 基あたり 1 MeV, 16.5 MW 入射の NBI が計画されており、1 MeV, 40 A 出力の負イオン源が必要である^[1]。この負イオン源においては、原子力機構が提案した 5 段の静電加速方式が基本方式として設計に採用されており、原子力機構では 5 段加速器による負イオン加速の開発試験を実施し^[2-5]、これまでに 200 mA 級の負イオンの 1 MeV 級加速に成功している^[6,7]。

原子力機構が 5 段の静電加速方式を提唱してきた理由は、耐電圧特性及びビーム光学制御の有利性からである。長さが 1 cm 以上のいわゆる真空長ギャップでの放電破壊機構は、破壊電圧がギャップ長の 0.5 乗に比例するというクランプ理論^[8]にほぼ従うため、ギャップを複数段に区切ることで、単一の長いギャップで構成するよりも高い耐電圧性能が期待できる。また、負イオンを収束良く加速するために電界レンズの効果を用いるが、多段構造であると中間電極の電位とギャップ長の調整で各段の電界を設定できるため、ビームの収束性を比較的容易に制御できる利点がある。

一方、フランスのカダラッシュ研究センターでは、多孔電極で引き出した負イオンを単孔の単段加速器で加速する SINGAP(Single Aperture Single Gap Accelerator)の開発が行われている^[9]。単段加速器は構造が単純であり、ビーム加速用電源に関しても中間電圧供給が不要となるなど、単純化、コスト低減の可能性がある。しかしながら、SINGAP で観測されているような高電圧印加時の大きな暗電流 (100 mA を超える)^[10]の発生や、長ギャップでの耐電圧特性など、実用化においては検討、解決すべき課題も有る。

原子力機構が進めている多段加速器においても、構造の単純化、コスト低減、電源システムの合理化という観点から、加速段数の低減合理化は魅力的である。そこで、段数低減化開発の試みとして、長ギャップ加速電極間の耐電圧性能や単段加速の場合のビーム加速特性について調べる目的で、ギャップ長が 515 mm の単段多孔型加速器を製作し、ビーム加速の初期試験を実施した。

2. 単段多孔型加速器構造と試験装置

図 1 に単段加速器の構造を示す。5 段の FRP 製絶縁管内部に組み込んである従来型の 5 段の加速電極を取り外し、引き出し部電極と接地電極のみを取り付けた構造である。負イオン生成部はカマボコ型負イオン源であり、そこで生成された負イオンは引き出し電極で引き出され、その下流の接地電極までの長い加速ギャップで加速される。引き出し部はプラズマ電極、引き出し電極、引き出し電極と同じ電位の電子抑制電極で構成されている。電極厚さはプラズマ電極から、それぞれ 2 mm、11 mm、3 mm で、ギャップ長はそれぞれ

5.8 mm、2 mm である。加速ギャップの長さ、すなわち電子抑制電極の下側面から接地電極上面までが 515 mm である。ビーム引き出しの孔は円形で直径は引き出し部が 14 mm、接地電極では 16 mm である。本実験では、25 個 (5x5) の引き出し孔を用いた。

この電極構成でのビーム軌道計算の例を図 2 に示す。本計算の例は、引き出し部の電流密度を 25 mA/cm^2 とした場合である。負イオン引き出し部で引き出されたビームは、加速ギャップの前半部で収束され、その後ほぼ直進し接地電極孔を通り抜けていることが分かる。本軌道計算の結果から、引き出し電圧、加速電圧、負イオン電流密度の調整、いわゆるビームパービアンスを調整すれば、単段の多孔電極でもビームを収束性良く加速できることが期待できる。しかしながら、実際の加速系では、図 1 に示すように接地電極支持枠が引き出し部に向かって立ち上がっているため、支持枠形状を含めた全体の電界は加速ギャップ間で湾曲している。湾曲した電界では、多孔の引き出し部を出たビームレットは電極の中央部に向かって偏向され、ビーム軸のずれにより接地電極への衝突や接地電極孔の変位と同様な効果によりさらにビームが大きく偏向される恐れがある。これを防ぐために、後述するリング電極を設計し、平行電界になるように電界の湾曲を修正した。

また、本単段加速器では、加速管の真空と絶縁を司る FRP 円筒絶縁管の真空側内面がビームから直接見通せる構造となる。この場合、ビーム加速時に耐電圧の著しい低下が生じる恐れがある。これは、絶縁体内面がビームからの光子等で照射され帶電により電位分布の不均一が生じ沿面放電に至るためと考えられる。防止策として、ビームから絶縁体面が直接見込めないように遮蔽することが必要である。さらに、この遮蔽はフランジ等の金属部から放出した電子が FRP に直接入射しないようにするためにものもあり、加速管の耐電圧向上に重要な働きを持つ。

初めに、シールドが加速管の耐電圧特性に与える効果や影響を調べるために、図 3 に示すように MeV 加速管の内部電極を取り外し、加速管のみでの耐圧と、図 4 に示すように内部シールドを装着しての耐圧特性の比較を行った。次に、接地電極を組み込み单段多孔の加速ギャップ構成とし負イオンの加速を行った（図 1 の構造）。加速試験では、前述した湾曲電界の修正用リング電極に関しても、耐電圧への影響やビーム偏向修正の効果について調べた。

加速した負イオンビーム電流を、接地電極から 2.8 m 下流に設置したカロリーメータで熱的に測定した。接地電極の熱負荷については、電極の冷却水の温度上昇から求めた。

3. 実験結果と考察

3. 1 絶縁管の無負荷耐電圧特性

まず、従来の 5 段加速系電極を取り外し、図 3 に示すように絶縁管とフランジだけの構

成とした。さらに、絶縁管の内面を荷電粒子や光子から遮蔽するためのアルミ製内部シールドを取り付けた。構造を図 4 に示す。取り付けの様子を図 5 に、取り付け後の内部の様子を図 6 に示す。図 7 には、内部シールド部における電界計算の例を示す。内部シールドの上下の電極は上方が負極性となる。そのシールド電極から電子が放出しても、絶縁体表面に向かって電子が加速されないような電界構造とするため、上側のシールド先端を加速管内側にし、下側シールド先端は外側すなわち FRP 絶縁管側になるようにした。

耐電圧性能に与える内部シールドの効果や影響を調べるために、シールドを装着しない場合と、装着した場合の両方について耐電圧特性を比較した。図 8 に、内部シールド電極の有無による耐電圧特性の比較を示す。内部シールドを付けない場合、約 10 時間のコンディショニングを行っても 400 kV から 600 kV 程度の電圧で放電破壊が発生し、耐電圧は飽和する傾向になった（▲印）。このため、これ以上のコンディショニングは中止した。放電破壊は、FRP 最上段の上側（定格運転時 -1 MV 電位）と下側（定格運転時 -0.8 MV 電位）部との間で頻繁に発生していることが各電位部の電流信号測定から明らかになった。この原因として、図 3 の負イオン源を取り付けてある高電位フランジの角部から放出された電子が最上部の FRP 面に入射している等の影響と考えられる。この時点で、水素ガス 0.08 Pa 程度の導入を行えば、耐電圧は 1,000 kV に上昇することを確認した。

ここで、内部シールドを取り付けて耐電圧特性を比較した。図 8 の●印がその特性である。10 数時間のコンディショニングで 800 kV に到達し、明らかに内部シールドを取り付けない場合に比べて耐電圧性能が向上していることが確認できた。また、ばらつきは有るが水素ガスの導入を行うと 1,000 kV まで上昇した。内部シールドを装着した状態での水素ガス圧力の変化による耐電圧特性を図 9 の●印で示す。真空状態から水素ガスを導入し圧力を上昇して 0.05~0.08 Pa 程度の圧力領域になると耐電圧の上昇が見られた。0.1 Pa 以上の圧力まで水素ガスを導入するとグロー放電の開始により耐電圧は急激に低下した。

本装置では加速管外部の絶縁に SF₆ を用いている。負イオン加速実験には直接の関係は無いが、もし SF₆ が加速管の内部にリークした場合、耐電圧性能がどのように影響を受けるかを把握する目的で、SF₆ 導入による耐電圧の変化についても測定した。図 9 の▼印で示す。水素との差は明らかであり、0.004 Pa 程度で耐電圧の上昇があるものの、それ以上の圧力ではグロー放電が発生し耐電圧は急激に低下することが分かった。このように耐電圧確保の観点からも SF₆ のリークには注意が必要なことが分かった。

図 10 には、加速管に電圧を印加した場合のリーク電流と遮蔽ピット内の加速管取付位置の下方床面に置いた X 線モニターでの X 線強度の変化を示す。X 線測定は、電子の加速の状態を間接的に把握する方法として有効である。リーク電流は、高電位部のイオン源を冷却するための純水冷却系ウォーターチョークに流れる電流が殆どである。水素ガスを導入しない場合、約 700 kV までの電圧印加では X 線モニター値の上昇は見られないが、700 kV を超えて電圧を上げると 11 mSv/h が検出された。それ以上電圧を上昇したところ放電破壊が発生した。これに対して、水素ガスの導入を行うと、放電破壊に至る 800 kV までの電圧

印加ではX線のモニター値に変化はなかった。電流値に関しては前述のとおり双方とも冷却水ウォーターチョークのリーク電流が電子放出電流に比べて大きいため、電子放出成分を区別して測定することはできなかった。しかし、X線の強度の違いから加速管内部での電子放出と加速が、水素ガス導入によって抑制されていることが分かる。

3. 2 単段加速電極の耐電圧特性

接地電極側を組み込んだ状態（図1）での、放電破壊電圧のガス圧力依存性を図11に示す。○印は運転開始直後の特性で、●印は約20時間のコンディショニング後のデータである。このコンディショニングによって約100kVの耐電圧上昇が見られたが、真空領域での耐電圧は300kV程度であった。水素ガスを導入し圧力を0.3Pa程度まで上げると耐電圧が上昇し600kVを超えた。

3. 3 電界緩和と電界形状修正リング

単段加速試験電極では、接地電位の電極支持枠が負イオン引き出し部電極に向かって突出した形状になる。この場合、加速ギャップの電界形状は、接地電極支持枠の凸形状によって湾曲される。多孔電極から負イオンビームを引き出す場合には、電界の湾曲による凸レンズの効果で周辺部のビームが中心部に集束偏向される。本加速器のように特に長いギャップでは、電極孔の軸に対する負イオンの曲がりが無視できず、ビーム全体の直進性が悪化する他、接地電極の熱負荷の増加や電極へのビーム衝突による放電破壊の増加などが危惧される。

そこで、接地電極の周辺部に、加速管ギャップの電界を平行電界に修正するためのリング電極を設計し設置した。図12-1、12-2に電界計算による比較を示す。直径140mmのリング電極の適用によってギャップ間電界の形状が改善され、多孔部の領域においてはほぼ平行電界が形成されることがわかる。さらに、接地電極周辺部の角における電界集中は、印加電圧を1MVとした場合、リング電極の取り付け前が9.7kV/mmであるのに対して、設置後には7.3kV/mm程度まで低下し加速絶縁管内部シールドの先端部の電界とほぼ等しくなっている。図13に接地電極に電界形状修正リングを取り付けた写真を示す。

この電界修正リングの耐電圧に及ぼす影響を調べた。その結果、本電界修正リングの有無によっては、真空領域での耐電圧は殆ど変化が見られなかつた。則ち、接地側電極の電界集中点の電界をこの程度変えても図14に示すとおり放電破壊電圧は、図11の場合とほとんど変わらないことが分かつた。

この接地側の電界緩和に対して、負極高電位側の電界緩和の効果を調べた。引き出し電極の支持枠下面には、引き出し電極への冷却水供給パイプ等の突起物が有るため小型のカバーを設けている。長ギャップの場合、これらのカバーも等価的に突起物になると考えら

れる。これらの電極支持柱全体を覆い電界集中をできるだけ防ぐために図 15 に示す円形のシールド板を取り付け、耐電圧特性の変化を調べた。

図 16 に、負極高電位側のシールド板の有無による耐電圧特性の比較を示す。△印がシールド板を付けない場合であり、30 時間のコンディショニングを行った段階で耐電圧は僅か 300 kV で飽和している。これに対して、負極側シールド板を取り付けた場合にはコンディショニングと共に耐電圧は上昇した。80 時間程度のコンディショニングで 550 kV 程度まで上昇し、まだ飽和の傾向は見られなかった。従来の 5 段加速の場合には、300 kV で耐電圧が飽和することは無かった。これらの結果から、長ギャップにおいては特に負極高電位側の電界の緩和が耐電圧向上に重要性なことが確認できた。

また、加速器の長ギャップにおいて、真空放電からグロー放電への移行の領域を確認するために、圧力を変えて放電電圧を測定した。図 17 に、圧力・ギャップ長積($p \cdot d$)について、本加速電極系と電極を付けないで測定したギャップ長 1.8 m 相当の結果^[3]を比較のために示す。ギャップ長が大きく異なる 2 つの場合でも、真空放電からグロー放電への移行領域が約 0.2 Pa·m 付近であり、よく一致していることが確認できた。

3. 4 負イオンビーム加速試験

接地電極の端部に設けたリング電極は、前述の通り多孔引き出し電極からのビームが電界の湾曲によって偏向されることを防ぐためのものであり、加速ギャップ間の電界を平行電界に修正するためのものである。負イオンビームを引き出し加速した場合において、修正リングの有無での接地電極の熱負荷とカロリメータでのビームパワーの変化を比較した。

図 18 に接地電極熱負荷の測定結果を示す。双方でのビーム条件はほぼ一定とした。電界修正リングを設けて電界の湾曲を修正することにより、接地電極の熱負荷が 5~10% 低減されていることが分かる。

図 19-1、19-2、19-3 に、負イオンビーム加速における、引き出し電流、加速電流、ターゲットで熱的に測定した負イオン電流についてのアークパワー依存性を示す。各々の図には負イオン生成部のガス圧力を 0.2 Pa と 0.7 Pa の 2 通り変えた場合について記してある。加速電圧は、耐電圧が安定に得られる 500 kV に固定し、引き出し電圧は 4.4 kV とした。この運転では、負イオン源にセシウムを添加した。セシウム効果によって、アークパワーに比例して負イオン電流が増加している。引き出しの孔数は 25 個であり、0.2 Pa では最大 185 mA (ビーム電流密度 48 A/m²)、0.7 Pa では最大 315 mA (ビーム電流密度 82 A/m²) のビームを安定に加速した。軌道計算では、1 MeV の加速エネルギーの場合、引き出し面での負イオン電流密度が約 250 A/m² 付近で収束性の良いビームが得られている。今回の実験ではエネルギーは 500 keV であり、軌道計算からのペービアンスで換算すると 88 A/m² の負イオンビーム電流密度の条件が収束性の良いビームの条件である。本加速器でのストリッピング等を考慮しても上記ビーム電流密度の条件は、収束性の良いビーム条件の領域にあると

言える。

図 20 に、上記負イオンビーム加速時における接地電極の熱負荷とビーム電流測定用のカロリメータへの熱負荷についてのアークパワー依存性を、加速管への入力電力に対する比率としてプロットした結果を示す。アークパワーを増すことによって負イオンの電流密度が上昇し、ビーム光学上収束が良くなる。この効果で、ビームは接地電極孔を通過する割合が増し、ターゲットの熱負荷割合が増加していることが分かる。

しかしながら、5段加速系での同様な条件での接地電極の熱負荷が 3%以下であるのに対して、単段多孔型の本加速器では 20%以上有る。ビームレット周辺の発散角の大きなビーム成分や加速途中での剥離電子の衝突によるものと考えられる。5段加速器では、ビームレット周辺部の発散性のビーム成分や加速途中での剥離電子が各中間電極に入射して熱負荷が分担されるが、本方式のような単段多孔電極では、それらを接地電極が受けになる。今後、大出力長パルス加速を行う場合には、改良すべき点である。

4. まとめ

MeV 級負イオン源加速管において、単段多孔型の加速器による負イオン加速試験を行い、以下に示す結果を得た。

- 1) 長ギャップ加速器において、接地電極側の電界緩和の効果は、耐電圧性能向上にほとんど寄与しないことが確認された。これに対して、負極高電位側の電界緩和は耐電圧の改善に有効であった。耐電圧はエージングの運転時間に線型的に上昇し、80 時間のコンディショニング運転で 560 kV まで上昇した。
- 2) 本加速器のような長ギャップにおいては、負極高電位の電界緩和は短ギャップの場合よりもより重要であり、電界緩和を施さないと極めて低い電圧で放電が生じた。
- 3) 水素ガス導入による耐電圧上昇が 5段加速系と同様に観測されたが、耐圧上昇の効果は 5段加速系より顕著であり 200 kV から 600 kV へ上昇した。シールドを装着した条件下では水素ガス導入により耐電圧は 500 kV から 880 kV に上昇した。
- 4) 真空放電からガス放電（グロー放電）への遷移領域の圧力距離積（ $p \cdot d$ 値）は、0.5 m のギャップ長の場合にも 0.2 Pa·m 付近であることが確認できた。
- 5) 接地電極の周囲に設置したリング電極により、加速ギャップ間の電界の平行度が修正され、各ビームレットがほぼまっすぐに取出されることが確認できた。このことは、接地電極の熱負荷の低下からも確認できた。
- 6) 加速管周囲の SF_6 ガスが加速管内部ヘリーケンした場合を想定して、 SF_6 の導入による耐電圧特性を調べた。その結果、 $p \cdot d$ 特性は水素よりも低い値側にずれることを確認した。 SF_6 ガスを絶縁に用いる場合に、真空側へのリーケが生じた場合、水素に比べて少量でもグロー放電の発生による耐電圧低下が生じることに注意が必要なことが分かった。

- 7) セシウム導入により負イオン電流を増加させ、500 keV、0.3 A、電流密度 82 A/m^2 、パルス幅 1 s の負イオンビームを単段多孔型加速器により加速した。
- 8) 本加速器で測定した接地電極の熱負荷は約 20% であり、5 段加速器の接地電極熱負荷が 3% 以下であるのに比べて大きい。長パルス、大電流加速に向けては改良が必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、装置の組み立て及び運転に協力頂いた原子力エンジニアリング(株)の大槻晋之氏に感謝致します。有意義な議論や助言を頂いた坂本慶司加熱工学研究グループリーダをはじめとするグループの皆様に感謝致します。また、論文内容について議論頂いたトカマクシステム開発ユニット山本巧研究主席に感謝致します。さらに、終始激励をいただきました高津英幸核融合エネルギー工学研究開発ユニット長、関省吾研究開発推進室長、関昌弘核融合研究開発部門長に深く感謝致します。

参考文献

- [1] P.L. Mondino, P. Bayetti , E.Di. Pietro, R.S. Hemsworth, H. Iida, T. Inoue, K. Ioki, G. Jhonson, A. Krylov, V. Kulygin, P. Massmann, K. Miyamoto, Y. Okumura, A. Panasenkov, R.T. Santro, M. Shironi, Y. Urin, K. Watanabe, M. Yamada, Nuclear Fusion **40**(3Y) 501-507(2000).
- [2] T. Inoue, E. Di Pietro, M. Hanada, R. S. Hemsworth, A. Krylov, V. Kulygin, P. Massmann, A. Panasenkov, E. Speth, K. Watanabe, "Design of neutral beam system for ITER-FEAT", Fusion Engineering and Design **56-57**(2001) 517-521.
- [3] K. Watanabe, T. Amemiya, M. Hanada, T. Iga, T. Imai, T. Inoue, M. Kashiwagi, M. Kuriyama, T. Morishita, Y. Okumura, T. Takayanagi, T. Yamamoto, "Development of a large volume negative-ion source for ITER neutral beam injector", Review of Scientific Instrum., Vol.**73**. 2. 1090-1092(2002).
- [4] M. Taniguchi, M. Hanada, T. Iga, T. Inoue, M. Kashiwagi, T. Morisita, Y. Okumura, T. Shimizu, T. Takayanagi, K. Watanabe, and T. Imai, "Development of high performance negative ion sources and accelerators for MeV class neutral beam injector", Nuclear Fusion **43**, 665-669(2003)
- [5] T. Inoue, M. Hanada, T. Iga, M. Kashiwagi, M. Kawai, T. Morishita, M. Taniguchi, N. Umeda, K. Watanabe, T. Yamamoto, "Accelerator R&D for JT-60U and ITER NB systems", Fusion Engineering and Design **66-68**, 597-602(2003).
- [6] T. Inoue, M. Taniguchi, M. Dairaku, M. Hanada, M. Kashiwagi, T. Morishita, K. Watanabe and T. Imai, "Acceleration of 1 MeV, 100 mA class H- ion beams in a proof-of-principle accelerator for ITER", Review of Scientific Instruments **75**(5), 1819-1821(2004).

- [7] T. Inoue, M. Taniguchi, M. Kashiwagi, M. Dairaku, M. Hanada, K. Watanabe and K. Sakamoto, "1MeV, Ampere class accelerator R&D for ITER", 4th IAEA Technical Meeting on Negative Ion Based Neutral Beam Injectors, Padova, May 9-11(2005).
- [8] L. Cranberg, J. Appl. Phys.**23**, 5,518(1952).
- [9] P. Massmann, et al., "European contributions to the beam source design and R&D of the ITER neutral beam injectors", 16th IAEA Fusion Energy Conference, Montreal, Oct. 1996.
- [10] L. Svensson, D. Boilson, H. L de Esch, R. S. Hemsworth, A. Krylov and P. Massmann, "Latest results from the Cadarache 1 MV SINGAP experiment", 22th Symp. on Fusion Technology, Sep.9-13, Helsinki, 2002.

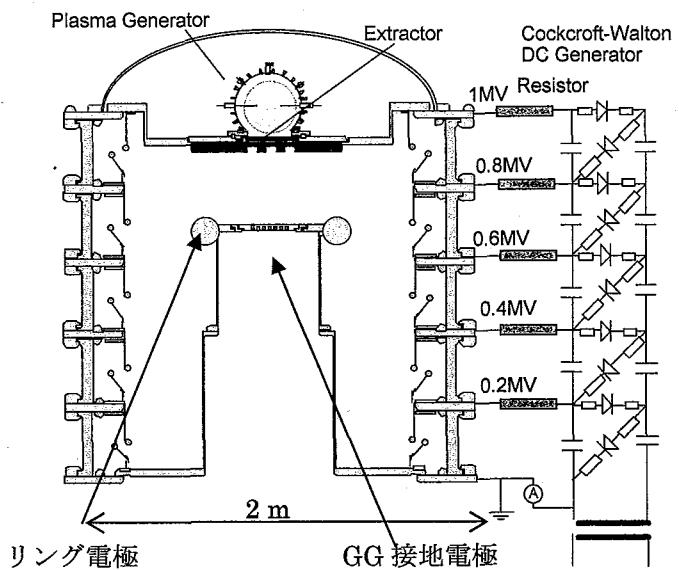


図1 多孔单段加速器の構造と電源接続図

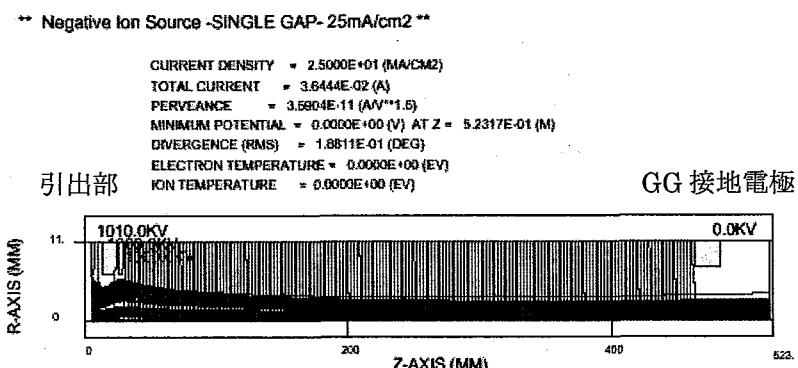


図2 単段ギャップの軌道計算例

1 MeV、25 mA/cm²の電流密度の水素イオンビームの軌道。加速ギャップ後半で幾分広がる傾向にあるが、ビームは 515 mm の長ギャップで加速され接地電極孔を通過している。

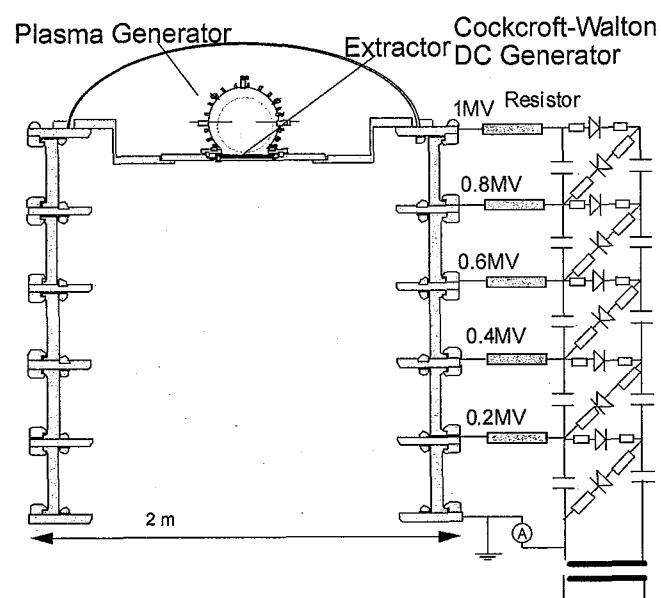


図3 内部の電極を取り外し、加速管絶縁体だけにした場合

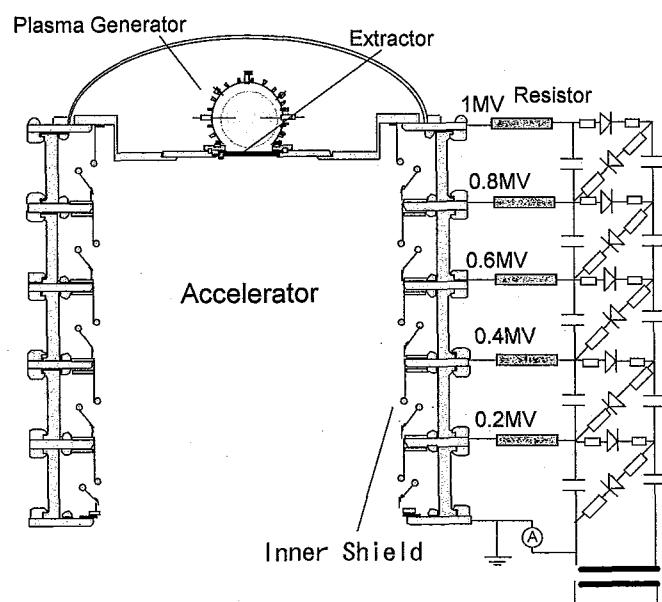


図4 内部シールドを取り付けた構造



図5 内部シールド取り付け作業

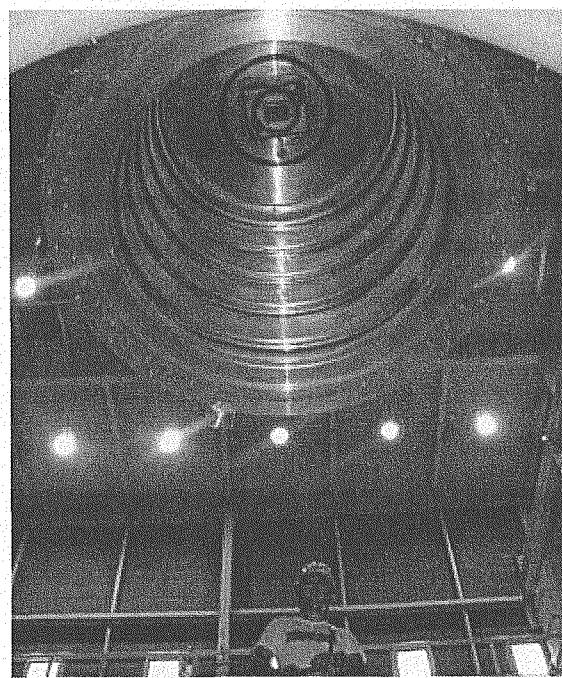


図6 内部シールド取り付け後
FRP 絶縁管内面はシールドによって完全に見えない

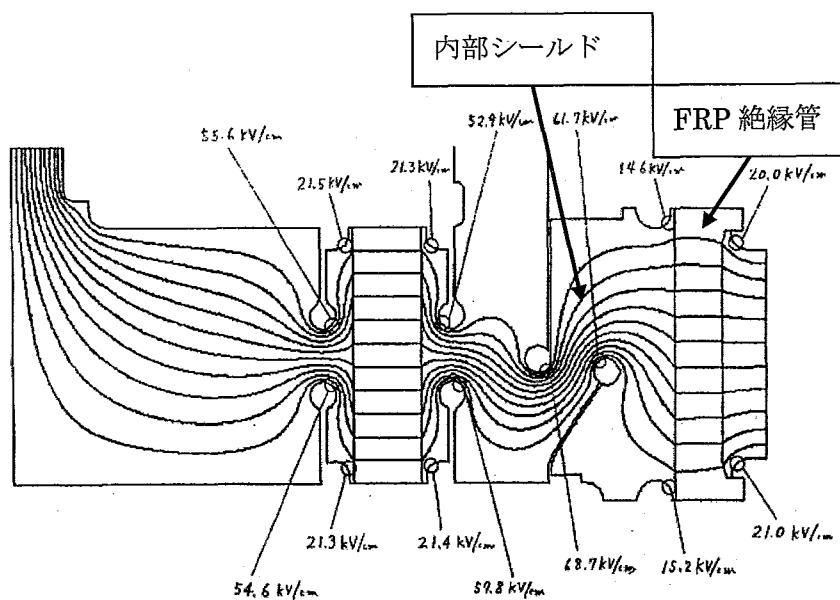


図 7 内部シールド周辺の電界計算

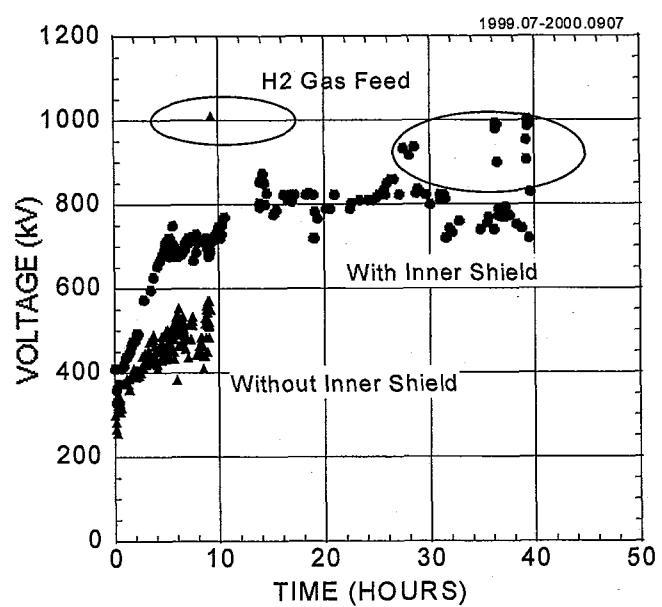


図 8 内部シールドの有無による耐電圧の変化

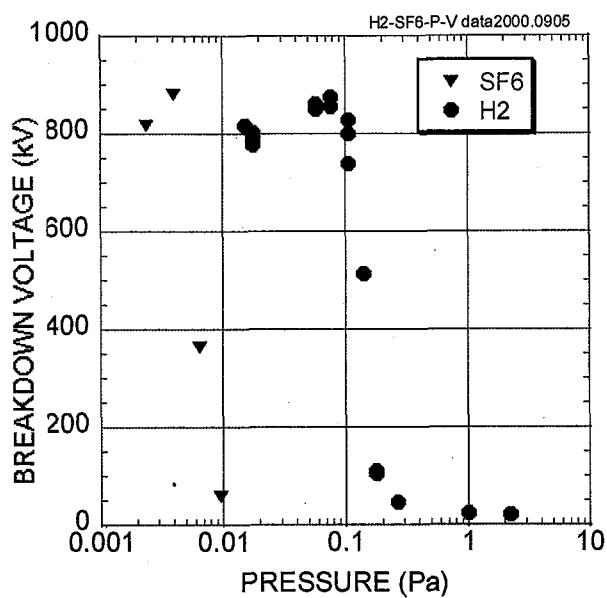


図 9 SF₆ ガスと水素ガス導入の違い（双方絶対圧に換算）

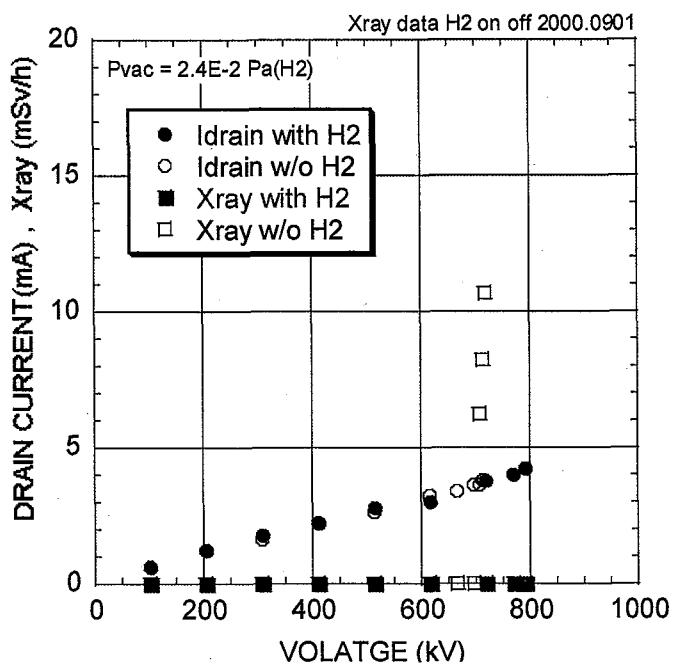


図 10 水素ガス導入による耐電圧の上昇とX線発生の抑制
Idrain は電圧印加時の全リーキ電流であり、ほとんどが冷却水ウォーターチョークに流れる電流である

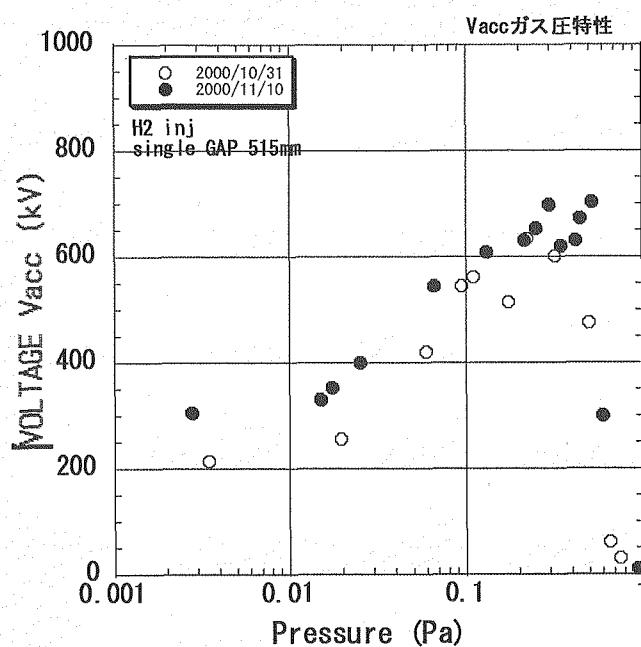


図 11 単ギャップの耐電圧特性（接地電極及び引き出し部のシールドを付けない状態）
ギャップが短くなった分、耐圧特性が圧力の高い方へずれている

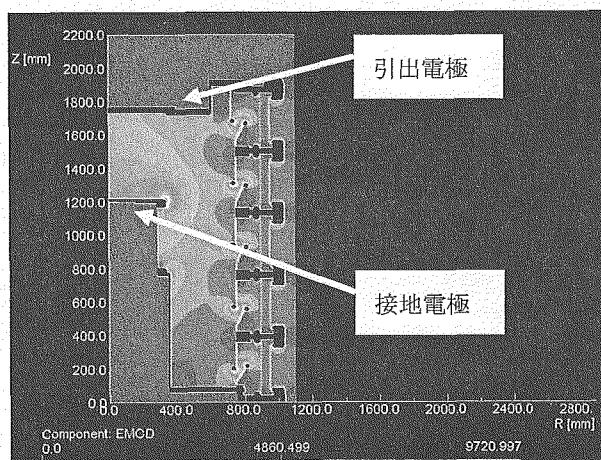


図 12-1 電界計算結果
リング電極を取り付けない場合の電界形状と電界集中。加速ギャップ間の電界が湾曲している。接地電極端部の電界は 9.7 kV/mm 程度。

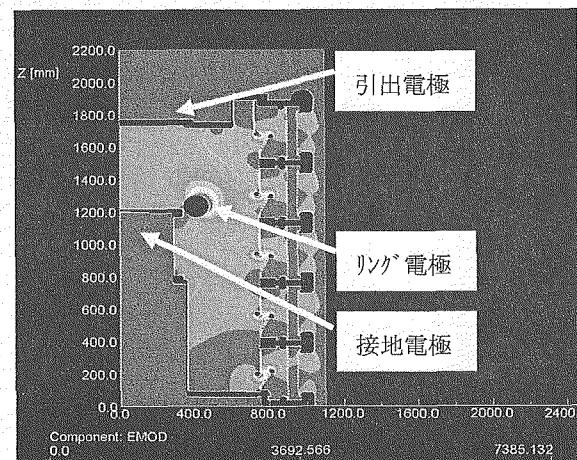


図 12-2 電界計算結果
リング電極を取り付けた場合の電界。
加速ギャップ間の電界は平行電界に改善されている。接地電極端部（リング電極部）の電界は 7.3 kV/mm に低減。

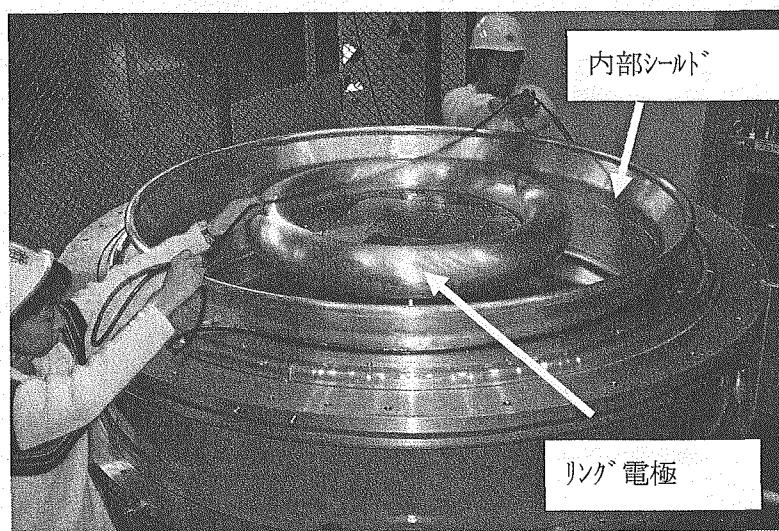


図 13 接地電極とリング電極
接地電極周辺部角の電界緩和とギャップ間電界形状を平行電界にするため
のリング電極を装着

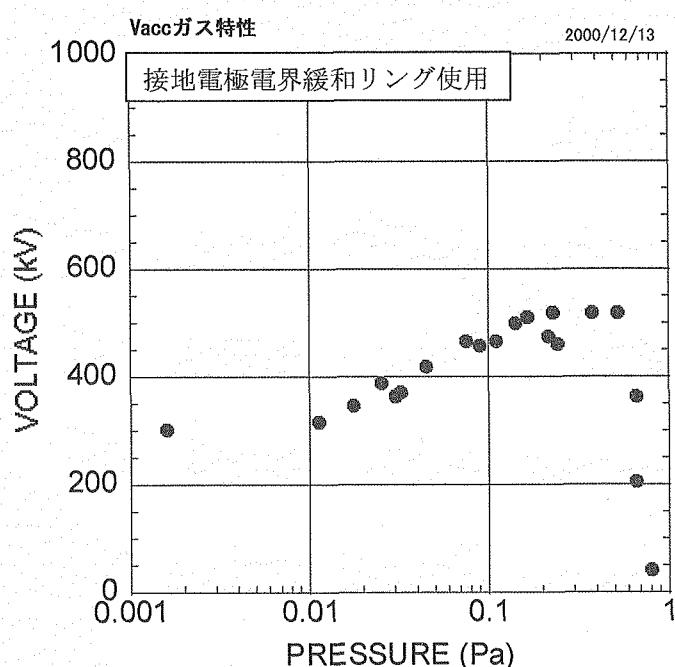


図 14 接地側のリング電極のみを付けた場合の耐電圧のガス圧力特性

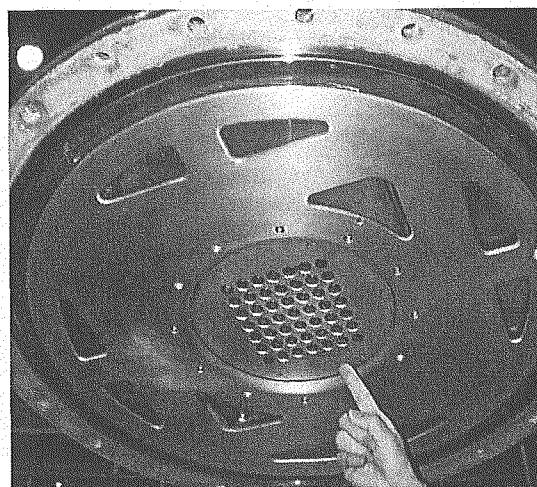


図 15 高電位側（負極）のシールド
引き出し電極下面に取り付け、冷却水絶縁管部の小型シールド板などの突起物
全体をカバー。指し示しているのは、引き出し電極部。

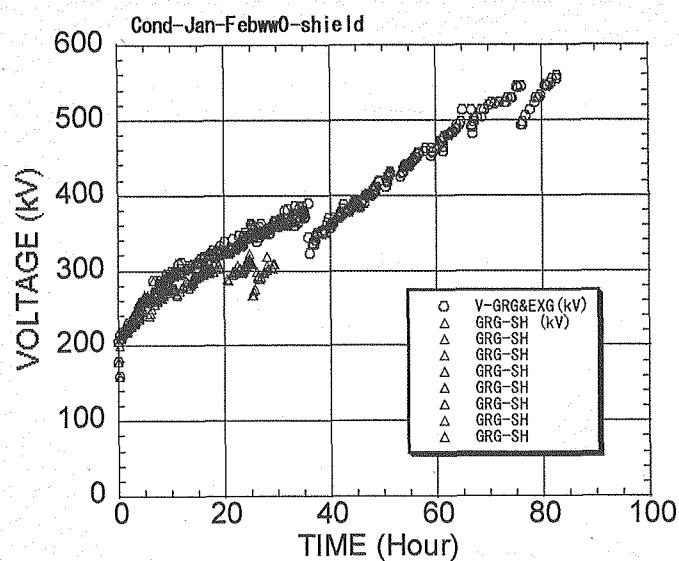


図 16 耐電圧特性
接地電極側のリング電極のみの場合 (△) と負極高電位側 (引き出し部側) へも電界緩和シールドを取り付けた場合 (○)
の比較

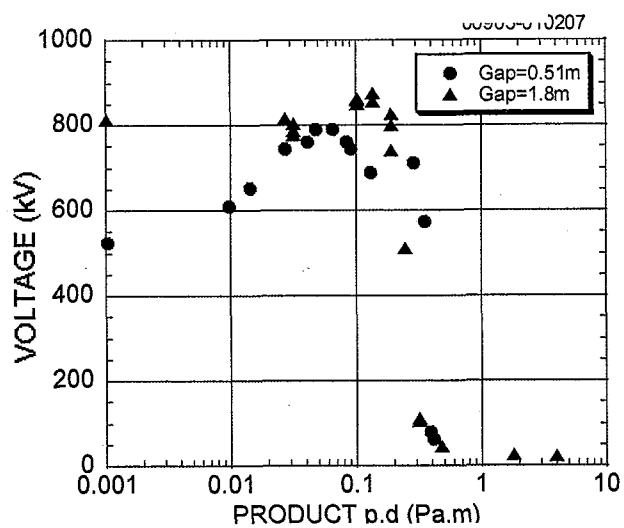


図 17 ギャップを変えた場合の $p\cdot d$ 特性

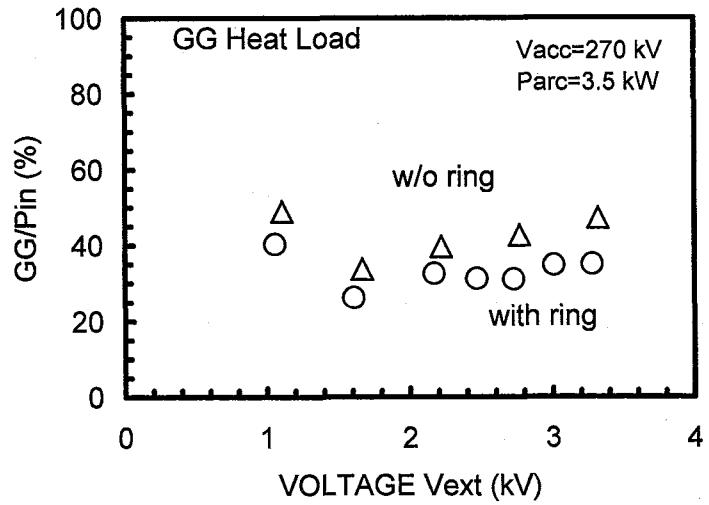


図 18 リング電極の装着前後の接地電極熱負荷

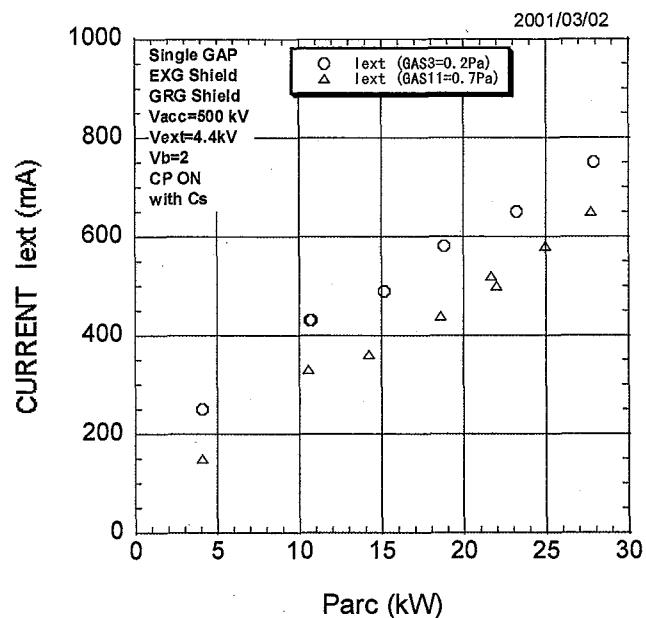


図 19-1 引出し電流のアークパワー依存性

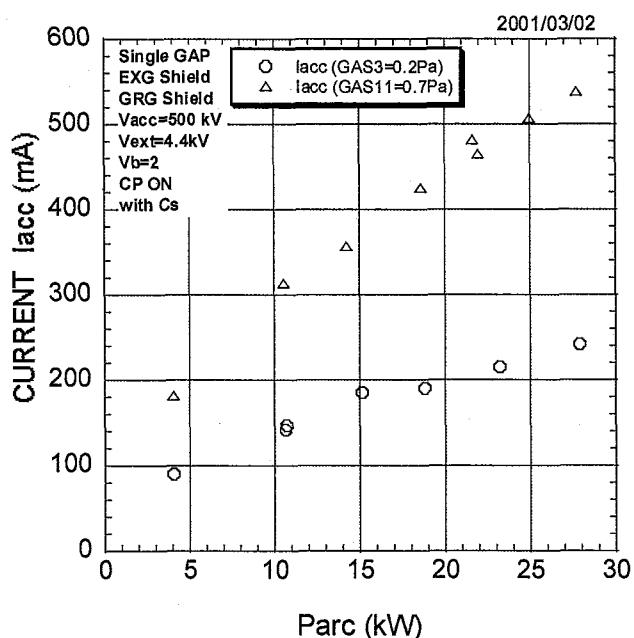


図 19-2 加速電流のアークパワー依存性

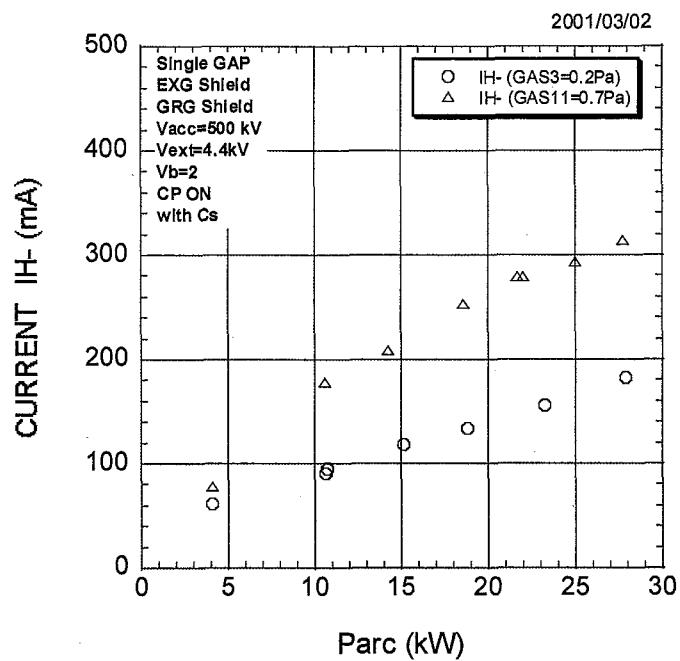


図 19-3 負イオン電流のアークパワー依存性
500 keV, 315 mA (82 A/m²) のビームを加速した

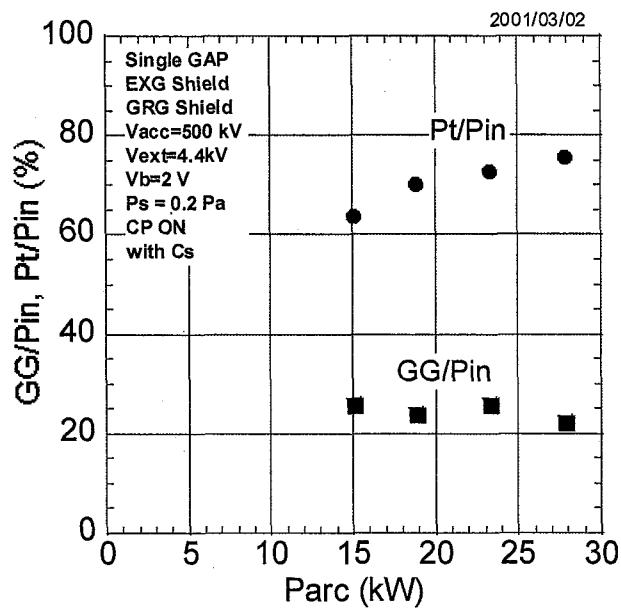


図 20 接地電極熱負荷および負イオン電流のアークパワー依存性
加速管への入力電力に対する比率としてプロットしたもの