

JAERI-Research

99-013



JP9950121



多孔電極負イオン源における
ビームレット相互作用

1999年2月

藤原幸雄・花田磨砂也・河合憲一・北川 禎
宮本賢治・奥村義和・渡辺和弘

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。
入手の問い合わせは、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、お申し越し下さい。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）で複写による実費領布を行っております。

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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

多孔電極負イオン源におけるビームレット相互作用

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

藤原 幸雄・花田磨砂也・河合 憲一*・北川 禎
宮本 賢治・奥村 義和・渡辺 和弘

(1999年1月26日受理)

多孔電極から水素負イオンを引出・加速した際に収束性の悪化につながりかねないビームレット同士の相互作用を実験により調べた。その結果、空間電荷効果のため周辺部のビームレットは外側に大きく偏向されることが明らかとなった。パービアンス一定条件におけるビームエネルギー依存性を86keV～178keVの範囲で調べ、ビームレット相互作用の影響がビームエネルギーにほとんど依存しないこともわかった。また、イオンに付随する電子の影響は極めて小さいことも確認された。反発力の重ね合わせ効果を考慮する場合には、半径方向の反発力と距離 r の関係は $1/r^2$ で近似できることを示した。得られた結果をJT-60用大型負イオン源に適用すると、両端のビームレットは6.6mrad程度外側に偏向を受けるものと算出された。ビームレット相互作用の補正法として電極のShapingを検討し、2次元ビーム軌道計算によりその有効性を示した。

Beamlet Interaction in Multi-aperture Negative Ion Source

Yukio FUJIWARA, Masaya HANADA, Kenichi KAWAI*
Tadashi KITAGAWA, Kenji MIYAMOTO, Yoshikazu OKUMURA
and Kazuhiro WATANABE

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

(Received January 26, 1999)

Beamlet interaction, which may deteriorate beam convergence, was studied in a high-current negative ion beam composed of multiple beamlets. Experimental results demonstrated that deflection angle of beamlets at the edge of a beam was larger than that at the center of a beam because of space charge effect. The deflection angle was independent of the beam energy ranging from 86 keV to 178 keV at the same perveance. Effect of electrons accompanying negative ions was confirmed to be negligible. It was shown that repulsive force due to space charge effect was inversely proportional to the square of distance. The maximum deflection angle of a large negative ion source for the JT-60 N-NBI system was estimated to be about 6.6 mrad based on the obtained results. Shaping of a grid was proposed to compensate the beamlet interaction. Beam orbit simulations indicated the effectiveness of the shaping.

Keywords: Beamlet Interaction, Multi-aperture, Multiple Beamlets,
Deflection, Negative Ion Source, Neutral Beam Injector,
Space Charge Effect

* Fellow of Advanced Science

目 次

1. はじめに	1
2. ビームレット相互作用	2
2.1 原理	2
2.2 ビームエネルギー依存性	3
2.3 電子の影響	4
2.4 水素と重水素の同位体効果	5
3. 実験装置および方法	5
4. 実験結果および考察	6
4.1 ビームプロファイルの例	6
4.2 ビームエネルギー依存性	6
4.3 バイアス電圧依存性	7
5. ビームレット相互作用の定量化	7
5.1 電界の重ね合わせと偏向角の定量化	7
5.2 JT-60用大型負イオン源におけるビームレット相互作用の評価	10
6. ビームレット相互作用の補正法	10
7. ま と め	11
謝 辞	11
参考文献	12
付 録	30

Contents

1. Introduction	1
2. Beamlet Interaction	2
2.1 Principle	2
2.2 Beam Energy Dependence	3
2.3 Effect of Electron	4
2.4 Isotope Effect of Hydrogen and Deuterium	5
3. Experimental Apparatus and Measurements	5
4. Experimental Results and Discussion	6
4.1 Examples of Beam Profiles	6
4.2 Beam Energy Dependence	6
4.3 Bias Voltage Dependence	7
5. Evaluation of Beamlet Interaction	7
5.1 Superposition of Electric Field and Quantification of Deflection Angle	7
5.2 Estimation of the Beamlet Interaction in a Large Negative Ion Source for the JT-60 N-NBI System	10
6. Method for Compensating the Beamlet Interaction	10
7. Summary	11
Acknowledgments	11
References	12
Appendix	30

1. はじめに

高エネルギーの水素あるいは重水素イオンビームは核融合プラズマの有力な加熱方法として利用されている。これらのイオンビームは、核融合プラズマを閉じ込めている強力な磁場を通りぬけるように電氣的に中性化され、最終的には中性粒子ビームの形態としてプラズマに入射される。このような加熱方法は中性粒子入射(NBI)加熱法と呼ばれ、JT-60(日本原子力研究所)、JET(欧州)、TFTR(米国)をはじめとする世界各国の核融合実験装置において広く利用され、核融合プラズマの性能向上に大きく貢献してきた。⁽¹⁾⁽²⁾

一方、核融合プラズマのさらなる高性能化および定常化のためには、より高いエネルギー(数百keV~1MeV)の中性粒子ビームが必要となる。⁽³⁾従来のNBI装置においては正イオンビームが用いられてきたが、ビームエネルギーの上昇とともに中性化効率が著しく低下してしまうという致命的な欠点があった。それに対して、負イオンビームの中性化効率は約60%と高く、数百keV以上の高エネルギーNBIにおいては負イオンビームの使用が大前提となる。したがって、高エネルギーかつ大電流の負イオンビームを生成可能な負イオン源が必要となる。⁽⁴⁾例えば、国際協力で工学設計が進められている『国際熱核融合実験炉(ITER)』では1MeV、40Aの重水素負イオンビームを定常的(1000秒以上)に発生可能な高出力負イオン源が必要とされている。⁽⁵⁾

ITER用NBIをはじめとする次世代の核融合炉用NBIを設計する上で重要な点の一つは、システムのコンパクト化である。例えば、中性粒子ビームの入射口は、ポロイダルコイルやトロイダルコイル等との干渉を避けるため可能な限り小さいことが望ましい。入射口を小さくすることは、ビームライン機器のコスト低減につながるばかりではなく、核融合反応で生ずる高速中性子による放射化の低減という重要な意味をも持つ。できる限り大きなパワーを、限られた寸法の入射口を通して入射するためには、引出・加速系を工夫してビームを効率よく収束しなければならない。

NBI用イオン源のように、多数の電極孔からイオンを引き出しビームレットの集合体として大電流イオンビームを生成する場合、ビームの収束とは、ビームレット一本一本の収束性と、ビーム全体としての収束性の二つの意味がある。各ビームレットについては、電極の面取り(Shaping)や電界レンズ効果の利用、あるいはイオン放出面が凹状になるような条件で運転することにより収束性を高めることが可能となる。⁽⁶⁾ビーム全体の収束性を高めるためには、電極のセグメント化による幾何学的収束法や孔軸偏位法が知られているが、⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾ビームレット同士の反発による収束性の悪化については、その影響の度合いはもとよりその抑制法についてもほとんど研究された例がない。この理由は、従来からの正イオンビームの場合、ビームレット自体の発散角が大きいいため、ビームレット相互作用による収束性の悪化はそれほど問題とはならなかったことによる。一方、負イオンビームの場合、発散角が小さく収束性に優れているため、ビームレット相互作用による収束性の悪化が表面化するのではないかと懸念されている。核融合炉用イオンビームにおいて収束性の悪化は、入射パワーの減少ならびにビームライン機器への余分な熱負荷の増加となるため、収束性の良いビームを生成することはNBI装置の性能を決める上で極めて重要なポイントとなる。従って、もし、ビームレット相互作用による収束性の悪化が無視できない場合、何ら

かの対策が必要となる。

本研究は、ビームレット相互作用の定量的評価およびその対策について検討することを目的とする。まず最初に、ビームエネルギー依存性や水素負イオンに付随する電子の影響、さらに水素と重水素の同位体効果に関する検討を行う。次に、それらのことを検証するために行った実験について報告する。実験では、多孔電極から引出・加速された水素負イオンビームをタングステン板に照射し、赤外線モニタを用いて各ビームレットの空間分布を測定することによりビームレット相互作用の影響を調べた。次に、得られた実験結果をもとにビームレット相互作用の定量化を行い、一つの応用例としてJT-60用大型負イオン源におけるビームレット相互作用による偏向角の評価を行う。最後に、静電レンズ効果を利用したビームレット相互作用の補正方法について述べる。

2. ビームレット相互作用

2.1 原理

ビームレット相互作用の概念図を第2-1図に示す。隣接するビームレット間には空間電荷効果による反発力が存在するものと考えられるが、中央部に位置するビームレットの場合には、対称性から反発力は幾分相殺され相互作用の影響は小さいものと予想される。しかし、周辺部のビームレットについては対称性が成立せず相殺効果が期待できないため、ビームレットの軌道は外側に偏向されるものと予想される。このように、ビームの周辺部ほど影響が大きくなるという点がビームレット相互作用の特徴であり、収束性の悪化およびビームライン機器の熱負荷の増加といった深刻な問題につながる恐れがある。

Inoueらの研究から、 10^{-5} Torr以上のガス圧のもとでは接地電極下流にビームプラズマが形成され、負イオンビームの発散が抑制されることが知られている。これは、ビームプラズマ中の正イオンが負イオンの空間電荷を中和するためであると考えられている。⁽¹²⁾⁽¹³⁾このことから、接地電極下流ではビームレット相互作用は存在しないものと考えられ、ビームレット相互作用が問題となる領域は、イオン放出面から接地電極までとなる。

この章では、簡単なモデルを用いて、ビームレット相互作用に関する検討を行う。まず、一本のビームレットの周辺部に形成される電界を、一直線上に一様に分布した電荷によって形成される電界と同じようなものとして考えてみる。荷電粒子の質量を m [kg]、電荷を q [C]、ビーム電流値を I [A]とし、電極間距離を L [m]、電極間に印加される電圧を V [V] とする時、電極間のある位置 z ($0 < z \leq L$)における半径 r 方向の電界 $E_r(z)$ [NC⁻¹]は次式で与えられる。(詳細については付録を参照)

$$E_r(z) = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{mL}{2qVz}} \quad (2-1)$$

ここで、 $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} [\text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}]$ (真空の誘電率)

2.2 ビームエネルギー依存性

ビーム光学を最適に保つためには、ビームエネルギーとビーム電流値はチャイルド・ラングミューア則(3/2乗則)に従って、パービアンズを変えることなく運転する必要がある。ここでは、パービアンズを一定に維持しビームエネルギーを変化させた場合におけるビームレット相互作用について検討を行う。パービアンズを P とすると、

$$I = PV^{\frac{3}{2}} \quad (2-2)$$

(2-2)式を(2-1)式に代入して

$$\begin{aligned} E_r(z) &= \frac{PV^{\frac{3}{2}}}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{mL}{2qVz}} \\ &= \frac{PV}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{mL}{2qz}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

パービアンズ P を一定と仮定すると、(2-3)式から

$$E_r(z) \propto \frac{V}{\sqrt{z}} \quad (2-4)$$

一方、荷電粒子を加速する電界 E_z は、

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{V}{L} \\ &\propto V \end{aligned} \quad (2-5)$$

第2-2図のように、ビームレット中に位置する荷電粒子は、加速方向に力を受けると同時に、隣接するビームレットによって形成される半径方向の電界からも力を受けるため外側に偏向される。このため、ビームレット相互作用による偏向角は、加速電界方向の電界強度と半径方向の電界強度の比として考えることができる。(2-4)式と(2-5)式から、

$$\frac{E_r(z)}{E_z} \propto \frac{1}{\sqrt{z}} \quad (2-6)$$

この式から、パービアンズ一定条件では、加速電界方向の電界強度と半径方向の電界強度の比は、イオン放出面からの距離 z と共に変化するが、加速電圧 V には依存しないことがわかる。従って、ビームレット相互作用はビームエネルギーに依存しないものとする。

2.3 電子の影響

空間電荷効果は荷電粒子の速度が遅いほど強く作用するため、低エネルギー領域ほどその影響が問題となる。低エネルギー領域は負イオン源の引出部に相当するが、引出部においては水素負イオンと電子が混在した状態となっている。ここでは、電子の影響を見積もるため、水素負イオンと電子の空間電荷効果の比較を行う。

負イオン源では、水素負イオンを引き出す際に電子も同時に引き出してしまうため、引出部における電流 I は水素負イオン電流 I_{H^-} と電子電流 I_{e^-} の和となる。

$$I = I_{H^-} + I_{e^-} \quad (2-7)$$

従って、水素負イオンと電子によって形成される電界は次式となる。

$$E_r = E_{r(H^-)} + E_{r(e^-)} \quad (2-8)$$

ここで、

$$E_{r(H^-)} = \frac{I_{H^-}}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{m_{H^-}}{2q_{H^-}V}} \quad (2-9)$$

$$E_{r(e^-)} = \frac{I_{e^-}}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{m_{e^-}}{2q_{e^-}V}} \quad (2-10)$$

以上のことから、水素負イオンの作る電界と電子の作る電界の比は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_{r(H^-)} : E_{r(e^-)} &= I_{H^-} \sqrt{m_{H^-}} : I_{e^-} \sqrt{m_{e^-}} \\ &\doteq 43I_{H^-} : I_{e^-} \end{aligned} \quad (2-11)$$

核融合炉用負イオン源における通常の運転では、引き出される電子と負イオンの比は約1程度である。従って、電子の影響は無視できることになり、ビームレットの作る半径方向の電界は水素負イオンによるものとなる。

2.4 水素と重水素の同位体効果

核融合炉用負イオン源では、水素ではなく重水素を用いる。そこで、重水素と水素のビームレット相互作用に関する同位体効果について検討を行う。

1本のビームレットがつくる半径方向の電界強度の比は

$$E_{r(H_2)} : E_{r(D_2)} = I_{H_2} \sqrt{m_{H_2}} : I_{D_2} \sqrt{m_{D_2}} \quad (2-12)$$

一方、イオン放出面から引き出される重水素負イオン電流は、同位体効果のため水素負イオン電流よりも減少することが知られている。⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

$$I_{H_2} : I_{D_2} = \frac{1}{\sqrt{m_{H_2}}} : \frac{1}{\sqrt{m_{D_2}}} \quad (2-13)$$

(2-12)式と(2-13)式から、最適なパービアンズで運転する場合には、重水素負イオンのつくる半径方向の電界は水素負イオンの場合と同じものになることがわかる。従って、重水素と水素のビームレット相互作用に関する同位体効果はないものとする。

3. 実験装置および方法

実験は負イオン加速テストスタンドNIASで行った。装置の概要を第3-1図に示す。イオン源は400keV負イオン源を使用した。⁽¹⁶⁾このイオン源は、負イオン生成部、引出部、加速部から構成され、多孔3段静電加速方式によって負イオンビームを収束性良く高エネルギーに加速することができる。負イオン生成部はセシウム添加体積生成型のカマボコ型プラズマ源である。⁽¹⁷⁾このプラズマ源は、ソースプラズマの閉じ込め性能が高く、低い運転ガス圧で効率良く負イオンを生成することができる。引出部は、プラズマ電極、引出電極、電子抑制電極から構成される。各電極の中央部128mm×140mmの矩形領域には、直径14mmの電極孔が45個配列されている。引出電極には磁石が埋め込まれており、この磁場によりビーム中に混入する不要な電子を除去することができる。加速部は、第1加速電極、第2加速電極、接地電極から構成される。電極孔の直径は16mmである。第3-2図に電極構造を示す。加速部の電極間ギャップ長は、75mm、65mm、55mmと下流に行くほど短くなっており、静電レンズ効果を用いてビームレットを収束しながら加速することができる。なお、各電極の電極孔列の間隔は21mmである。負イオンビーム電流値は、5.4mA下流に位置する水冷型ビームターゲットの水温上昇により評価できる。

実験では、接地電極から1.5m下流のタングステン板にビームを照射し、赤外線モニタを用いてタングステン板の温度上昇を測定した。熱画像データ(16bit)をパソコンに取りこみ、ビーム入射直前と入射直後の温度差から各ビームレットの空間分布を得た。タングステン板の寸法は、

150mm×200mm×2mmである。タングステン板の周辺部にはビームレット間の絶対距離を評価する際の基準とするため、10mm間隔で直径3.5mmの穴を空けてある。また、赤外線モニタは、日本アビオニクス(株)製コンパクトサーモTVS-200MkIISTを使用した。各電極間の電界の歪みや電極孔の軸ずれによるビーム偏向の影響とビームレット相互作用の影響を明確に区別するため、第3-3図に示すように2種類の閉止板を用いてプラズマ電極の実質的な電極孔数を調節し、5列の電極孔からビームを引き出した場合の中央3列のビームレットの間隔と、3列の電極孔からビームを引き出した場合のビームレットの間隔の比較を行った。つまり、ビームレットが隣に存在する場合と隣に存在しない場合の偏向量の差から、純粋な意味でのビームレット相互作用の定量化を試みたわけである。ビームレットの間隔は、ビームレットの中心間の距離として定義し、偏向角 θ は以下の式により求めた。

$$\theta = \frac{\left(\frac{\delta L}{2} - 21 \right)}{1.5} \quad [\text{mrad}] \quad (3-1)$$

ここで、 δL は中心列の上下に位置するビームレット間隔の平均値 [mm]

なお、ターゲットを観察する際の空間分解能は約0.5mm/画素である。一連の実験では、プラズマ源の運転ガス圧は5mTorrとした。この時、真空容器内のガス圧は $6 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ Torrとなる。従って、接地電極下流のビームラインにおいては、ビームプラズマの空間電荷中和効果によりビームレット相互作用は抑制されているものと考えられる。⁽¹²⁾

4. 実験結果および考察

4.1 ビームプロファイルの例

ビームプロファイルの例を第4-1図に示す。これは、引出電圧 $V_{\text{ext}}=2.8\text{kV}$ 、加速電圧 $V_{\text{acc}}=175\text{kV}$ 、ビーム電流密度 2.6mA/cm^2 におけるビームターゲットの温度上昇を示したものである。収束性良く加速されているため、各ビームレットを明確に観察することができる。なお、ビームレットの各行が水平方向に交互にずれているが、これは引出電極の磁石のつくる磁場の影響である。今回行った一連の測定では、引出電極の磁場の影響を受けない垂直方向におけるビームレット間距離を測定した。

4.2 ビームエネルギー依存性

2.2章の考察から、パービアンズ一定の条件であれば、ビームエネルギーを変化させてもビームレット相互作用の効果は一定であることが予想される。このことを検証するため、最適パービ

アンスを維持しながらビームエネルギーを86keV～178keV程度に変えて測定を行った。なお、負イオン源では、表面生成過程を併用することによる負イオン生成効率の増大と電子電流の低減を図るためセシウムを添加することが多い。そこで、セシウムを添加しない場合と添加した場合の両方の条件で実験を行い、セシウムの影響も調べてみた。第4-2図に結果を示す。縦軸は、ビームレットの偏向角(mrad)である。

ビームエネルギーが178keVの時、3列の場合の偏向角は約4.4mrad、5列の場合の偏向角は約1.4mradである。従って、3列のビームレットの場合の方が5列のビームレットの場合よりも3mrad程度大きく偏向されることが明らかとなった。さらに、偏向角の違いはほとんどビームエネルギーに依存しないこともわかる。また、偏向角の大きさはセシウムの有無に依存しないことも確認できる。このことから、ビームレット相互作用の観点からは、負イオン生成機構の違いや電子電流量の違いはあまり影響をもたないことがわかる。

4.3 バイアス電圧依存性

バイアス電圧を変えた場合の引出電源電流(I_{ext})と加速電源電流(I_{acc})の変化を第4-3図に示す。引出電源電流と加速電源電流の差($I_{ext}-I_{acc}$)は、おおよそ電子電流に相当する。この図から、バイアス電圧を4V程度に設定することにより、加速電源電流、つまり負イオン電流はほとんど減少させることなく、電子電流だけを大幅に抑制できることがわかる。

2.3章で検討したように、ビームレット相互作用に及ぼす電子の影響は小さいものと予想される。このことを確認するため、バイアス電圧を-0.5V程度から4V程度に変化させ電子電流量の影響を調べてみた。その結果を第4-4図に示す。

電子電流量を変化させることにより負イオン電流と電子電流の比を1～10程度に変化させてみたが、予想通りビームレットの偏向角はほとんど変わらないことが確認できた。

ただし、電子電流の増加とともに空間電荷は増加するため反発効果は若干大きくなるものと予想されたが、電子の増加とともに偏向角がわずかに減少するという実験結果となった。これは、ビームレット中の電子は質量が小さいためすばやく周囲に移動してしまうが、ビームレット中心部の空間電荷はそれほど変化せず周辺部の空間電荷のみが上昇するため、電子に比べて動きの遅い負イオンに対する空間電荷効果自体は若干緩和されるためではないかと考える。(第4-5図)

5. ビームレット相互作用の定量化

5.1 電界の重ね合わせと偏向角の定量化

ビームレットが作る半径方向の電界の重ね合わせと、実験で求めた3列と5列の偏向角の違い(3mrad)を比較し、ビームレット相互作用の定量化を試みる。

第5-1図のように複数のビームレットが等間隔 r で存在する体系を考える。議論を容易にするため、各ビームレットには図に示すような番号(①～⑤)をつけておく。①～⑤のビームレットが②のビームレット中の荷電粒子におよぼす電界の強さを $E_1 \sim E_5$ と定義し、②のビームレット中の荷電粒子が受ける電界について検討を行う。

5列のビームレットの場合、上から2番目(番号②)のビームレット中に存在する荷電粒子が受ける電界 E_{5rows} は次式で与えられる。

$$E_{5rows} = E_3 + E_4 + E_5 - E_1 \quad (5-1)$$

また、3列のビームレットの場合、上から1番目(番号②)のビームレット中に存在する荷電粒子が受ける電界 E_{3rows} は次式で与えられる。

$$E_{3rows} = E_3 + E_4 \quad (5-2)$$

次に、③のビームレットが生成する電界 E_3 を用いて、(5-1)式と(5-2)式の整理を試みる。そのためには、ビームレットの作る電界 $E_r(r)$ と距離 r の関係を定義する必要がある。実際には、電界 $E_r(r)$ は距離 r の n 乗 ($E_r(r) \propto 1/r^n$ ただし、 $1 < n < 2$) に比例するものと考え、簡単のため、以下の二通りの場合についてのみ検討を行う。

- i) 電界 $E_r(r)$ が距離 r に反比例する場合 ($E_r(r) \propto 1/r$)
- ii) 電界 $E_r(r)$ が距離 r の2乗に反比例する場合 ($E_r(r) \propto 1/r^2$)

i) $E_r(r) \propto 1/r$ を仮定する場合

ビームレットの作る電界 $E_r(r)$ が距離 r に反比例すると仮定した場合、(5-1)式と(5-2)式はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} E_{5rows} &= E_3 + \frac{E_3}{2} + \frac{E_3}{3} - E_3 \\ &= \frac{5}{6} E_3 \end{aligned} \quad (5-3)$$

$$\begin{aligned} E_{3rows} &= E_3 + \frac{E_3}{2} \\ &= \frac{3}{2} E_3 \end{aligned} \quad (5-4)$$

従って、②のビームレット中に存在する荷電粒子が受ける電界の差 $E_{3rows} - E_{5rows}$ は以下のようになる。

$$E_{3rows} - E_{5rows} = \frac{2}{3} E_{\text{e}} \quad (5-5)$$

実験によると、3列と5列の偏向角の差は3mradである。そこで、(5-5)式が3mradに相当するとして、5列の場合と3列の場合の偏向角を算出してみた。第5-1表にその結果を示す。Er(r) ∝ 1/r を用いて偏向角を算出すると、5列の場合では4mrad、3列の場合では7mradと実験値よりも大きくなるのがわかる。

ii) Er(r) ∝ 1/r² を仮定する場合

次に、ビームレットの作る電界 Er(r) が距離 r の2乗に反比例すると仮定して検討を行う。この場合、(5-1)式と(5-2)式はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} E_{5rows} &= E_{\text{e}} + \frac{E_{\text{e}}}{2^2} + \frac{E_{\text{e}}}{3^2} - E_{\text{e}} \\ &= \frac{13}{36} E_{\text{e}} \end{aligned} \quad (5-6)$$

$$\begin{aligned} E_{3rows} &= E_{\text{e}} + \frac{E_{\text{e}}}{2^2} \\ &= \frac{5}{4} E_{\text{e}} \end{aligned} \quad (5-7)$$

従って、②のビームレット中に存在する荷電粒子が受ける電界の差 E_{3rows} - E_{5rows} は以下の式で与えられる。

$$E_{3rows} - E_{5rows} = \frac{8}{9} E_{\text{e}} \quad (5-8)$$

この式と実験値の3mradを用いて、5列と3列のそれぞれの場合における偏向角を算出した結果についても第5-1表に示す。5列の場合には1.2mrad、3列の場合には4.2mradとなり、Er(r) ∝ 1/r² としてビームレットの重ね合わせ効果を考慮すると実験値に良く一致することがわかる。

ビームレットの作る半径方向の電界の重ね合わせを考慮する場合において、Er(r) ∝ 1/r ではなく Er(r) ∝ 1/r² と近似した方が実験値に良く合うということは、ビームレット同士の反発力が比較的短い区間でのみ作用することを意味する。実験を行った400keV負イオン源の場合、プラズマ電極から接地電極までの距離は238mmである。従って、無限に様な電荷分布を仮定する Er(r) ∝ 1/r の関係がそれほど良い近似とはならないことも理解できる。第5-2図は、加速途中における荷電粒子の密度分布を模式的に示したものであるが、荷電粒子のエネルギーが上昇するとともに空間電荷は減少する。つまり、ビームレット同士の反発力はビームエネルギーが上昇するにつれて減少する。このことは、イオン放出面近くの低エネルギー領域での相互作用が支配的であることを意味し、プラズマ電極と接地電極間の距離(238mm)よりもはるかに短い区間での相

相互作用が問題となる。従って、点電荷を仮定する $E_r(r) \propto 1/r^2$ の方が、無限に一様な電荷を仮定する $E_r(r) \propto 1/r$ よりもむしろ実際の体系に近いと考える。

なお、2章においては $E_r(r) \propto 1/r$ として、エネルギー依存性、電子の影響および同位体効果についての検討を行ったが、 $E_r(r) \propto 1/r^2$ の場合であっても得られる結論の本質は全く同じものとなることは言うまでもない。

5.2 JT-60用大型負イオン源におけるビームレット相互作用の評価

JT-60用N-NBIに使用されている大型負イオン源と400keV負イオン源は同じ引出・加速系を有している。そこで、今回得られた結果を用いて、JT-60用大型負イオン源におけるビームレット相互作用による偏向角の評価を試みる。

第5-3図に、JT-60用大型負イオン源の電極断面図を示す。⁽¹¹⁾電極多孔部の領域は 451mm×1102mmである。JT-60用大型負イオン源では、各電極を 5枚のセグメントに分け、それらのセグメントを幾何学的な焦点に向けて傾けることにより長手方向の収束性を高める方式を採用している。このため、ビームレット相互作用による収束性の悪化が問題となるのは長手方向ではなく、むしろ短手方向と考える。各セグメントの多孔部領域は 451mm×182mmであり、9×24(合計 216)個の電極孔が存在する。JT-60用大型負イオン源の短手方向の電極孔のピッチは19mmであるため、400keV負イオン源の場合よりも反発効果は $(21/19)^2 = 1.22$ 倍に大きくなる。

第5-4図に、算出された各ビームレットの偏向角を示す。最も端のビームレットは、6.6mrad程度外側に偏向されるものと評価された。JT-60用N-NBIのビームライン長は約25mであることから、入射ポート付近においては 16.5cm程度外側にビームレットの中心がずれることになる。しかし、幸いなことに、JT-60用N-NBIのビームラインは、裕度の大きい設計を採用しているため、ビームライン機器への熱負荷はそれほど大きな問題とはならないものと予想する。

6. ビームレット相互作用の補正法

裕度の大きな設計のため JT-60用N-NBIではそれほど大きな問題とはならないものと予想されるが、コンパクト化が優先される今後のNBI装置においては、ビームレット相互作用の効果は決して無視できるものではない。従って、なんらかの対策によりビームレットの偏向を補正することが必要となる。

この章では、ITER用負イオン源を対象として電極のShapingに工夫を加えることによるビームレット相互作用の補正法について検討を行う(第6-1図)。ITER用負イオン源の引出部は電子抑制電極を用いずプラズマ電極と引出電極の 2枚構造の予定である。相互作用の影響は低エネルギー領域ほど大きいため、引出電極もしくは第1加速電極のShapingが有効であると考えられるが、ここでは引出電極のShapingの効果について検討する。第6-2図に、2次元軌道計算コード BEAM-XYを用

いて行った軌道計算例を示す。計算体系としてはスリット状の引出・加速系を仮定したが、ITER用NBIで採用予定の5段静電加速方式として計算を行っている。上の図は通常のShapingを用いた場合の結果であり、下の図は引出電極のShapingに工夫を加えた場合の結果である。この図から、電極のShapingに工夫を加えることにより故意に電界を歪め、静電レンズ効果によってビームレットの偏向が抑制できることがわかる。

7. まとめ

多孔電極を用いた引出・加速系に特有の問題であるビームレット相互作用を実験的に測定した。5列と3列のビームレット間距離を比較し、3列の場合の方が外側に3mrad程度大きく偏向されることが明らかとなった。また、パービアンスを一定に維持した場合には、ビームレット相互作用の影響はビームエネルギーにほとんど依存しないことも確認できた。さらに、負イオンビーム中に混入する電子の影響は極めて小さいことも確認できた。なお、ビームレット相互作用に同位体効果はなく、今回得られた結果はそのまま重水素の場合にも適用可能と考える。

得られた実験結果をもとに、ビームレット相互作用の定量化を試みた。半径方向の反発力と距離 r の関係は、 $1/r^2$ で良く近似できることを示した。このことから反発力の重ね合わせの評価が可能となり、JT-60用大型負イオン源のように多数のビームレットが存在する場合のビームレット相互作用の定量化が可能となった。今回の結果をJT-60用大型負イオン源に適用すると、周辺部のビームレットは外側に約6.6mrad偏向をうけるものと評価された。

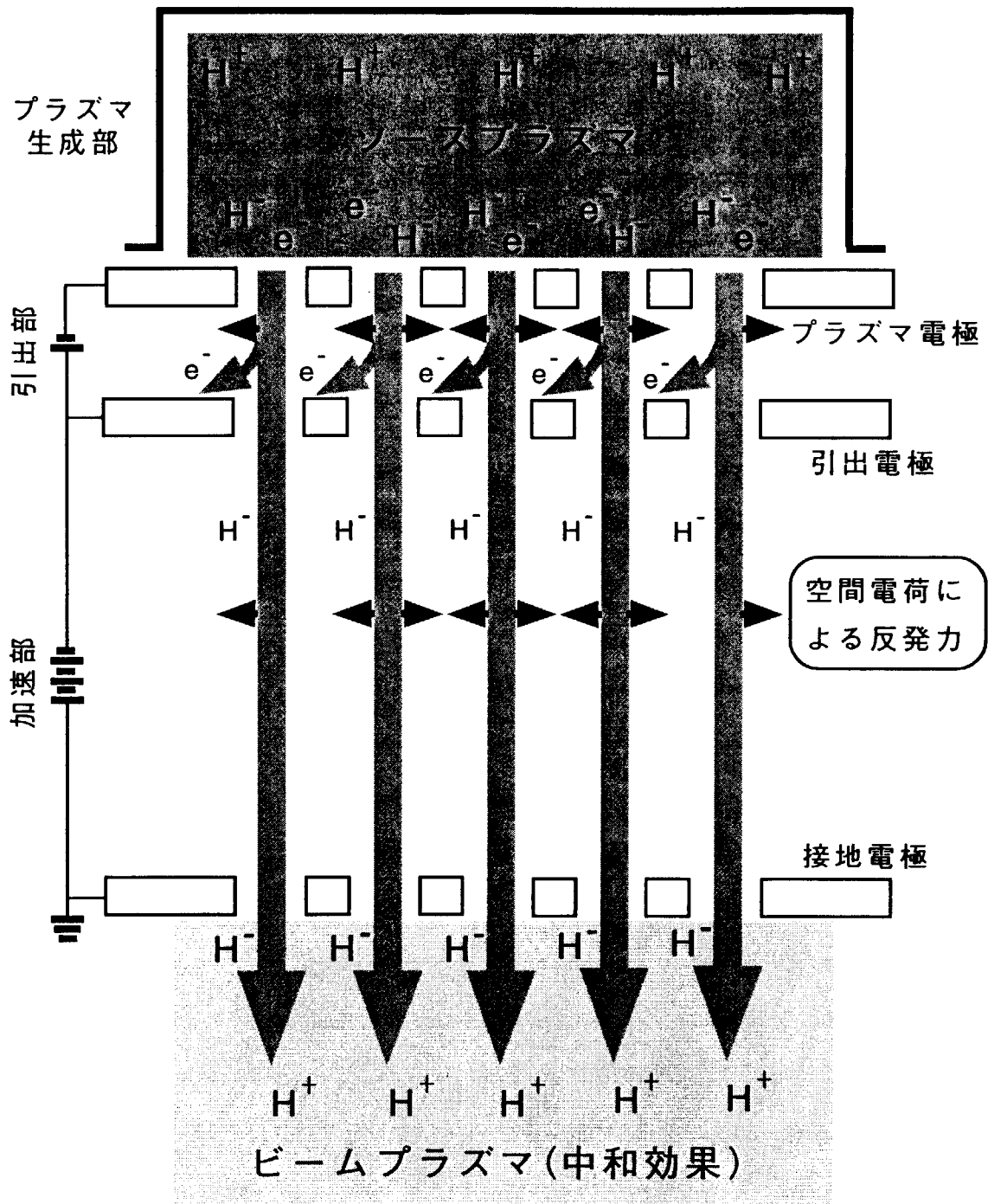
本研究により、ビームレット相互作用の影響は無視できないことがわかり、何らかの対策が必要であることが明らかとなった。ここでは、電極のShapingに工夫を施し電界レンズ効果による補正法に関して検討を行い、軌道計算によりその有効性を示した。今後は、Shapingの詳細寸法の決定、ならびにその検証が必要となろう。

謝 辞

暖かい励ましとご指導を戴きました松田核融合工学部部長、太田那珂研究所所長に感謝の意を表します。終始、協力と議論を惜しまなかったNBI加熱研究室の方々に感謝いたします。

参考文献

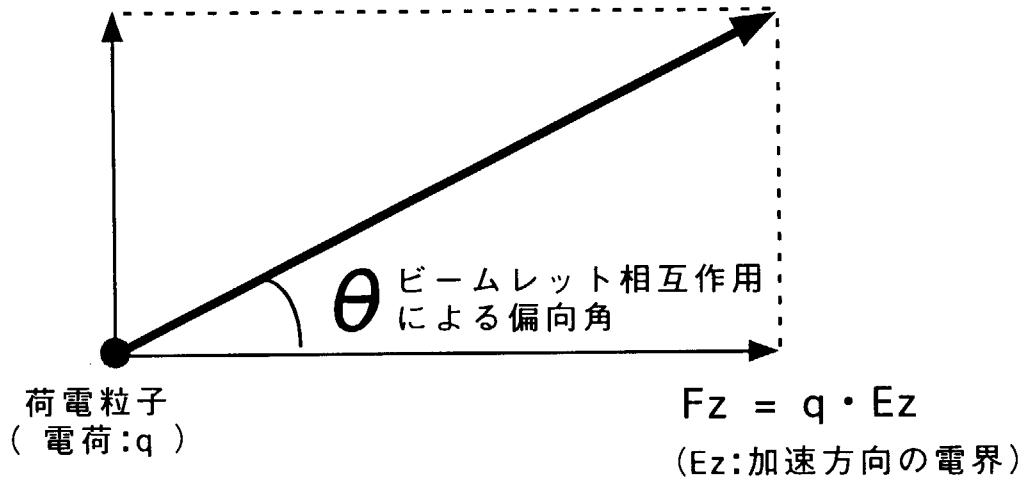
- [1] JT-60 Team presented by M.Kikuchi: 15th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Sevilla, Spain (1994) A-1-I-2
- [2] K. M McGrire, et al.: The Physics of Plasma, Special Issue (1995)
- [3] 例えば、菊池 満 : プラズマ核融合学会誌 70, 255 (1994)
- [4] 例えば、小原祥裕 : プラズマ核融合学会誌 72, 393 (1996)
- [5] R. Hemsworth et al.: Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference, 927 (1996)
- [6] 例えば、栗山証明他 : JT-60粒子入射加熱装置の設計及び技術開発, JAERI-M 87-169, (1987)
- [7] Y. Ohara : Japanese J. Appl. Phys., 18(2), 351 (1979)
- [8] Y. Okumura et al. : Rev. Sci. Instrum. 51(4), 471 (1980)
- [9] G. Duesing : Proc. 13th SOFE, Verese, 59 (1984)
- [10] T. Inoue : Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Negative Ion based Neutral Beam Injectors, 189 (1991)
- [11] NBI装置試験室、NBI加熱研究室 : JT-60U用負イオンNBI装置の設計検討, JAERI-M 94-072 (1994)
- [12] T. Inoue : Presented at US-Japan Workshop on Negative Ion Beam, Naka, Nov. 15 (1988)
- [13] E. B. Hooper, et al., : Phys. Fluids 22(12) 2334 (1979)
- [14] Y. Okumura et al., : Proc. 17th Symp. On Fusion Technology, Rome, Italy, (1992)
- [15] K. Watanabe et al, : 6th Int. Symp. On Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, BNL, (1992)
- [16] K. Miyamoto, et al. , Proc. 18th SOFT, Karlsruhe, 625(1995)
- [17] T. Inoue, et al., Rev. Sci. Instrum. 66, 3859 (1995)



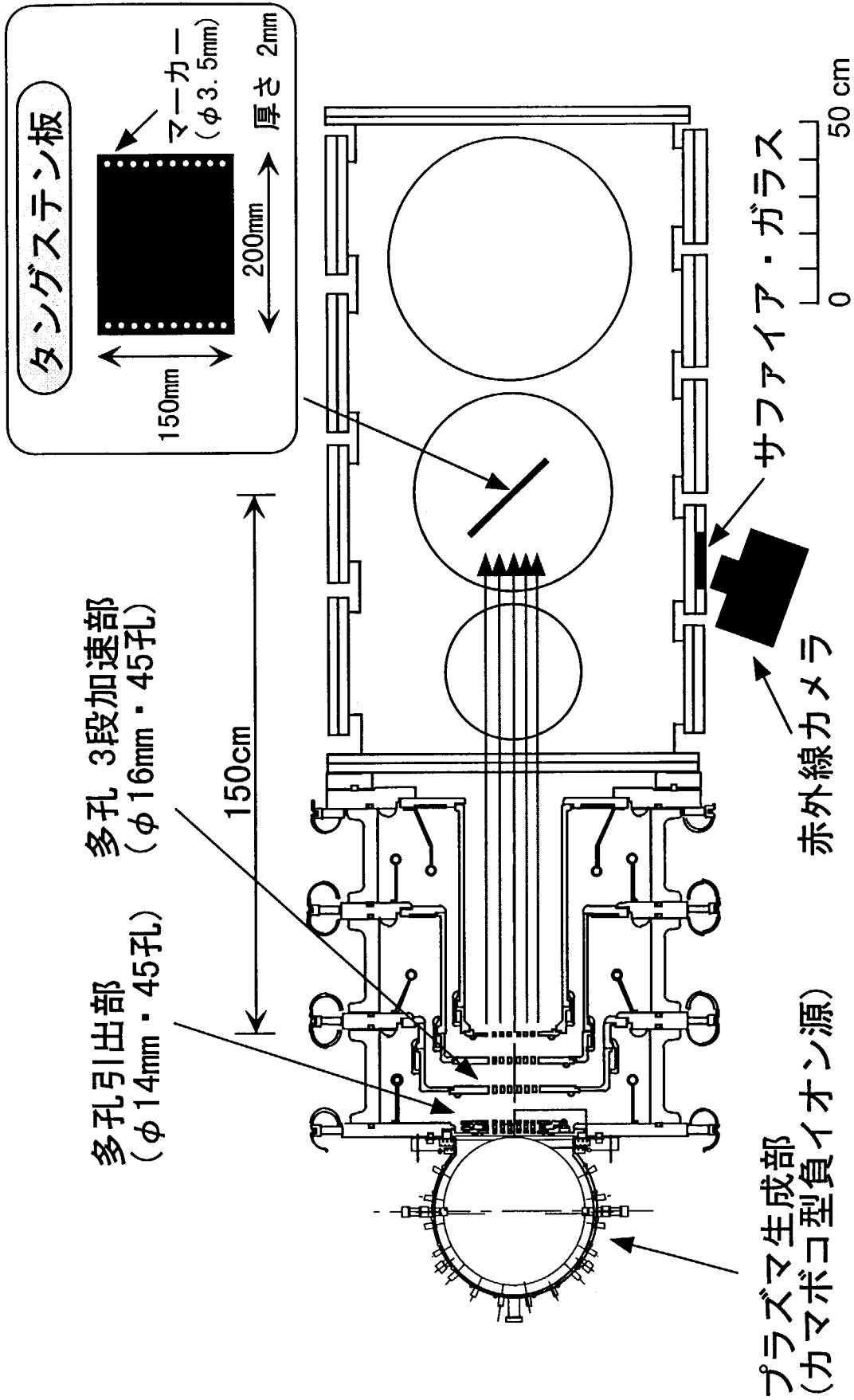
第2-1図 ビームレット相互作用の概念図：イオン放出面から接地電極の間においては、空間電荷効果による反発力が作用する。

$$F_r = q \cdot E_r$$

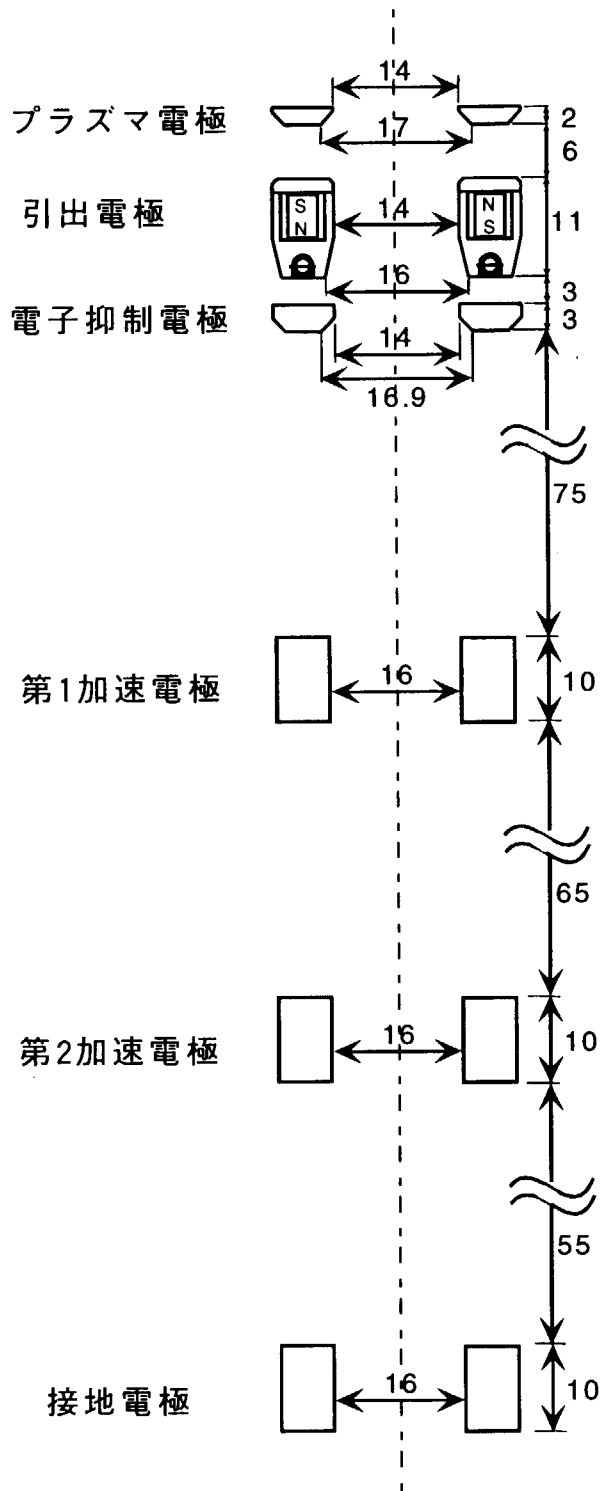
(E_r :半径方向の電界)



第2-2図 ビームレット相互作用による偏向角：ビームレット中の荷電粒子は、加速方向と半径方向にクーロン力を受ける。偏向角の大きさは、それぞれの方向の電界強度の比となる。

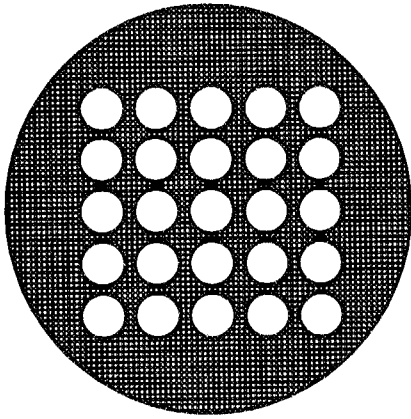


第3-1図 負イオン加速テストスタンド(NIAS)：接地電極から1.5m下流のタンダステン板にビームを照射し、その温度上昇を赤外線カメラにて観察する。

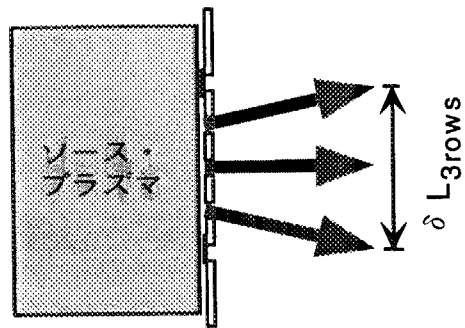
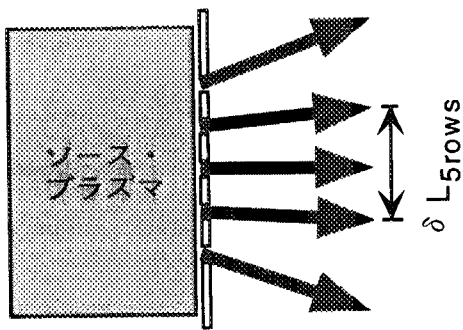
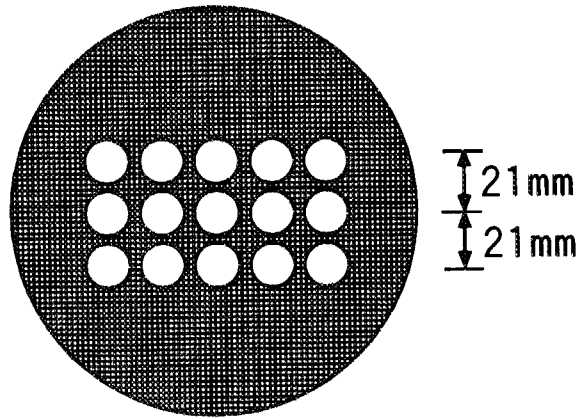


第3-2図 引出部と加速部の電極断面図:加速部のギャップ長は下流に行くほど短くなっており、ビームレットを収束しながら加速することができる。

閉止板 A(5列)

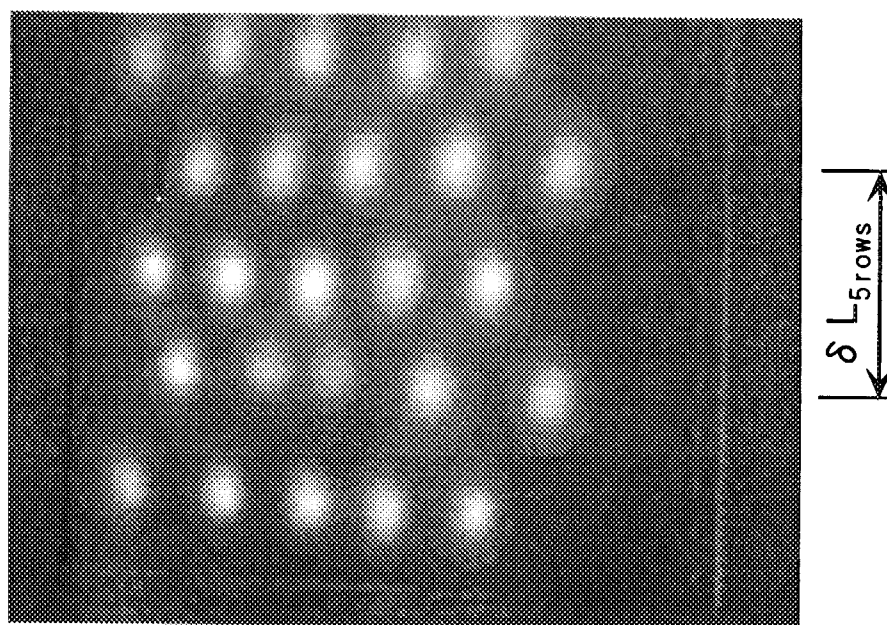


閉止板 B(3列)

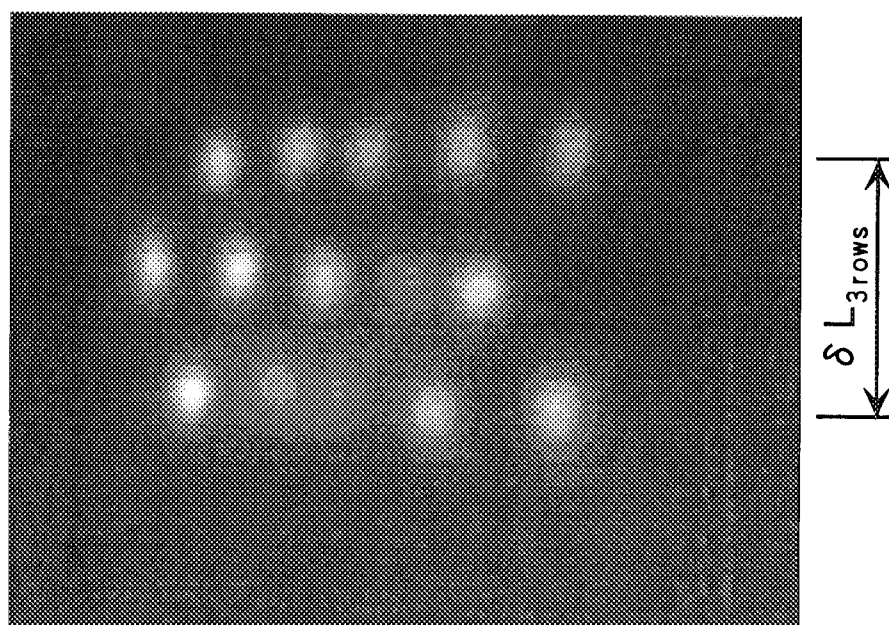


$$\text{偏向角 } \theta = \frac{\left(\frac{\delta L}{2} - 21 \right)}{1.5} \text{ [mrad]}$$

第3-3図 プラズマ電極のマスクパターン：プラズマ電極の電極孔数を調整し、5列の場合と3列の場合のビームレット間距離の差を調べる。

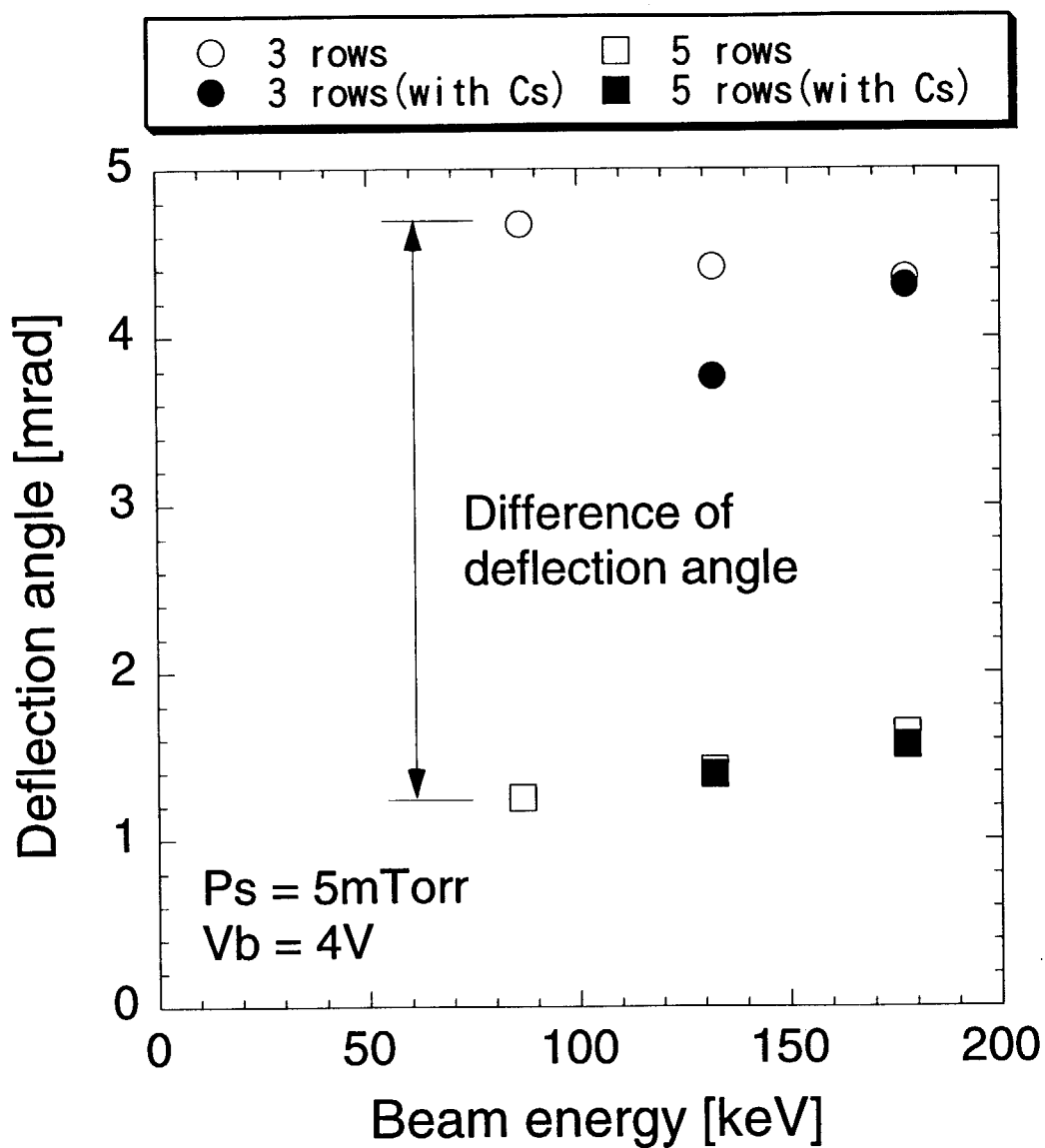


(1) 5×5個のビームレット

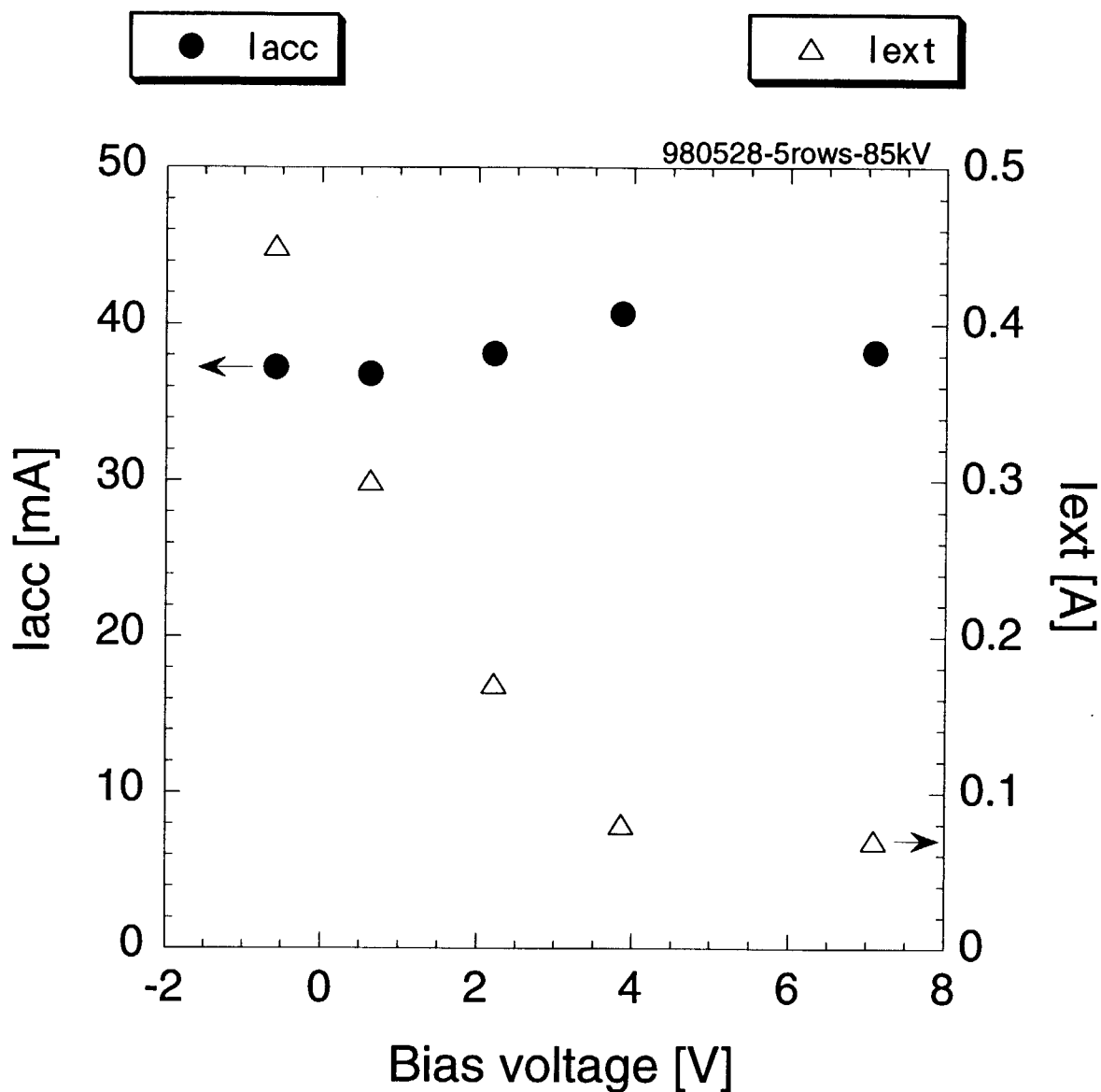


(2) 5×3個のビームレット

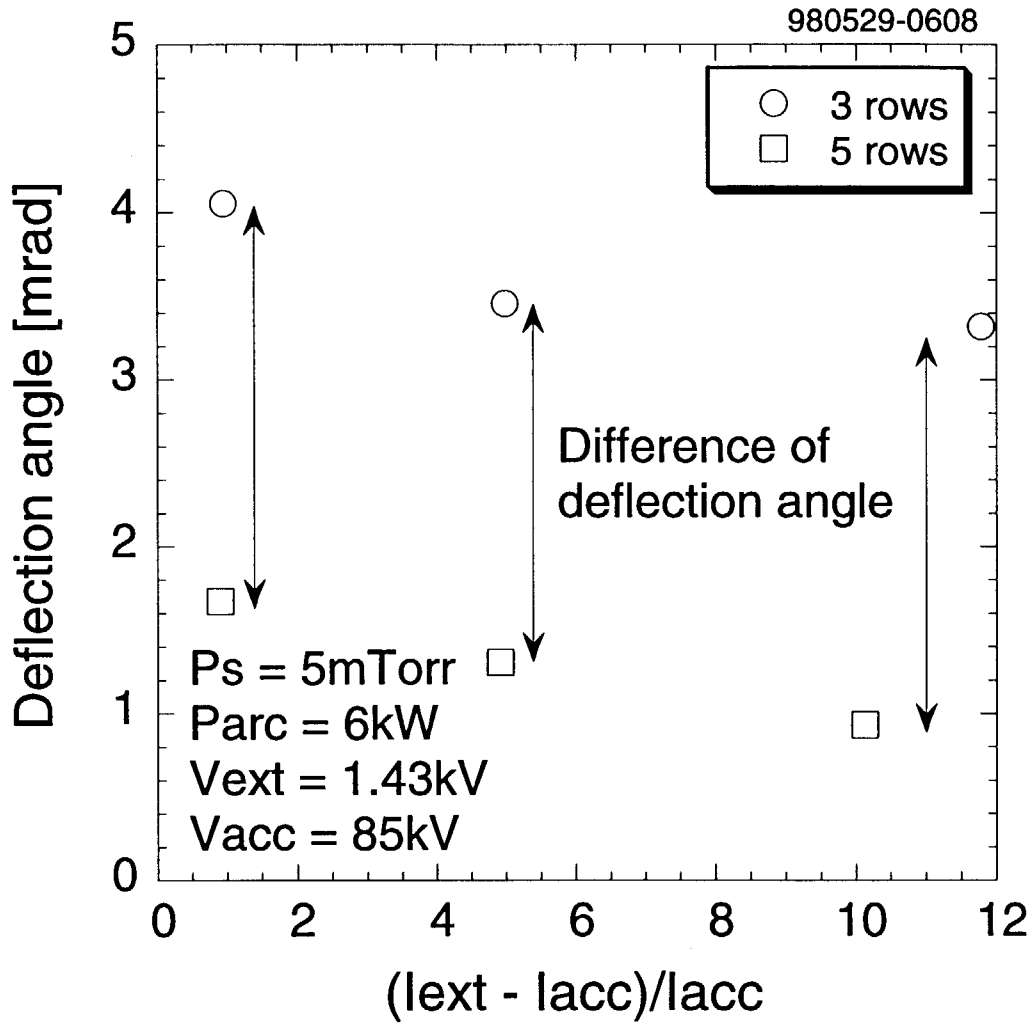
第4-1図 ビームプロファイルの例：収束性良く加速されているため、1.5m下流においても各ビームレットを明確に識別することができる。



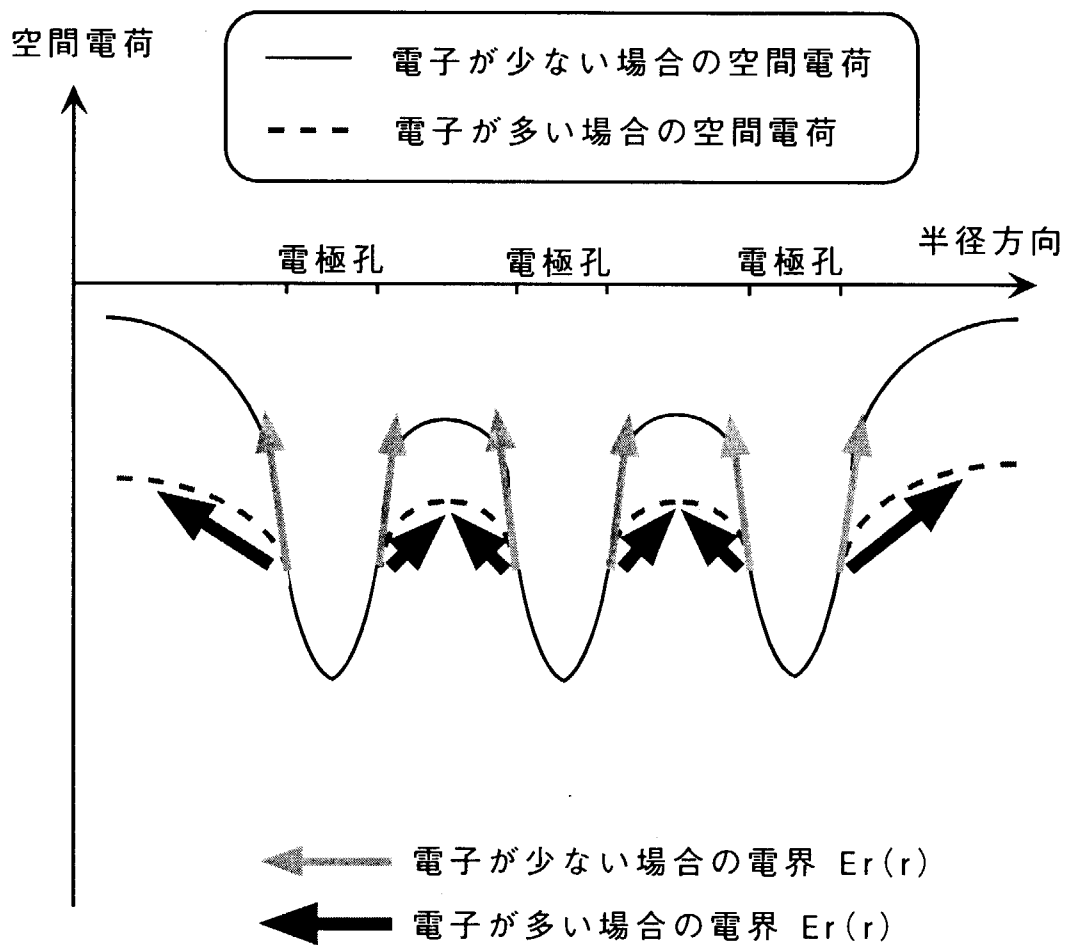
第4-2図 偏向角のビームエネルギー依存性：3列のビームレットと5列のビームレットの偏向角を比較した。3列の場合の方が、5列の場合よりも偏向角が3mrad程度大きいことがわかる。



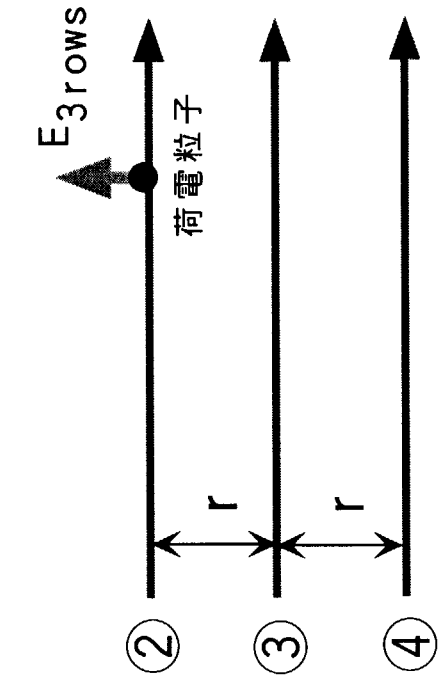
第4-3図 バイアス電圧依存性：バイアス電圧を数 V程度印加した場合、加速電源電流 I_{acc} はあまり変化せず、引出電源電流 I_{ext} のみが大幅に減少する。



第4-4図 偏向角に対する電子電流の影響：引出電源電流 I_{ext} と加速電源電流 I_{acc} の差はおおよそ電子電流に相当する。従って、 $(I_{ext} - I_{acc})/I_{acc}$ は負イオン電流値に対する電子電流値の割合となる。

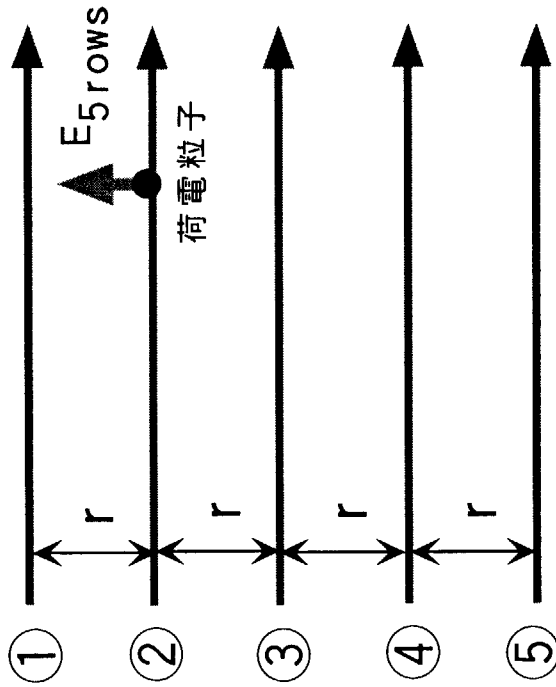


第4-5図 電子量と空間電荷の関係：負イオン量は一定とし電子量のみが増加した場合、負イオンに対する空間電荷力は若干緩和される。



$$E_{5\text{ rows}} = E_{\text{③}} + E_{\text{④}} + E_{\text{⑤}} - E_{\text{①}}$$

(A) 5列のビームレットの場合



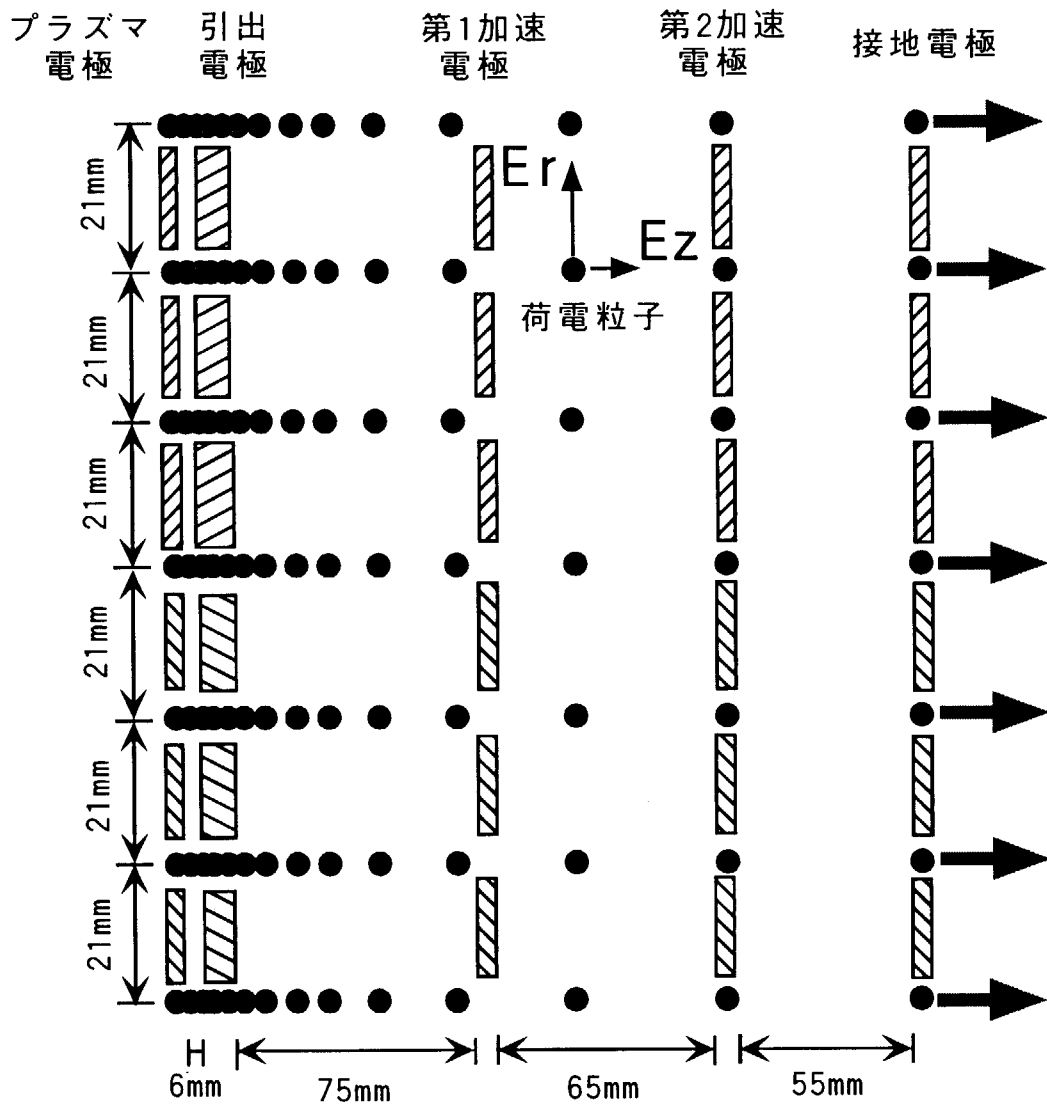
$$E_{3\text{ rows}} = E_{\text{③}} + E_{\text{④}}$$

(B) 3列のビームレットの場合

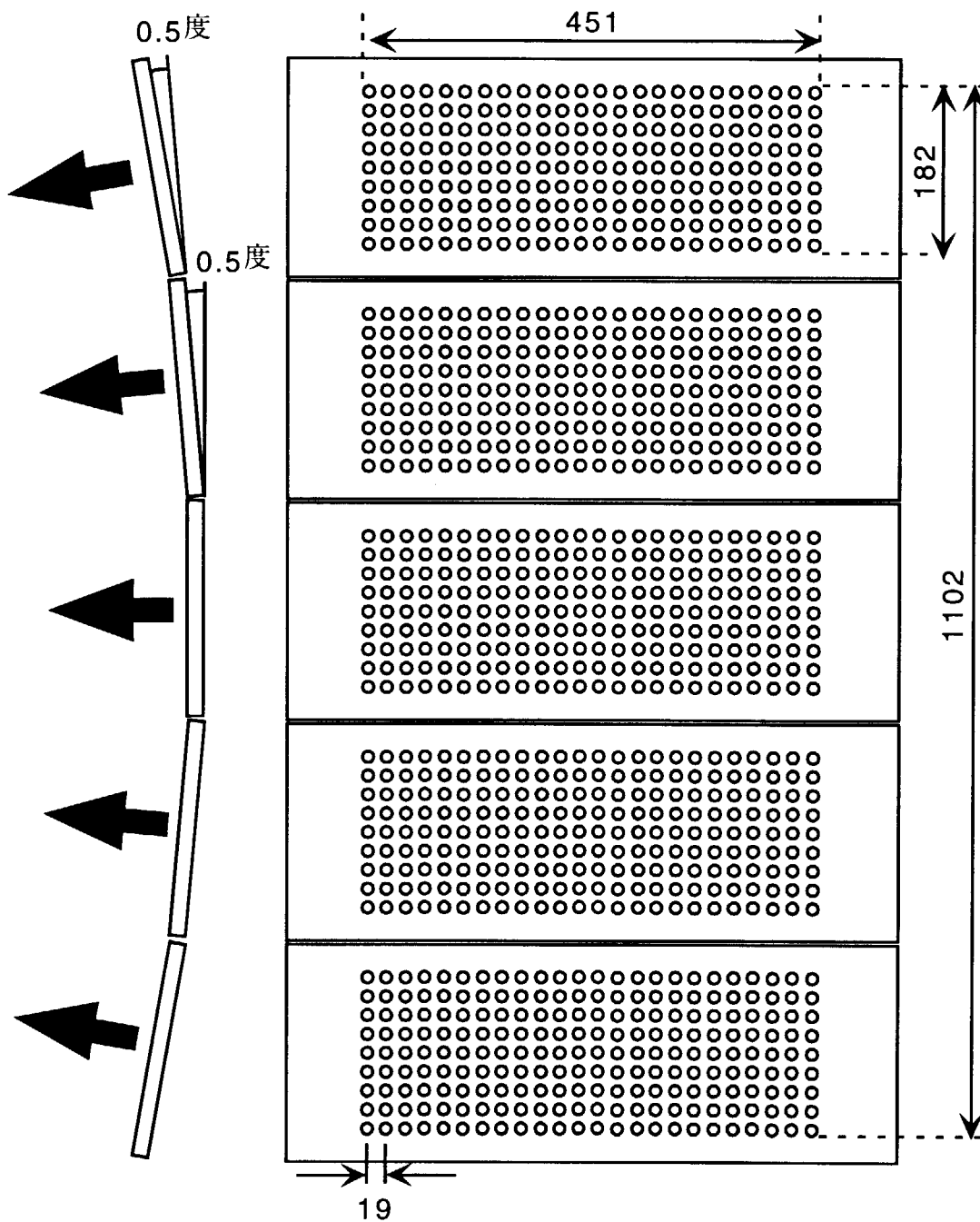
第 5-1 図 ビームレット中の荷電粒子に及ぼす電界：5列のビームレットの場合と3列のビームレットの場合では、電界の強さが異なる。相殺効果のため、5列の場合の電界の方が3列の場合の電界よりも弱い。

第5-1表 5列のビームレットと3列のビームレットの比較

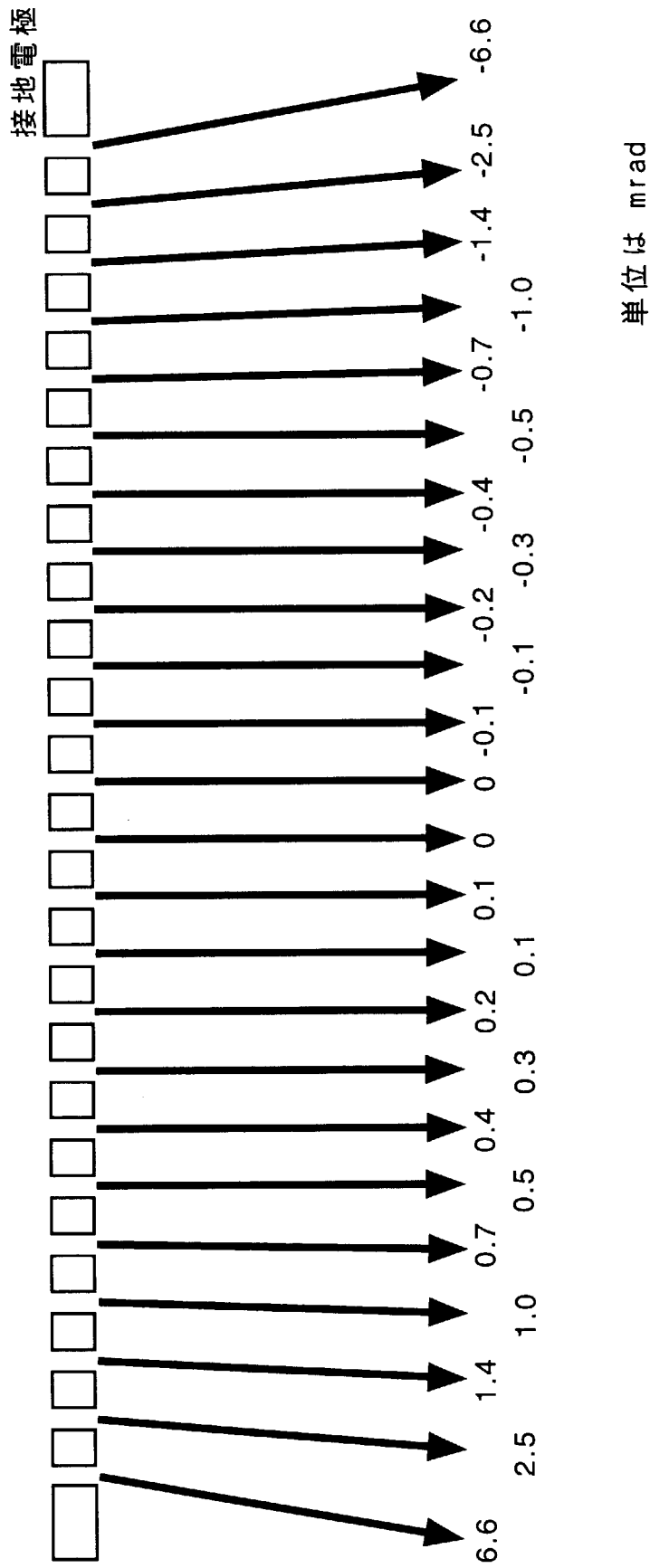
	$E_r \propto 1/r$	$E_r \propto 1/r^2$
5列の 電界強度 E_{5rows}	$\frac{5}{6} E_{\textcircled{3}}$	$\frac{13}{36} E_{\textcircled{3}}$
3列の 電界強度 E_{3rows}	$\frac{3}{2} E_{\textcircled{3}}$	$\frac{5}{4} E_{\textcircled{3}}$
電界強度の違い $E_{3rows} - E_{5rows}$	$\frac{2}{3} E_{\textcircled{3}}$	$\frac{8}{9} E_{\textcircled{3}}$
偏向角の違い $\theta_{3rows} - \theta_{5rows}$	3 mrad(実験結果)	
5列の偏向角 θ_{5rows}	4.0mrad	1.2mrad
3列の偏向角 θ_{3rows}	7.0mrad	4.2mrad



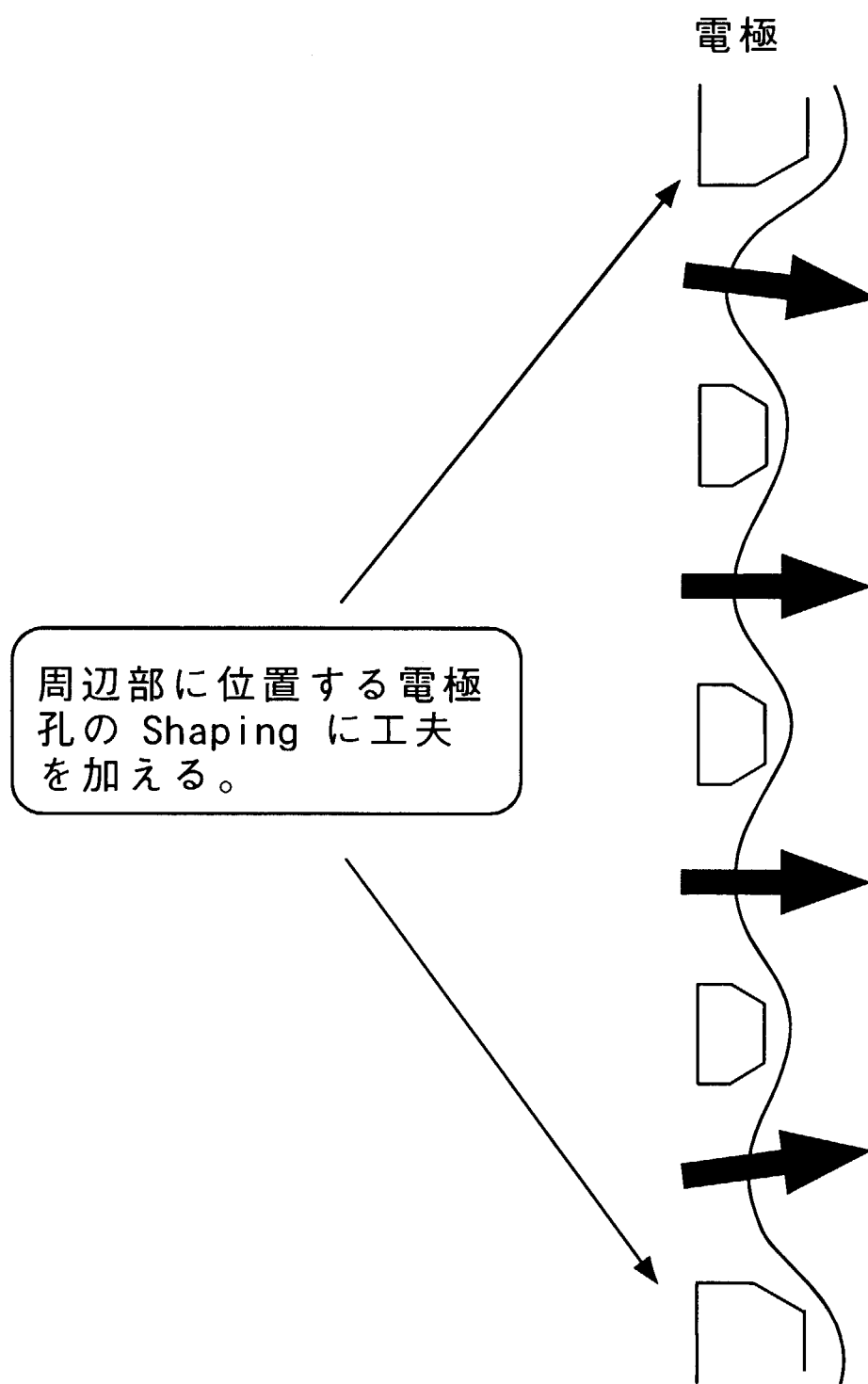
第5-2図 加速途中の荷電粒子の密度分布：荷電粒子の密度はイオン放出面近傍で最も高く、エネルギーの増加とともに減少する。従って、空間電荷および空間電荷効果(反発力)も低エネルギー領域ほど大きい。



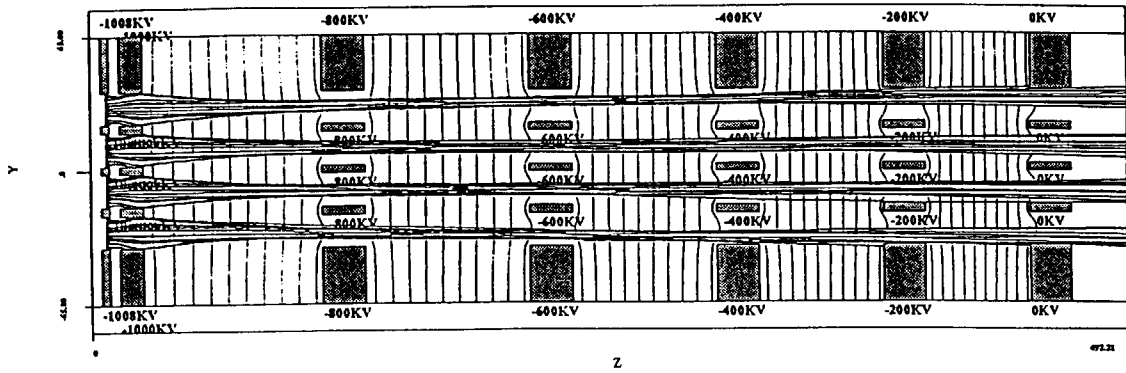
第5-3図 JT-60用大型負イオン源の電極断面図：各電極は5枚のセグメントに分割され、幾何学的に収束するように傾けて固定されている。



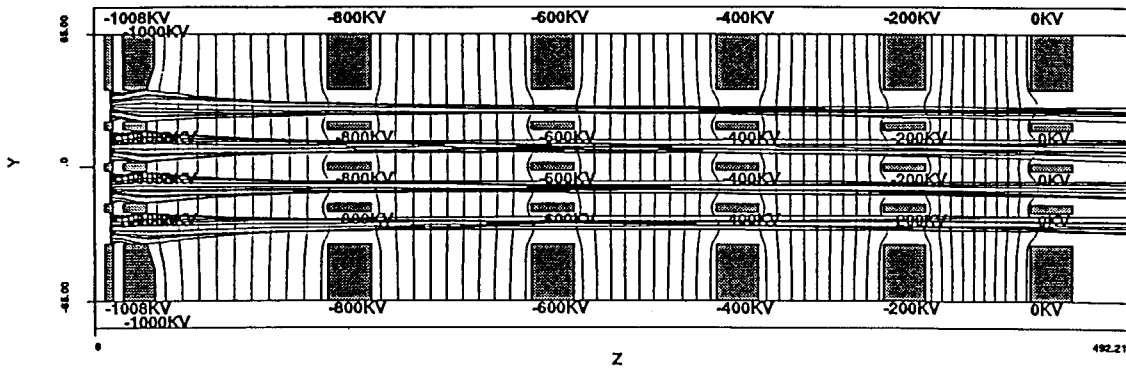
第 5-4 図 JT-60 用大型負イオン源におけるビームレット相互作用による偏向角：19mm 間隔で 24 列のビームレットが存在する。最も偏向角が大きいのとは両端に位置するビームレットで、6.6mrad 程度の偏向をうけるものと予想される。



第6-1図 ビームレット相互作用の補正法：電極のShapingに工夫を加え、電界レンズ効果によって偏向を補正する。



(1) 従来型の Shaping の場合



(2) 周辺部の Shaping に工夫を施した場合

第6-2図 ITER用 5段加速部の2次元軌道計算例：引出電極のShapingによる
 ビームレット相互作用の補正の有効性を軌道計算により検証した。
 なお、計算では、スリット状の電極孔を仮定している。

付 録

一本のビームレットの周辺部に形成される電界について検討を行う。一般に、単位長さあたりの電荷を σ [Cm⁻¹] とするとき、一直線上に一様に分布した電荷による半径 r 方向の電場 E_r [NC⁻¹] は次式で与えられる。概念図を第 A-1 図に示す。

$$E_r = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (\text{A-1})$$

ここで、 $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12}$ [C²N⁻¹m⁻²] (真空の誘電率)

単位体積あたりの電荷を ρ [Cm⁻³]、ビームレットの断面積を S [m²]、荷電粒子の速度を v [ms⁻¹]、電流値を I [A] とすると、次の関係が成立する。

$$I = \rho v S \quad (\text{A-2})$$

これから

$$\rho S = \frac{I}{v} \quad [\text{Cm}^{-1}] \quad (\text{A-3})$$

(A-3)式を(A-1)式に代入すると、

$$E_r = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 v r} \quad (\text{A-4})$$

質量 m [kg]、電荷 q [C] の荷電粒子が、電位差 V [V] の電界で加速されたたとすると、速度 v は

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad (\text{A-5})$$

(A-5)式を(A-4)式に代入することにより、ビームレットの周辺部に形成される半径方向の電界 E_r は次式で与えられる。

$$E_r = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{m}{2qV'}} \quad (\text{A-6})$$

ところで、電極間距離を L [m]、電極間に印加される電圧を V [V] とするとき、電極間のある位置 $z = z'$ における電位 V' は、

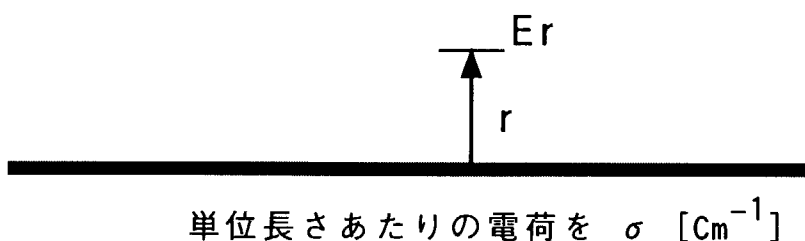
$$V' = \frac{Vz'}{L} \quad (\text{A-7})$$

この(A-7)式を(A-6)式に代入することにより、 $z = z'$ における半径方向の電界は以下の式で与えられる。

$$E_r(z') = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r} \sqrt{\frac{mL}{2qVz'}} \quad (\text{A-8})$$

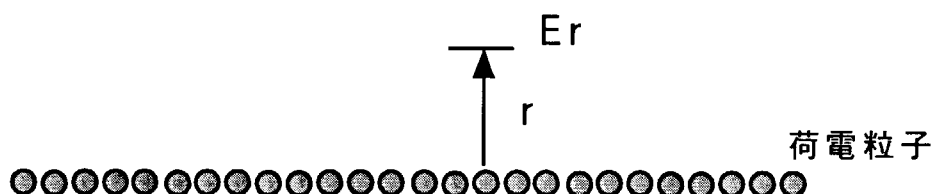
ただし、 $0 < z' \leq L$

(1) 一直線上に一様に分布した電荷による電場



$$E_r = \frac{\sigma}{2 \pi \epsilon_0 r} \quad (\text{A-1})$$

(2) 荷電粒子ビームの作る電場



単位体積あたりの電荷 ρ [Cm^{-3}],
 ビームの断面積 S [m^2],
 荷電粒子の速度 v [ms^{-1}],
 電流 I [A]

$$I = \rho v S \quad (\text{A-2})$$

$$\therefore \rho S = \frac{I}{v} \quad [\text{Cm}^{-1}] \quad (\text{A-3})$$

(A-1)と(A-3)式から

$$E_r = \frac{I}{2 \pi \epsilon_0 v r} \quad (\text{A-4})$$

第A-1図 半径方向に形成される電界 E_r

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	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	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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

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

(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 ⁻²⁸	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

