JAEA-Technology 2010-027



単極性静電ステアラーが引き起こす レンズ効果とその軽減対策

Lens Effect of Unipolar Electrostatic Steerers on Low-energy Ion Beams and Its Effective Reduction

> 遊津 拓洋 松田 誠 沓掛 健一 Takuhiro ASOZU, Makoto MATSUDA and Kenichi KUTSUKAKE

> > 東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center August 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

単極性静電ステアラーが引き起こすレンズ効果とその軽減対策

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

遊津 拓洋、松田 誠、沓掛 健一

(2010年4月27日 受理)

原子力科学研究所のタンデム加速器には2種類のイオン源があり、地上電位に設置している 負イオン源と、高電圧ターミナルに設置している正イオン源がある。高電圧ターミナルにおい てビームのエネルギーは、負イオン源由来のビームは1価あたり数 MeV であるのに対し、正 イオン源由来のビームは1価あたり約100keVである。高電圧ターミナルに設置している静電 ステアラーは両者のビームに共用としている。静電ステアラーは平行平板上の電極に電圧を印 加し、電極間の電界によってイオンビームを偏向させる装置である。高電圧ターミナルに設置 している静電ステアラーは、負イオン源からのイオンに対し数十kVの高電圧を必要とするが、 高電圧の双極性電源は製作が難しいため、対となる電極には2台の単極性電源によって共に正 の電圧を印加している。このため電極間に高い電位が存在する。正イオン源からのビームは低 エネルギーであるため、この電位によって生じるレンズ効果の影響が大きいと考えられる。そ こで、ビーム軌道のシミュレーション計算を行った。問題となる静電ステアラーの電極の形状 と電圧から計算した電位分布中へ、正イオン源由来を仮定した 100keV の陽子を入射させ軌道 を求めた。その結果、陽子の軌道は大きく歪み、ビーム下流の光学機器では十分に補正できな いことがわかった。レンズ効果の影響を抑える方法として、正イオン源由来のビームに対して、 電極電圧を必要最低限の値に制御することとした。シミュレーションにより、電極電圧を 10 分の1に設定することで、レンズ効果をビーム光学上問題にならない程度に抑えられることを 明らかにした。実際に静電ステアラー制御回路に改良を加えてビーム調整試験を行い、ビーム 通過率が大きく向上することを確認した。

Lens Effect of Unipolar Electrostatic Steerers on Low-energy Ion Beams and Its Effective Reduction

Takuhiro ASOZU, Makoto MATSUDA and Kenichi KUTSUKAKE

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 27, 2010)

The JAEA-Tokai tandem accelerator has two ion injectors, one is the negative ion injector placed on the ground and the other is the positive ion injector in the high voltage terminal. The electrostatic steerers in the high voltage terminal are used for ion beams from the both injectors. Because the beams from the negative ion injector gain high energy at the 20MV terminal, the electrodes of the electrostatic steerers are designed to be supplied several ten kV. The high voltages are supplied by two unipolar DC power supplies and they are controlled as the sum of the voltages keeps constant. The high electric potential between the electrodes affects the beam trajectory as an electrostatic lens. The potential must be too high for the low energy ion beams from the positive ion injector on the 100kV deck. We simulated the beam trajectory by calculation and evaluated the strength of the lens effects. The results showed that the focal distances were too short to control the beam form positive ion injector using optical devices in the downstream. If we reduce the voltages to one tenth in simulation, then the focusing effects were much less significant. We installed a multiplying factor circuit to make the voltages variable and much lower. The results of beam-handling tests using the circuit actually showed significant increase of the ion beam current.

Keywords: Beam Optics, Simulation, Electrostatic Steerer, Lens Effect, Low-energy Ion Beam, Multiplying Factor Circuit

目 次

1.	. 序論	1
2.	. タンデム加速器	2
3.	. 対象装置	4
	3.1 高電圧ターミナル内静電ステアラー(ESTH-1)の仕様	4
	3.2 ESTH-1 の原理とレンズ効果	6
	3.3 ESTH-1 の制御回路	9
4.	. シミュレーションによるレンズ効果の検証	10
	4.1 レンズ強度の導出方法	· 10
	4.21対の電極を持つステアラーのレンズ効果	10
	4.32対の電極を持つステアラーのレンズ効果	• 13
	4.4 考察	14
5.	. レンズ効果の対策	15
	5.1 電極対の中立点電圧制御によるレンズ効果の低減	15
	5.2 シミュレーションによるレンズ効果対策の検証	16
	5.2.1 電極電圧を 10 分 1 とした場合のレンズ効果	- 16
	5.2.2 考察	16
	5.3 乗算回路による中立点電圧の制御	18
	5.3.1 ビーム調整試験	18
	5.3.1 ビーム調整試験 5.3.2 考察	18 19
6.	5.3.1 ビーム調整試験 5.3.2 考察 . まとめ	18 19 20
6. 誹	5.3.1ビーム調整試験 5.3.2 考察	18 19 20 21

Contents

1.	Introduction	1
2.	Tandem accelerator	2
3.	Target device	4
ę	3.1 Specifications of electrostatic steerer in the terminal (ESTH-1)	4
į	3.2 Mechanism about ESTH-1 and lens effect	6
ę	3.3 Control circuit for ESTH-1	9
4.	Simulations for lens effect	10
4	4.1 Method of measuring focal distance	· 10
4	4.2 Lens effect caused by the electric steerer with 1-pair electrodes	10
4	4.3 Lens effect caused by the electric steerer with 2-pair electrodes	13
4	4.4 Discussion	• 14
5.	Measures of lens effect	15
ł	5.1 Reducing the lens effect by control the neutral voltage of electrodes	$\cdot 15$
ł	5.2 Simulations for measures of lens effect	16
	5.2.1 Lens effect for reducing electrodes' voltage in one tenth	16
	5.2.2 Discussion	· 16
ł	5.3 Control of the neutral voltage of electrodes by multiplying factor circuit	18
	5.3.1 Beam-handling test	· 18
	5.3.2 Discussion	19
6.	Summary	20
Ac	knowledgment	21
Re	ferences	21

1. 序論

原子力科学研究所の 20MV タンデム加速器では、イオンビームの加速を 2 通りの方法で行っ ている。一つは、負イオン源で発生した負イオンを正帯電した高電圧ターミナルに向けて加速 し、さらに電子ストリッパーフォイルにより正の多価イオンに荷電変換することで、再び地上 へ向けて加速するタンデム加速器本来のビーム加速方法である。もう一つは、高電圧ターミナ ルに設置された電子サイクロトン共鳴(ECR)イオン源を用いて、正の多価イオンを発生させ、 これを高電圧ターミナルから地上へ向けて加速する方法である。加速器のビームライン上には ビームを調整するためのビーム光学機器が多数設置されているが、高電圧ターミナルを含みそ の下流に設置されているビーム光学機器は、これら 2 通りの加速方法の両方に共用にしている。 ここで問題となるのが高電圧ターミナルに設置されている静電ステアラーである。

ステアラーとは、主にイオンビームがダクトや各ビーム光学機器の中心を通るようにイオン ビームを偏向する装置であり¹⁾、その偏向角は最大でも 0.1 度程度である。静電型のステアラ ーでは、ビームを挟むように設置された平行平板状の電極対に異なる電圧を印加し、電極間に 生じる電界によってビームを偏向する。電極電圧が最大数 kV 程と低い場合には、対の電極に は双極性電源によって正負対称の電圧が与えられる。これに対して、タンデム加速器の高電圧 ターミナルに設置されている静電ステアラーは、負イオン源からの加速において、地上電位か らターミナル電位までの最大 20MV の電位差によって加速された高エネルギーのビームを調 整するため、電極には最大 36kV の高電圧が印加される。このような高電圧を必要とするため、 開発費や設置スペース等の問題等から双極性電源を備えておらず、対となる電極には単極性の 電源 2 台によって共に正の電圧が印加される。ビームを偏向するための電界は、各電極の電圧 がその和一定に保ちながら電位差(バランス)を変化させることで生じている。このとき、バ ランスの中心となる電圧を中立点電圧と呼ぶことにする。この値は電極対間の電位差(有効電位 差)が最も大きくとれるよう、電源の最大出力電圧の半分の値に固定されている。このため電極 板の間には常に高い電位が存在し、通過するビームに対してレンズ効果を及ぼすと考えられる。

負イオン源を用いた加速の場合、この静電ステアラーを通過するビームは、最大 20MV のタ ーミナル電位で加速された高エネルギーの多価イオンであるため、レンズ効果の影響は無視で きるほどであると考えられる。しかし、ECR イオン源を用いた加速の場合、この静電ステアラ ーを通過するビームは、高々100kV で加速された低エネルギーの多価イオンであるため、レン ズ効果によってイオンビームの軌道が理想的な光学系 20から大きくはずれ、調整がより一層困 難になっていると考えられる。本報告はビーム光学シミュレーションによって、静電ステアラ ーが引き起こすレンズ効果の強度について述べるものであり、また、その対策として開発した 中立点電圧を制御する乗算回路を用いて行ったビーム調整試験の結果について述べるものであ る。

2. タンデム加速器

日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所の 20MV タンデム加速器(米国 NEC 製ペレト ロン 20UR)は、高電圧ターミナルに最大 20MV の高電圧が印加される静電型の粒子加速器で ある。図 2.1 にタンデム加速器の概略図を示す。負イオン源から発生した負イオンビームは質 量分析電磁石で質量分析され負イオン加速管へ入射する。高電圧ターミナルは正の高電圧とな るため負のイオンビームは高電圧ターミナルへ向かって加速される。高電圧ターミナルの入口 には電子ストリッパーがあり、電子がはぎとられることにより多価の正イオンへと変換される。 電荷分析電磁石で必要とされる電荷のイオンビームを 180 度偏向し、地上電位へ向け再び加速 することで高いエネルギーのイオンビームを得る。地上電位からターミナル電位、ターミナル 電位から地上電位の2段加速方式であることからタンデム加速器と呼ばれる。1998年には 10GHzの ECR イオン源が高電圧ターミナル部に設置され多価の正イオンを生成することが可 能となり³⁾、ターミナル電位から地上電位のみで加速を行うシングルエンド方式の加速器とし ても運転されている。さらに、2007年には ECR イオン源の更新に向けて設置位置が高エネル ギー加速管側から低エネルギー加速管側に変更され、2008 年に ECR イオン源はより高多価か つ高密度のイオンを生成可能なものに更新された4。高電圧ターミナル内のビーム調整機器は、 負イオン源から加速されるビームと ECR イオン源から加速されるビームの両方に用いられる ため、本件で扱う静電ステアラーに問題が生じることとなった。



3. 対象装置

3.1 高電圧ターミナル内静電ステアラー(ESTH-1)の仕様

高電圧ターミナル内部に設置されている装置の配置図を図 3.1 に示す。20MV タンデム加速 器の高電圧ターミナル部には、低エネルギー側(LE 側)、高エネルギー側(HE 側)に各一台ずつ の静電ステアラーが設置されている。LE 側には Y 方向のみの偏向機能を持つ1 対の静電ステ アラーが、HE 側では Y 方向、X 方向の偏向機能をもつ、2 対の静電ステアラーがそれぞれ設 置されている(ここで、ビームの進行方向を Z 方向とし、それに垂直かつ HE 側から LE 側へ向 かう方向を X 方向、それら 2 方向に対して右手系をなす方向を Y 方向とする)。今回、対象と したのは 2 対の電極を持つ HE 側の静電ステアラー(ESTH-1、図 3.2)である。ESTH-1 の主な 仕様を表 3.1 に、電極の寸法及び配置を図 3.3 に記す。



図 3.1 ターミナルにおける装置の配置





図 3.2 ES TH-1 の外観(左)と内部の電極(右)

ES TH-1	
偏向方式	静電方式
電極数	2 対 (ビーム上流より Y 電極、X 電極の順に配置)
Y 電極 最大印加電圧	24kV
X 電極 最大印加電圧	36kV
ビーム軌道方向電極長	114mm
ビーム垂直方向電極長	72mm
電極間	38mm
X-Y 電極間	25mm
ダクト内径	152mm

表 3.1 ES TH-1 の仕様



図 3.3 ES TH-1 における電極の寸法と配置

3.2 ESTH-1 の原理とレンズ効果

静電ステアラーでは、ビームを挟むように設置された平行平板状の電極対に異なる電圧を印 加し、電極間に生じる電界によってビームを偏向する。その偏向角 θ は、イオンの価数をq、 イオンのエネルギーを E、電極のビーム軌道方向の長さを l、電極間の距離をd、有効電位差 を V とすると

$$\tan \theta = \frac{q}{2E} V \frac{l}{d} \tag{1}$$

で表される関係にある 1)。

偏向に必要な電圧が最大数 kV 程と低い場合には、対の電極には双極性電源によって正負対称の電圧が与えられることによりビームを偏向する(図 3.4)。これに対して高電圧ターミナルに設置されている ESTH-1 では、ビームの偏向に必要な電圧は X 電極で最大 36kV に及ぶため、対となる電極には単極性電源によって共に正の電圧が印加され、その和を一定に保ちながら電位差(バランス)を変化させることで偏向する(図 3.5)。

ESTH-1において電極電圧を変動する際、バランスの中心となる中立点電圧の値は、有効電 位差が最も大きくとれるように電源の最大出力電圧の半分の値に固定されており、その値は、 Y 電極では 12kV 、X 電極では 18kV である。また、電極電圧がこの中立点電圧と一致すると き、対の電極電圧は互いに等しく偏向効果を生じない中立状態となる。

ESTH-1の電極対付近に生じる電位分布は、電位の重ね合わせの原理から、中立状態における電位分布と、0Vを中心として正負対称に電圧を与えられる双極性型の静電ステアラーの作る電位分布の重ね合わせとして表すことができる。前者の電位分布は図 3.6 のようであると考えられ、また電極の幅が有限であるため、出入り口付近では図 3.7 のような四重極電界を中心とした多重極電界が存在すると考えられる。このような電界により、レンズ効果が引き起こされると考えられる。



図 3.4 双極性電源を備えた静電ステアラーにおけるイオンビームの偏向方法



図 3.5 ESTH-1 におけるイオンビームの偏向方法



図 3.6 中立状態における電位分布の想像図



図 3.7 中立状態において電極の出入口部分に生じる電気力線の想像図(Z 軸に垂直な断面)

3.3 ESTH-1の制御回路

ESTH-1の電極電圧を制御する従来の回路の略図を図 3.8 に示す。対となる電極にはそれぞれ独立した単極性の高電圧電源が接続されている。2 台の高電圧電源の制御電圧はミキサー回路によって、その和を一定に保ちながらバランスを変動するよう設定されている。その結果、対の電極へ出力される電圧も同様に、その和を一定に保ちながらバランスを変動する。



図 3.8 ES TH-1 の従来の制御回路の略図

4. シミュレーションによるレンズ効果の検証

4.1 レンズ強度の導出方法

レンズ強度にはステアラーに平行ビームを入射した場合の焦点距離を用いることとした。焦 点距離が短いほどレンズ効果が強いこととなる。SIMIONTM8.0⁵⁾を用いてビーム光学シミュレ ーションを行い、その結果をもとに焦点距離を求めた。SIMIONTM8.0 では、まず電極の形状 と電位を指定し、それらをもとに空間の電界が計算される。得られた電界中で、初期値を指定 したイオンを入射させることにより各イオンの軌道が求められる。入射ビームは陽子とし、 1mm 間隔で X,Y 方向に各 21 個ずつ並べた幅 20mm の十字の平行ビーム(図 4.1 参照)とした。 また、そのエネルギーは負イオン源由来を仮定した 16MeV もしくは ECR イオン源由来を仮定 した 100keV とした。静電ステアラーは中立状態である場合とし、各電極の電圧は中立点電圧 でとした。求める焦点距離は、1 対のみの電極を持つ静電ステアラーとした場合にはその電極 対の中心から焦点までの距離としたが、2 対の電極を持つ静電ステアラーとした場合には便宜 上 2 つの電極対の中心を結ぶ線分の中点から焦点までの距離とした。



図 4.1 シミュレーションにおけるビームの初期値

4.21対の電極を持つステアラーのレンズ効果

単純なモデルとして X 方向の偏向電極のみを持つ静電ステアラーの場合において、ビーム軌 道のシミュレーションを行った。静電ステアラーの電極は X 方向のみとし、その電圧は X 電極 電圧(Ex)=18kV とする。負イオン源由来を仮定した 16MeV 陽子が入射した場合、ECR イオン 源由来を仮定した 100keV 陽子が入射した場合についてそれぞれシミュレーションを行った。

16MeVの陽子が入射した場合の軌道計算結果を図 4.2 に示す。16MeV 陽子の軌道はほぼ平 行のままであり有意な影響は見られなかった。次に、ECR イオン源由来を仮定した 100keV 陽 子ビームが入射する場合について同様にシミュレーションを行った。陽子の軌道計算結果を 図 4.3 に示す。100keV 陽子の軌道は、X-Z 平面(電極板に対し平行方向)では焦点距離~250mm の集束効果を、Y-Z 平面(電極板に対し垂直方向)では焦点距離~-200mmの発散効果を示した。 また、このときの電位分布を図 4.4 及び図 4.5 に示す。





図 4.3 Ex=18kV における 100keV 陽子ビームの軌道



図 4.5 電極の端から 5mm 離れた位置の X-Y 平面における電位分布(等電位線は 500V~13kV、500V 間隔)と電気力線のイメージ(太い矢印)

4.32対の電極を持つステアラーのレンズ効果

ESTH-1を想定した、X,Y 方向の2対の電極を持つ静電ステアラーの場合においてビーム軌 道のシミュレーションを行った。静電ステアラーの電極はビーム下流に向かいY 方向、X 方向 の順に2対並べた。各電圧はY 電極電圧(E_Y)=12kV、X 電極電圧(E_X)=18kV とし、負イオン源 由来を仮定した16MeV 陽子が入射した場合、ECR イオン源由来を仮定した100keV 陽子が入 射した場合についてそれぞれシミュレーションを行った。

電極電圧を Ey=12kV、Ex=18kV と設定した場合に 16MeV 陽子が入射した場合の軌道計算 結果を図 4.6 に、100keV 陽子が入射した場合の結果を図 4.7 に示す。16MeV 陽子の軌道は1 対の場合と同様に、ほぼ平行のままであり有意な影響は見られなかった。100keV 陽子ビーム が入射した場合には、X-Z 平面では焦点距離~610mm の集束効果を、Y-Z 平面では焦点距離 ~-440mm の発散効果を示した。また、この時の電位分布を図 4.8 に示す。



図 4.6 Ey=12kV、Ex=18kV における 16MeV 陽子ビームの軌道



図 4.7 Ey=12kV、Ex=18kV における 100keV 陽子ビームの軌道



図 4.8 Ey=12kV and Ex=18kV の場合の電位分布

4.4 考察

16MeVの陽子ビームが通過する場合、4.2節、4.3節のシミュレーション結果から、レンズ 効果の影響はほぼ見られないことがわかった。

100keV 陽子ビームが通過する場合、4.2 節のシミュレーションにおいて得られた焦点距離 (250mm 及び-200mm)は、静電四重極レンズに匹敵する焦点距離であり、強力なレンズ効果 であることがわかった。また、図 4.4 および図 4.5 の電位分布からは、レンズ効果の原因とな る多重極電界が見られる。4.3 節のシミュレーションにおいて、得られた焦点距離(~610mm 及 び~-440mm)は、4.2 節のシミュレーションにおける結果(~250m 及び~-200mm)に比べ数倍 長く、レンズ効果の軽減がみられた。Y 方向と X 方向の電極が並ぶことによって集束と発散が 同一平面で同時に生じ、一部効果が相殺されたと考えられる。しかし X-Z 平面における~610mm という焦点距離では、焦点位置が下流の静電四重極レンズの位置に近くなるため、この静電四 重極レンズの性能が十分に発揮できないと考えられる。実際の運転において十分影響のある値 であり、低減されることが望ましい。

5.1 電極対の中立点電圧制御によるレンズ効果の低減

簡単にレンズ効果の低減を行うには、原因である多重極電界を極力小さくすることが簡単で かつ有効である。そこでこれまで固定であった電極対の中立点電圧を可変制御し、低減させる ことでレンズ効果を低減する方法をとることにした。しかし、中立点電圧を低減させる場合に は、有効電位差の最大値も同じ割合で低減される。このため、低減させる割合を以下のように 決定し、その割合は10分の1とした。

ESTH-1の偏向角 θ は、(3.1)式より ESTH-1 に固有の項(I 及び d)の値を一定として、

$$\tan\theta \propto \frac{q}{E} V_{eff} \tag{5.1}$$

で表される関係にある。また、ESTH-1 において偏向角 θ の値は最大でも 0.1 度程度であるため、(5.1)式は

$$\theta \propto \frac{q}{E} V_{eff}$$
 (5.2)

と書き直すことができる。負イオン源からの加速の場合、1 価の負イオンがターミナル電圧 V_T で加速されるため、イオンのエネルギーは $E=V_T$ である。また、偏向されるイオンは、電子ス トリッパーにより荷電変換された十数価程度の正イオンであるため、この価数を qNIS とすれば、 この場合における偏向角 θ NIS は有効電位差を V_{effN} として、

$$\theta_{NIS} \propto \frac{q_{NIS}}{V_{\tau}} V_{effN}$$
 (5.3)

で表される。ECR イオン源からの加速の場合、ECR イオン源で発生した数価~数十価の正イ オンが V_{ECR} の加速電圧で加速されるため、正イオンの価数を q_{ECR} とすればイオンのエネルギ ーは $E=q_{ECR}$ · V_{ECR} ある。したがって、この場合における偏向角 θ_{NIS} は有効電位差を V_{effE} とし て、

$$\theta_{ECR} \propto \frac{q_{ECR}}{q_{ECR}} V_{effE} = \frac{1}{V_{ECR}} V_{effE}$$
(5.4)

で表される。ECRイオン源からの加速において、負イオン源から加速されたイオンビームと同 程度の偏向を行うために必要な有効電位差 VeffE は、(5.3)式、(5.4)式より

$$V_{effE} = q_{NIS} \frac{V_{ECR}}{V_T} V_{effN}$$
(5.5)

で表される。ここで、代表的な値として、ターミナル電圧 V_T を 16MV、荷電変換後の正イオ ンの価数 q NIS を 12 価とし、ECR イオン源からの加速電圧 V_{ECR} を 100kV とすると、 $V_{effE}=0.075V_{effN}$ である。したがって中立点電圧の値は、ECR イオン源由来のビームを調整す るための有効電位差を十分確保できる値として、従来の 10 分の 1 に低減することとした。

5.2 シミュレーションによるレンズ効果対策の検証

5.2.1 電極電圧を 10 分の1とした場合のレンズ効果

静電ステアラーの全ての電極電圧を従来の 10 分の 1 に設定した場合について、ビーム軌 道のシミュレーションを行った。静電ステアラーの電極は 4 章におけるものと比較するため、 単純に 1 対の電極を持つ静電ステアラーの場合、及び、ES TH-1 を想定した 2 対の電極を持つ 静電ステアラーの場合の両方で行った。静電ステアラーの電極電圧はそれぞれ Ex=1.8kV(Y 電 極無し)、及び Ey=1.2kV、Ex=1.8kV とし、ECR イオン源由来を仮定した 100keV 陽子が入射 した場合についてそれぞれシミュレーションを行った。

静電ステアラーの電極電圧が Ex=1.8kV(Y 電極無し)の場合の 100keV 陽子の軌道計算結果を 図 5.1 に示す。この場合の焦点距離は、X-Z 平面では焦点距離~2.8m の集束効果を、Y-Z 平面 では焦点距離~-2.5mm の発散効果を示した。また、静電ステアラーの電極電圧が Ey=1.2kV、 Ex=1.8kV の場合の 100keV 陽子の軌道計算結果を図 5.2 に示す。この場合の焦点距離は、X-Z 平面では焦点距離~7m の集束効果を、Y-Z 平面では焦点距離~-5m の発散効果を示した。

5.2.2 考察

ECR イオン源由来のビームに対して、静電ステアラーの電極電圧を従来の10分の1に設定 した場合、電極対数がいずれの場合も焦点距離にしておよそ10倍程度に低減された。7m、 -5m という焦点距離は高電圧ターミナルの静電四重極レンズの焦点距離に対して十分大きく、 またそれらの設置位置よりも十分遠いためビーム調整には影響を与えないと考えられる。中立 点電圧を10分の1に制御することによるレンズ効果の対策は十分効果的であると予測される。



図 5.1 Ex=1.8kV における 100keV 陽子ビームの軌道



図 5.2 Ey=1.2kV、Ex=1.8kV における 100keV 陽子ビームの軌道

5.3 乗算回路による中立点電圧の制御

5.2 節におけるシミュレーションの結果を踏まえ、中立点電圧の制御を行う乗算回路 ⁶⁾の開発・設置を行った。乗算回路は、高電圧電源から出力される電圧を任意の割合に制御するための装置である。

乗算回路を用いた制御回路の略図を図 5.3 に示す。制御側で出力割合を指示する乗算係数 (MF)値(0~1)を設定すると、それに対応する電圧 V_{MF}(0~10V)が乗算回路へ出力される。V_{MF} を受けた乗算回路は、1 次制御電圧に対して V_{MF}/10V(=MF 値)を乗じた値を 2 次制御電圧とし て出力することによって、高電圧電源から出力される電圧を制御する。これにより中立点電圧 も同じ割合で抑制され、レンズ効果を低減することが可能となる(図 5.4 参照)。



図 5.3 乗算回路を組み込んだ、ESTH-1の制御回路の略図



図 5.4 乗算回路を用いて中立点電圧を変化させた場合の指示電圧に対する電極電圧 (A:MF 値=1、B:MF 値=0.5、C:MF 値=0.25)

5.3.1 ビーム調整試験

乗算回路を用いて、中立点電圧を変化させて実際にビーム調整を行い、ファラデーカップに よって測定されるビーム電流値にどのような差が現れるかを試験した。

試験には ³⁶Ar⁸⁺のイオンを用い、1 次加速電圧を 100kV、ターミナル電圧を 15MV として実施した。まず、MF 値=1 の状態(乗算回路を用いない場合に対応)においてビーム調整を行った。 調整は ECR イオン源から、エネルギー分析電磁石の後方にあるファラデーカップ(FC 04-1、 図 2.1 に大まかな位置を示す)までの間で行い、FC 04-1 において電流値が最大となるよう調整 した後、高電圧ターミナル出口に位置するファラデーカップ FCTH-1(図 2.1 参照)及び FC04-1 における電流値を記録した。次に MF 値=0.1(電極の中立点電圧を 10 分の 1)とし、イオン源パ ラメータは固定してビーム光学機器(静電ステアラー及び静電四重極レンズ)のみを用いてフ ァラデーカップ FC04-1 におけるビーム電流値が最大になるように再調整し、同様に各ファラ デーカップにおける電流値を記録した。また、MF 値を変更してビーム光学機器の再調整を行 う際には ESTH-1 の値も再調整している。この際に、ビーム軌道が大きく変化していないかを 確認するため、ESTH-1 の電極電圧を共に記録した。

ビーム調整試験において、設定した ESTH-1 の電極電圧とファラデーカップ FCTH-1 および FC 04-1 により測定された電流値を表 5.1 に示す。

	ESTH-1 E _{X+} [kV]	ESTH-1 Ex- [kV]	ESTH-1 E _{Y+} [kV]	ESTH-1 Ey- [kV]	FC TH-1 [A]	FC 04-1 [A]
MF=1	18+0.66	18-0.66	12-0.02	12+0.02	$1.4 imes 10^{-6}$	$1.6 imes 10^{-6}$
MF=0.1	1.8 + 0.59	1.8 - 0.59	1.2 + 0.04	1.2-0.04	$1.9 imes 10^{-6}$	$2.2 imes 10^{-6}$

表 5.1 ビーム調整試験の結果

5.3.2 考察

まず、有効電位差は MF 値を変更する前後で大きな差は見られず、X 方向で約 1.3kV、Y 方向で約 0.03kV であった。よって、ほぼ同じ偏向角度となり、ビーム軌道に大きな差異は無いと考えられる。

FCTH-1の電流値から、MF 値を1から0.1にすることで、ビーム電流が約35%増加したこ とがわかる。FC04-1においても同様であり、イオン源パラメータを固定していることからイ オン源でのビーム生成量に変化がないとすると、高電圧ターミナル内での通過率が向上したと いえる。これは高電圧ターミナル出口にあるFCTH-1より上流において増加した要因が存在す ることを示しており、乗算回路による中立点電圧の制御によってESTH-1のレンズ効果が低減 されたことによる寄与と考えられる。したがって、乗算回路によりレンズ効果が低減対策され たといえる。

6. まとめ

原子力科学研究所・20MV タンデム加速器の高電圧ターミナル部に設置されている静電ステ アラーが引き起こすレンズ効果の影響をビーム光学シミュレーションによって調査した。その 結果、ECRイオン源を起源と仮定した100keV陽子に対し、実際の設定と同じ電極電圧である、 Y 電極電圧を 12kV、X 電極電圧を 18kV とした場合、X・Z 平面では焦点距離~610mmの集束 効果を、Y・Z 平面では焦点距離~440mmの発散効果を持つことがわかった。この場合の焦点位 置は、静電四重極レンズが設置されている位置にあたり、焦点距離も短いため、実際の運転に おいて十分影響のある値であり、低減させる必要があることがわかった。レンズ効果の対策と して、電極対の中立点電圧を 10 分の 1 に設定し、Y 電極電圧を 1.2kV、X 電極電圧を 1.8kV とした場合、X・Z 平面では焦点距離~7m の集束効果を、Y・Z 平面では焦点距離~5m の発散効 果を持つことがわかった。この焦点距離は、高電圧ターミナルの静電四重極レンズの焦点距離 に対して十分大きく、またそれらの設置位置よりも十分遠いためビーム調整には影響を与えな いと考えられる。これらを踏まえ、これまで固定であった中立点電圧を可変制御する乗算回路 の開発・設置を行いレンズ効果を低減することとした。乗算回路を用いてビーム調整試験を行 った結果、中立点電圧をこれまでの 10 分の 1 に設定することで、ビーム通過率が約 35%向上 することを確認した。

現在は、中立点電圧をより必要最小限に近い値である 20 分の1 に設定して ECR イオン源からのビーム加速を行っており、ビーム調整も容易となり安定したビームの加速を実現している。

謝 辞

本シミュレーション計算及び調整試験の実施にあたり、シミュレーションのサンプルプログ ラムを頂きました筑波大学・長江様、また、多くのご支援を頂いた研究炉加速器管理部・加速 器管理課の各位に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 石川 順三:「荷電粒子ビーム工学」, コロナ社, pp.101-110, pp.114-117 (2001).
- 2) J. D. Larson : "Electrostatic ion optics and beam transport for ion implantation", Nuclear Instruments and Methods, <u>189</u>, pp.71-91(1981)
- 3) 松田 誠, 竹内 末広, 小林千明: "タンデム加速器への ECR イオン源の利用", KEK Proceedings 99-22, pp.17-27(2000).
- 4) M. Matsuda, T. Asozu, T. Nakanoya, and K. Kutsukake : "Highly charged ion injector in the terminal of tandem accelerator", Journal of Physics; Conference Series, <u>163</u>, pp.012112_1-012112_4(2009)
- 5) D. J. Manura and D. A. Dahl : "SIMION[™] Version 8.0 User Manual", Scientific Instrument Services, INC.[™] and Idaho National Laboratory, (2007)
- 6) K. Kutsukake, et al. : "Remodeling of electronics for electrostatic steerers", JAEA-Review 2009-036, p.19 (2009).

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
盔半里	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	А				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
物質量	モル	mol				
光度	カンデラ	cd				

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
和辛雪	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面 積平	方メートル	m^2				
体 積立	法メートル	m^3				
速さ,速度メ	ートル毎秒	m/s				
加速度メ	ートル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数每	メートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キ	ログラム毎立方メートル	kg/m ³				
面積密度キ	ログラム毎平方メートル	kg/m ²				
比 体 積立	方メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電流密度ア	ンペア毎平方メートル	A/m^2				
磁界の強さア	ンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m ³				
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m ³				
輝 度力	ンデラ毎平方メートル	cd/m^2				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比透磁率(b)	数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) Lt. FIFT Z						

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立単位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m	
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2	
		sr II-	1	m m -1	
同 仮 多		пг		S .	
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²	
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量 比エネルギー分与					
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²	
線量当量,周辺線量当量,方向	2 2 2 1 (g)	C	T/la a	2 -2	
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(カタール) kat [s¹mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かけ性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	٥	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^{3}$ kg				

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が実験的に待られるもの								
名称				記号	SI 単位で表される数値			
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da			
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	CI単位しの粉ば的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ^{·1}			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」					

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	名	称		記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メー	-トル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg	
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m	

この印刷物は再生紙を使用しています