

EXPERIMENTAL STUDY OF DISPERSION CONTROL UTILIZING BOTH MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS

Mikio Tanabe*^{A)}, Akira Noda^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Masahiro Ikegami^{A)}, Hikaru Souda^{A)}
Koji Noda^{B)}, Shinji Shibuya^{C)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokanosyo, Uji-City, 611-0011, Kyoto, Japan

^{B)} National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

^{C)} Accelerator Engineering Co. Ltd., 4-9-1, Inage-Ku, Chiba-City 263-8555, Chiba, Japan

Abstract

We planed an experiment to store ion beams with no momentum dispersion in an ion storage ring, namely 'S-LSR', which is under construction at Institute for Chemical Research, Kyoto University. This is based on the principle that ion beams are bent by both magnetic and electric fields at the bending sections of this ring. In this principle, the magnetic fields are perpendicular to the median plane, and the electric fields are in radial direction. To prove this principle, we carried out an experiment to bend beams utilizing a single set of the bending element which is composed of one dipole magnet and one set of electrodes. We also designed and manufactured a set of electrodes to make precise electric fields (deviation of the field is requested to be less than 0.1%). Although the trial piece of the electrode were able to make only 20% precision of electric fields, the results of the beam experiment showed the tendency that the first term of the momentum dispersion is controlled under the condition that the strength of the magnetic and the electric fields are appropriately set. And we observed the second term of the momentum dispersion when the first term of the momentum dispersion is canceled.

磁場と電場による運動量分散制御の検証実験

1. はじめに

京都大学 化学研究所 (ICR) 附属 先端ビームナノ科学センターでは、イオン蓄積・冷却リング 'S-LSR' が現在建設中である。この蓄積リングは、電子ビーム冷却装置とレーザー冷却のための設備を備え、ビーム冷却実験を行うことができる。電子ビーム冷却装置では、7MeVの陽子の冷却、レーザー冷却では35keVのMg⁺の冷却実験が計画されている^[1]。

このリングの偏向部には、通常の蓄積リングで用いられる偏向電磁石による磁場に加え、中央面にたいして垂直方向で軌道半径方向の電場を加えることができるような電極が設置されている (図1)。

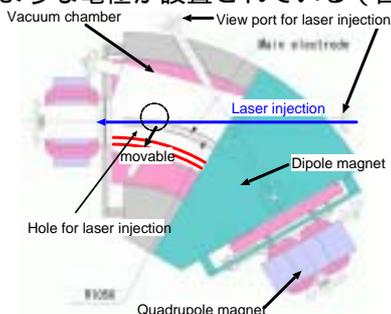


図1: S-LSRの偏向電磁石と電極の位置関係

これらの設備により、蓄積されるイオンを電場と磁場の両方で曲げることができる。

電場と磁場で曲げる手法のメリットに、ビームの運動量分散を制御できることがある。これは以下の理由による。簡単のために、リング偏向部で様な磁場 B が中央平面垂直方向下向きに、さらに様な大きさの電場 E が、軌道半径方向外向きにできている、とする。このとき、

$$vB - 2E = 0 \quad \dots (1)$$

が満たされた場合、ビームの分散の1次の項を消すことができることが発見されている^[2]。

運動量分散を消したモードでビームを蓄積することは、S-LSRで実験が計画されているビーム冷却実験で、極低温ビームを蓄積する際、特に、3次元結晶化したビームを蓄積する際に有効である、と考えられている^[3]。

2. 運動量分散制御の原理

図2のように、偏向部でmedian planeから垂直下向きに磁場 B 、軌道半径方向外向きに電場 E があるとき質量 m 、電荷 q の荷電粒子が軌道半径 r の円軌道を描くとすると

$$m \frac{v^2}{r} = qvB - qE \quad \dots (2)$$

となる。

* E-mail: tanabe@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

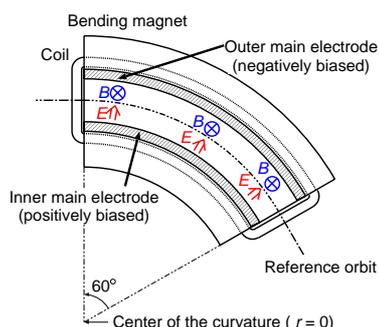


図2：偏向部に発生させる電場と磁場の概念図

ここで、荷電粒子の速度が微小量 Δv 増えたときに、軌道半径が微小量 Δr 増加するとして、(2)式に代入し、2次以上の微小量を無視する近似を行うと、

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{qr}{mv^2} \frac{\Delta p}{p} (vB - 2E) \quad \dots (3)$$

が得られる。(3)式右辺のカッコ内に注目すると、磁場と電場の大きさを調整することで、運動量分散を制御することができることがわかる。さらに、条件(1)式が満たされるとき、 $\Delta p/p$ の値によらず、 $\Delta r/r$ が0になる。このようにして、蓄積リングの偏向部で、運動量分散が0にすることができる。

さてここで、先ほど求めた(2)式に微小量 Δv 、 Δr を代入して展開する際、2次の微小量まで考慮すると、

$$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 - \left(\frac{\Delta r}{r}\right) = -\frac{vB - 2E}{vB - E} \left(\frac{\Delta v}{v}\right) + \frac{vB - 3E}{vB - E} \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 \quad \dots (4)$$

が求まる。(1)式が満たされるときも、(1)式右辺の第2項は残る。これが2次の微小量まで考慮した運動量分散である。

3．実験の概要

3.1 ビーム発生から偏向、位置測定まで

実験装置全体の様子は次の図3のようである。

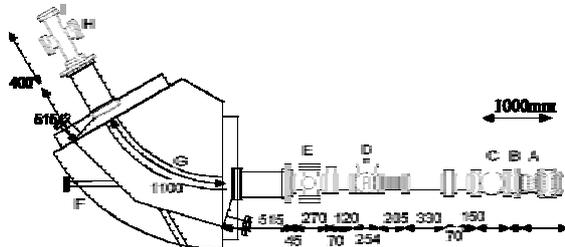


図3：実験系全体の概念図

装置は大きく分けて、イオン発生、ビーム輸送部、偏向部、出射後の位置測定部からなる。イオン発生部では、イオン源(図3のA、'CHORDIS'、DANFYSIK社)でイオンビームを発生させる。これをビーム輸送部にあるXYスリット(図3のD)で切ることで、ビームのサイズと位置を決める。さらに後方にある偏向部(図3のG)で、ビームは偏向される。こ

こにある偏向電磁石の磁場強度と、電極による電場強度は外部にある電源により調整可能である。偏向部を出射した後のビームは、さらに後方にある蛍光板(図3のH、アルミナ蛍光板、Desmarquest社)に当てて蛍光を発生させ、これをCCDカメラ(浜松ホトニクス製)で観測し、位置を決定する。

3.2 ビーム発生から偏向、位置測定まで

2章のような原理に基づいて、分散の制御できるイオン蓄積リングを実現したい。ここで、この原理を検証するために、実際に偏向要素へビームを通過させる実験を行い、電場と磁場による効果を確認した。実験に先立ち、偏向要素の準備を行った。磁場を発生させるダイポール電磁石は既に設計、製作されていたので、これにあわせて、精度の高い電場を発生させるための電極を設計、製作した(図4)。

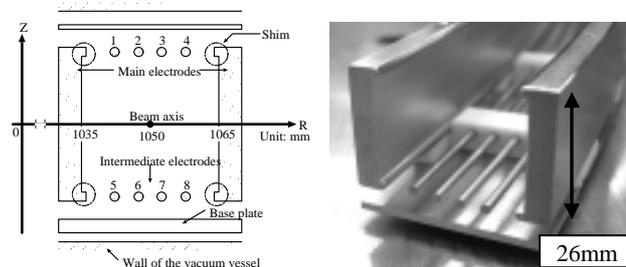


図4：設計した電極の断面図(左)と実物の写真(右)

電極の設計には3次元モデルでの電場計算による最適化を行い、誤差0.1%以内の電場がビーム軸から $\pm 5\text{mm}$ 程度の範囲内で実現できるように電極を設計した。

3.3 実験に用いた試作電極の問題点

今回、実験に用いた電極は未だ試作段階であり、問題点があった。それは、中間電極の一部がショートしており、電位を与えられないというものであった。電場の対称性を出すために中間電極2,3,6,7(図4の2,3,6,7)を電位0Vにして、他の電極に与える電位を調整することで改めて電場の最適化を行った。その結果、電場の誤差0.1%以内のgood field regionはビーム軸から1.0mm付近以内と、最適値の20%程度に減少した。今回は、この再最適化した電場(図5の右)を用いて暫定的に実験を行った。

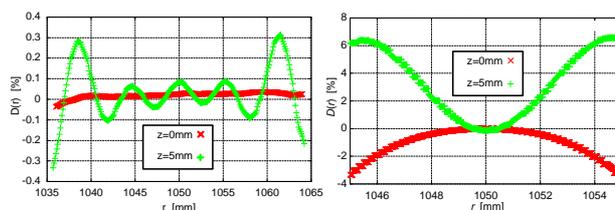


図5：電場の設計値(左=図4のときの電場)と中間電極の中央2組を使用しないときの最適化した電場(右)

4．実験の結果と考察

検証実験では偏向要素1台を用いた。ビームには

25keV付近のN₂ビームを用いた。vB-2E=0の条件を満たすとき、偏向部に必要な磁場は B=0.230 T、電場はE=4.67×10⁴ V/mであった。実験では、入射エネルギーをイオン源からの引き出しエネルギーを変えることで変化させ、それに伴う軌道半径の変化を調べた。

4.1 磁場のみの偏向と、分散が消える条件での偏向の比較

実験ではまず、磁場と電場を用いた偏向と、磁場のみの偏向で比較を行った。その結果が次の図6、図7のようである。概観すると、磁場のみに偏向した場合、ビームのエネルギー変化が±0.02%程度で測定範囲外にビーム半径が変化しているのに対し、vB-2E=0の条件下では、ビームエネルギーを±0.06%変化させても、ビームの軌道半径はほとんど変化しないことが分かった。運動量分散制御の効果を数値評価するため、式(4)より

$$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 - \left(\frac{\Delta r}{r}\right) = a\left(\frac{\Delta v}{v}\right) + (2a-1)\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + b\dots(5)$$

とおき、運動量分散の1次の項の係数 a を用いて行った。式(5)を用いてvB-2E=0の場合の結果をフィッティングをすると、a=0.010±0.074% (理論値はa=0) となり、運動量分散の1次の効果が消え、2次の成分まで見ることがわかった。なお、1次の運動量分散までの項で磁場のみの結果をフィッティングすると、a=1.2±1.9% (理論値はa=1) となり、こちらも妥当な結果が出ているといえる。

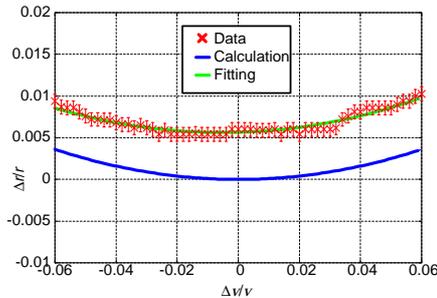


図6：電場と磁場を運動量分散が消える条件 (vB-2E=0) にしたときのビームエネルギー変化と、ビームの軌道半径の関係。

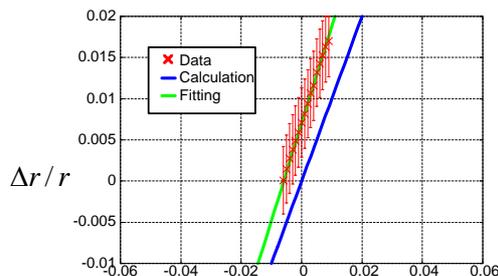


図7：磁場のみに偏向した場合の、ビームエネルギー

ギー変化と、ビームの軌道半径の関係。

4.2 vB-2E<0とvB-2E>0のときの比較

次に、磁場と電場の大きさの関係を変えて、ビームの軌道半径がビームの中心エネルギーによってどのように変化するかを調べた。その結果が次の表1のようである。

vB/E	実験による a	計算による a
2.67	0.48 (±1.4%)	0.40
2.25	0.21 (±0.56%)	0.20
1.83	-0.20 (±0.28%)	-0.20
1.71	-0.20 (±1.0%)	-0.40

表1：磁場と電場を変えたときの分散

これにより、電場と磁場の強度比を変えると、分散も変化していることがわかった。ただし、磁場に比べて電場が強くなる領域では、計算値からのずれが大きくなっている。これは、電場のgood field region が狭く、この領域から少しでも外れたイオンは、イレギュラーな力で偏向されることが原因であると考えられる。

5. まとめと今後の計画

磁場と電場による、運動量分散制御の原理を検証するために行ったビーム偏向実験について、報告を行った。今回の実験では、電場と磁場の大きさを適切に設定することによって、ビームの分散を制御できることが分かった。しかし、電極が未だ十分な性能を発揮できていないことから、電場のみにビームを偏向したときの、満足な結果が得られていない。電極のgood field region の評価や、運動量分散の制御ができる範囲を評価するには更なる実験を行わなければならない。

これらの結果をふまえ、製作した電極をS-LSR内に組み込み、最終的には、分散のないリングを実現したい。

6. 謝辞

本研究は、先進小型加速器事業の一環として行われました。

参考文献

- [1] A. Noda, Nucl. Instrum. Methods A. 532, 150 (2004)
- [2] M. Ikegami, M. Tanabe, T. Shirai, H. Tongu, K. Noda, M. Grieser and A. Noda, Nucl. Instrum. Methods A. 532, 492 (2004)
- [3] M. Ikegami, A. Noda, M. Tanabe, M. Grieser, and H. Okamoto, Phys. Rev. ST-AB, 120101, (2004)