

運動量分散制御用の偏向電磁石内設置電極の設計

田辺 幹夫^{A)}、野田 章^{A)}、白井 敏之^{A)}、頓宮 拓^{A)}、池上 将弘^{A)}、
野田 耕司^{B)}、渋谷 真二^{B)}

^{A)} 京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

^{B)} 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4丁目9番

概要

最初に、構造に工夫を加えていない、円筒型金属を電極に用いた構造で内部にできる電場を計算した。このデータを参考にして、主電極の間に中間電極を設置し、さらに、主電極の構造にもシムをつける、という変更を加え、電場の理想からのずれをビーム軸から水平方向に±1cm、鉛直方向に±0.5cmの範囲内で0.05%程度以内で実現した。

また、電極を実際に真空箱の中に入れるためには、電極を支持するための構造が必要となってくる。この構造を電極に含めた場合、電場が理想から数%ずれることがわかった。支持板がついた構造であっても、電場が理想に近くなるようにするために、再び電極の構造を調節した。これにより、ビーム軸から水平方向に±1cmの範囲内で理想からのずれを0.1%程度以内に抑えた電場を実現した。

1 はじめに

京大化研に建設中の S-LSR リングでは、偏向電磁石のギャップ内部に電極を設置し、電場と磁場を用いて運動量分散を制御する試みが行われる。この実験のために、電極を磁石のギャップ 70mm の間に設置して、精度の高い電場を実現するための電極の設計を行った。

進行方向に対して垂直、横方向に広がりを持ったイオンビームを運動方向に垂直な磁場で曲げると、入射位置の違いにより、ビームの内側と外側で偏向電磁石を通過する時間に差が出る。しかしここで、イオンの進行方向と、磁場の両方に垂直な電場を用いると、中心速度 \vec{v} のイオンに対して、電場 $\vec{E}(r)$ と磁場 \vec{B} が

$$2\vec{E}(r) = -(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

の関係を満たすとき、運動量の違いによる通過時間の差がなくなる[1][2]。これを検証する実験を行うための偏向電磁石はすでに製作されており、この偏向電磁石のギャップ 70mm の内側に上の条件を満たすような電場をつくらなければならない。そこで、電極の構造を工夫することで、限られた空間内に要求を満たすような電場をつくらることができるか、電場計算により調べた。

2 電極の設計方針

イオン源から出てきた Mg⁺ の、偏向電磁石への入射位置の違いによる、磁場内を通過する時間の差をなくす実験を行うため[1]、真空箱内に設置する電極の設計を行った。まずは、電極の断面と、各部の寸法と名称についての図を示す

(図1)。高さ 30mm、幅 5mm の主電極を、主電極の内側の間隔 30mm になるように設置した。また、主電極の上下に縦 2mm 横 1mm の断面を持つ中間電極を上下各 4 つずつ設置した。各電極の名称は、図 1 中の A, B を主電極 1, 2 とし、c, d, e, f, g, h, i, j を中間電極 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 である。また、図 1 中の丸で囲った部分をシムと呼ぶ。

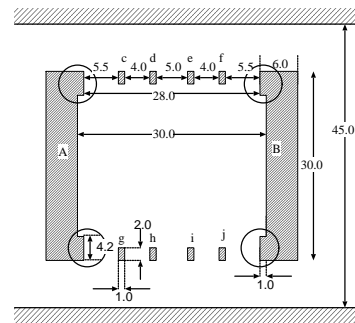


図 1 : 電極の構造(単位は mm)

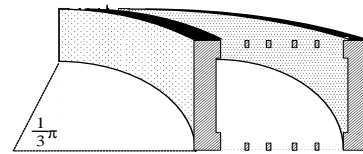


図 2 : 電極の立体図

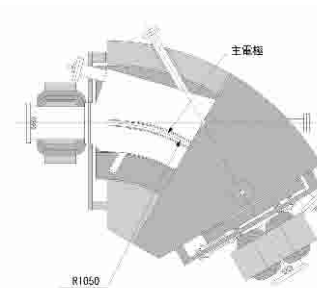


図 3 : 実際の偏向電磁石と主電極

電極は $r=0$ を対称軸とした軸対称になっており、図 1 は電極を断面で見たものである。実際のビームは図 2, 図 3 のように 60° 曲げられるが、今回の電場計算では一周 2π に渡って同じ構造があるものとして計算した。ビーム軸の位置を電位 0 とすると、ビーム軸より外側ではポテンシャルが低く、内側ではポテンシャルが高くなっていけば、ビーム軌道より外側に入射したイオンは加速され、内側に入射

したイオンは減速される。そこで、ポテンシャルを適当に設定すれば、入射位置の異なるイオンビームの内側と外側で、偏向電磁石の磁場内を通過する時間差をなくすることができる。このような電位になるために、電極内部にはビームの軌道中心から外向きで、対称軸からの距離 r 、比例定数 k とすると、 $E=k/r$ なる大きさの電場ができてることが要請される。比例定数 r を決定するために、35keV の 24Mg+イオンを s-LSR で周回させたときの条件として、軌道半径 $r=105.0[m]$ 、 $B=0.252[T]$ を用いて、 $E=666.666[v/cm]$ となることより $k=105.0 \times 666.666$ と決まった。理想的な電場の大きさは

$$E(r) = \frac{105.0 \times 666.666}{r} \quad (2)$$

となる。そこで、電場計算で得られた電場の大きさを $E'(r)$ とおき、理想電場からのずれ $D(\%)$ を

$$D = \frac{E'(r) - E(r)}{E(r)} \times 100 \quad (3)$$

で定義した。

実際にビームを通して実験ができるようにするために、このずれ D がビーム軸の中心から水平方向に ± 1 [cm]、鉛直方向に 0.5 [cm] の範囲内で $\pm 0.05\%$ 以内に収まることを目標に設計を行った。

3 電場計算

1. シムと中間電極の最適化

まず、図 1 のような電極で、シムと中間電極をつけていない場合に ビーム軸付近の電場がどのようになるか計算した。主電極に与える電位は、主電極 1 が 1007.2[V]、主電極 2 が -992.9[V] である。電場計算により求めたビーム軸とビーム軸から鉛直方向に +5mm 付近の電場は図 4 の 1 ($z=0$)、2 ($z=0.5$) のようになった。電極間中心付近で 6% 程度、理想より小さく、主電極付近で 6% 程度、理想より大きくなった。主電極付近 1, 2 で電場が理想の値より小さくなることを改善するために、両方の主電極にシムを取り付けた。シムのサイズを電場計算により最適化すると、 z 方向 4.2mm、 r 方向 1.0mm と決まった。また、ビーム軸付近での電場を理想に近づけるために、図 1 のような中間電極を取り付けた。中間電極は上下に各 4 つずつ、計 8 個で、中間電極の大きさは横 1mm 縦 2mm である。これらの中間電極に与えたポテンシャルを最適化すると、表 1 のようになった。

表 1: 中間電極の 座標と与えた電位

中間電極	中心の r 座標	電位(V)
1,5	104.2	538.8
2,6	104.7	211.3
3,7	105.3	-210.2
4,8	105.8	-536.3

シムと中間電極を取り付けた後のビーム軸とビーム軸から +5mm 付近の電場の分布は図 4 の 3 ($z=0$)、4 ($z=0.5$) のように変化した。

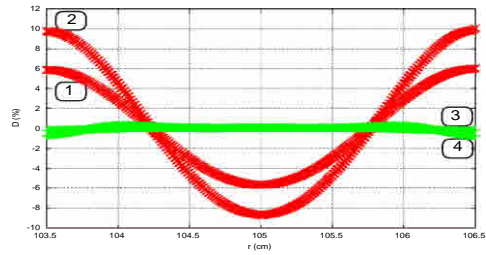


図 4 : 構造を変化させた後の電場の様子

この電場計算により、シムと中間電極をつけた後の電場は、理想からのずれをビーム軸から ± 1 cm の範囲内でおよそ 0.05% 程度に抑えることができた。

2. 電極支持構造の影響

実際の実験を行うためには、真空箱内に主電極と中間電極を固定しなければならない。そこで、主電極と中間電極を支えるために、次のような構造でモデル化を行った。まず、上の中間電極と主電極を厚さ 1mm のセラミック板で支え、そして、そのセラミック板の外側に、1mm の金属板を置いた。この金属板は電極の下側との対称性のために置いている。下側は金属で支えるが、絶縁のために 1mm のセラミック板を挟み、その外側に厚さ 3mm の金属板を置いて支えた。この金属板とセラミック板をあわせて支持板とよぶことにする。ここで、セラミックの比誘電率は 6.0 とした。この構造におけるビーム軸 ($z=0.0$ [cm]) とビーム中心から鉛直方向に +5mm の場所 ($z=0.5$ [cm]) 付近の電場を計算すると図 5 のようになった。

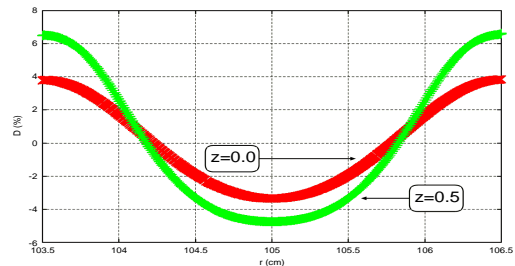


図 5 : 支持板を取り付けたときの電場の様子

電極を支える構造を加えると、電場は明らかに理想から離れる。この原因は、支持板付近の等電位線を比較することによりわかる。

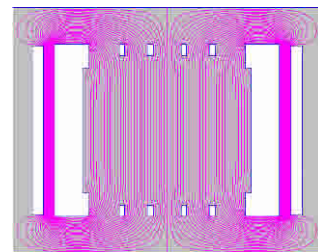


図 6 : 電極支持板のないときの等電位線の様子

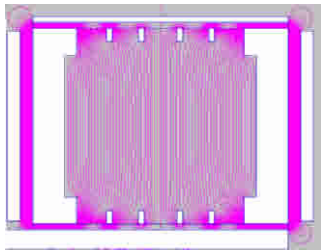


図7：電極支持板のあるときの等電位線の様子



図8：(左)支持板をつけたときの中間電極2,3付近の等電位線の様子と(右)支持板をつけたときの主電極1付近の等電位線の様子

図6は電極支持板をつけていないときの電極付近での等電位線の様子で、図7は電極支持板をつけたときの電極付近での等電位線の様子である。これらを比較すると、電極の上下に金属板が存在していることが電場に影響していることがわかる。電極外部の等電位線が電極外部で急激に湾曲し、中間電極2と3の間では等電位線の間隔が疎になり(図8左)、電場が相対的に弱くなっている。主電極1,2付近では、等電位線の間隔が密になり(図8右)、電場が相対的に強くなっている。

図中の白抜き部分は金属を表している。また、主電極1,2の外部にそれぞれ金属が取り付けられているが、これは電場が外部に広がるのを防ぐためのシールド板で、これによって電極内部の電場が受ける影響は十分小さい。

これを改善するために、電極の構造で、主電極の高さを34mmに変更し、上下の中間電極の間隔も30mmに広げた。主電極と中間電極から、上下の金属板までの距離をできるだけ広く取るため、さらに上下のセラミック板の厚さを2mmに変更した(図9)。そして、シムの大きさをもう一度最適化し、r方向の長さを1.0mmから1.7mmへと変更した。

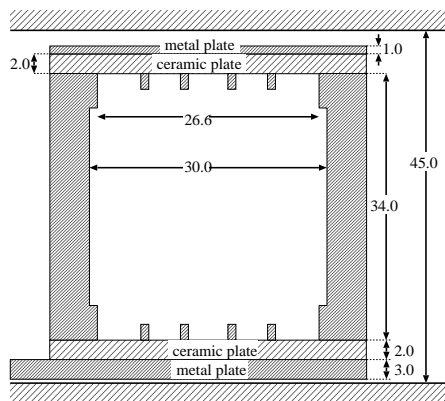


図9：支持板取り付け後、シムを最適化した電極の構造(単位はmm)

また、各電極に与える電位を表2のように設定した。

電極	電位(V)
主電極1	1007.2
中間電極1,5	603.8
中間電極2,6	299.3
中間電極3,7	-292.2
中間電極4,8	-656.3
主電極2	-992.9

最適化した後の電場分布は図10のようになる。

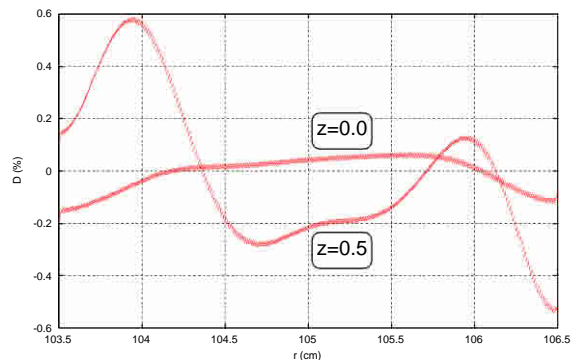


図10：支持板取り付け後、シムを最適化した電場の様子

この変更により、ビーム軸(z=0)付近で理想から3%程度小さくされていた電場を、およそ0.1%程度にまで抑えることができた。また、主電極1,2に近づくにつれて理想から大きくずれていた電場を、ビーム軸から+5mm,水平方向に±1cm内で0.5%程度に抑えることができた。

4 結論

電極にシム,中間電極を取り付けることにより、断面が縦横3cm程度の小さな電極でも、式(2)のような電場を、ビーム軸から水平方向に±1cm,鉛直方向に±0.5cmの範囲内で0.05%程度の理想からのずれに抑えて電場計算上で実現することができた。

電極を支えるために、金属板が電極近くに存在する場合でも、シムの形状を変更することにより、ビーム軸の位置で水平方向に±1cmの範囲内に理想からのずれで±0.1%程度まで電場を改善することが可能であった。今後は中間電極の断面構造を円形にすることや、シムの形状を変形することで、電場をより理想に近づけることが考えられる。

参考文献

- [1] M. Ikegami, et al., Phys. Rev ST- AB, 投稿中
- [2] W.Hennelberg, Ann. D. Physik 19,335 (1934)