

超強力永久磁石によるビーム光学系

岩下芳久^{1,A)}、熊田雅之^{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)}独立行政法人放射線医学総合研究所 加速器物理工学部

〒263-8555 千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

最近、永久磁石を用いて4.45 Tという超伝導磁石なみの二極磁場を発生できることが実証された。加速器の小型化に貢献するこの技術の幾つかの応用を紹介する。また、四極磁石を構成し、リニアコライダの最終集束レンズを構成する案について考察する。

1. はじめに

近年、加速器の小型化が必要とされてきている。このような中、最近、永久磁石を用いて4.45 Tという超伝導磁石なみの二極磁場を発生できることが実証された。これを使ってビーム光学系を構成することにより、偏向磁石の小型化は言うに及ばず、アンジュレーターや四重極磁石などの高性能化が可能になると考えられる。ここではその応用や可能性などを紹介する。

また、リニアコライダの最終集束においてはnm程度にビームを絞る必要があり、強い集束力が要求される。ここに永久磁石を用いた四極磁石を適用することを検討している。

2. 飽和鉄を用いた高磁場永久磁石

2.1 二極磁石

希土類永久磁石を用いて二極磁場を発生させる場合、Halbach配列(図1参照)を用いることにより、強力な磁場を発生させることが知られている^[1]。Halbachの導出した(近似)理論式は以下のように表すことができる(分割数を上げていったときの極限)。

$$B = B_r \ln(r_1/r_2)$$

この値は内径と外径の比を大きくすることにより、原理的には無限に大きくすることができるが、対数関数なので、大きくするには実用上限界がある。この比は常識的なサイズとしては内径1 cmに対し、外径10 cmとして10倍程度なので、ざっと2.3倍が妥当な係数となろう。残留磁化1.3 Tの磁石素材を使えば3 T程度はクリアできることになる。外径を1 mと言う巨大なものにすれば4.6倍という数字が得られるが、長さもm程度のものにな

るため、その重量は数トンにもなってしまう。また、実際には図中上向きの磁化を持っている磁石の内側の磁力線が反転していることからわかるように、B-H曲線で言えば第3象限のかなり深いところになっているので、よほど硬い(Hcの大きい)磁性材料でないとこの領域が減磁してしまう。

この領域の磁石を、発生させるべき磁界に対して垂直な磁化方向の磁石に置き換えても計算上大きな磁場の低減はない。こうすることにより、原理上はどんなに大きな磁場中でも減磁することなく、磁場の重ね合わせができることになる。しかし、実際にはこのような強い直交磁界中での挙動に対する報告はほとんどなく、自明ではない。

一方、図1の左上の磁石の内周付近に注目すると

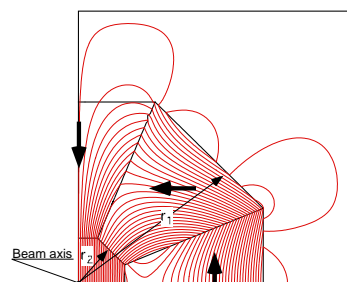


図1 Halbach's dipole REC magnet.

B-H曲線上の動作点としては第一象限の磁場の大きな領域にすることがわかる。この領域ではただの鉄も永久磁石も同様に振る舞う。そこで考案されたのが改良型Halbach磁石である(図2)^[2]。この方式では永久磁石の一部を鉄で置き換える。従来の磁気回路と異なるのはこの鉄

のギャップに近い部分を飽和させてしまうところである。鉄を飽和させることで鉄は飽和磁化を持つ状態になる。その飽和磁化の大きさはありふれた鉄材でも2 Tと最強の永久磁石材NEOMAXより強い。ギャップ近傍では鉄は完全飽和しているが、外側では鉄はまだ飽和していない。この飽和していない部分では鉄は磁束を集める働きを残しており、内側の磁石材料に逆磁場のかかる割合を減少させる働きをもつ。また、NEOMAXの飽和磁化などはSmCo系の磁石と比べて比較的大きな負の温度係数を持つことが知られているが、これを積極的に利用して、

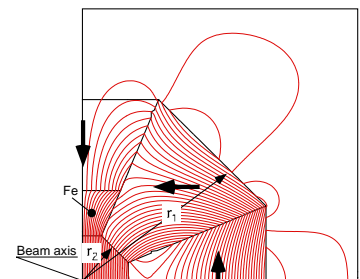


図2 Modified Halbach's magnet.

¹ E-mail: iwashita@kyticr.kyoto-u.ac.jp

LqN 温度程度まで冷やせば常温と比べて1割以上の向上が得られる。これらの原理を用いて試作されたのが図3の4. 45 T永久磁石である^[3]。

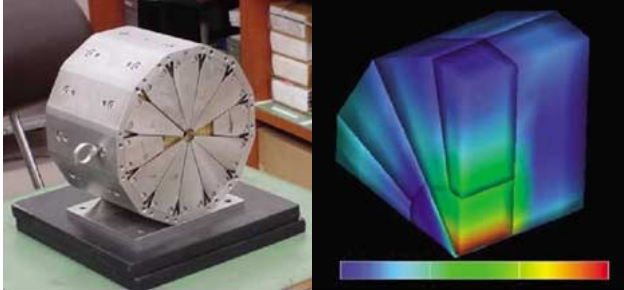


図3 4.45T permanent magnet and its magnetic flux density.

2.2 四極磁石

四極磁場の場合の公式は次のようになる。

$$B = 2B_r \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)$$

この場合、磁石素材の残留磁化の2倍までの磁束密度が内径表面上で得られる。四極の場合でも二極の場合と同様に磁極内径に近い部分を飽和鉄を置き換えることにより磁場勾配を上げることができる(図4参照)。

図では鉄をさらに飽和磁化の大きいパーメンジュールに変えたときの磁場も示している。いずれにしても多極成分が増えるため、内径近くの形状を細工して磁場分布を最適化する必要がある。

2.3 スケーリング

スケーリング則は次のように説明できる。

二極の場合：双極子を水平面に対して原点の上下に対称に同方向に置くと、その原点での2極成分への寄与は r^3 である。しかるに、原点から r 離れた $\delta\Omega$ の立体角で δr の厚さの球殻中に含まれる体積は r^2 に比例するので、 r 離れた所からの寄与は r^1 となり、体積積分すると対数依存性をもつことがわかる。

四極の場合：同様に双極子を逆方向に置くと、その原点では2極成分がキャンセルされ4極成分が最低次となり、その寄与は r^4 となる。そして、 r 離れた所からの寄与は r^2 となるので体積積分すると r^1 の依存性となる。

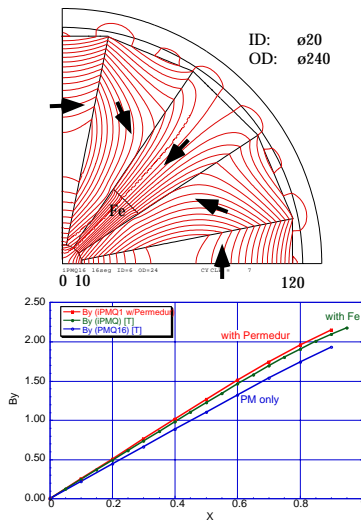


図4 Permanent Magnet Quadrupole with saturated iron.

3. 強度の可変方法

光学系としては、強度を可変にしたい局面が多々あるが、永久磁石を使った光学系の最大の難点はこの可変性である。これについては幾つかの方法が考えられ、一つはビーム軸方向に永久磁石と電磁石を交互に並べ、全体としてのBL積、GL積を可変とするハイブリッド形式のものである(図5参照)。図のダイポールの例ではコイルスペースを節約するために全体を一つのコイルで励磁する構造になっているが、永久磁石の部分のコイルからの寄与は大きくないため、電磁石とは独立している。B=3Tの永久磁石を磁石長さの64%、残りを電磁石とし、±1.8Tふると、平均磁場(BL積)で2倍の可変幅がとれる。すべてレクタングュラーマグネットなので、第一近似では偏向面内の収束はない。これと鉛直方向にはエッジアングルがBL積につれて変わる。

この永久磁石の部分にも鉄を被せることができる(図6参照)。電磁石としてのギャップ間隔が大きく、磁気抵抗は大きいため大きくは変化しないが、それでも外部磁場により0.7Tほど永久磁石中での磁場が動くので、全体としての可変範囲を大きくすることができる。いずれにしても電磁石と組み合わせることにより永久磁石の温度変化分を電流で補正できるのもハイブリッド型のメリットである。

四極の場合、半径の大きな所からの寄与は大き

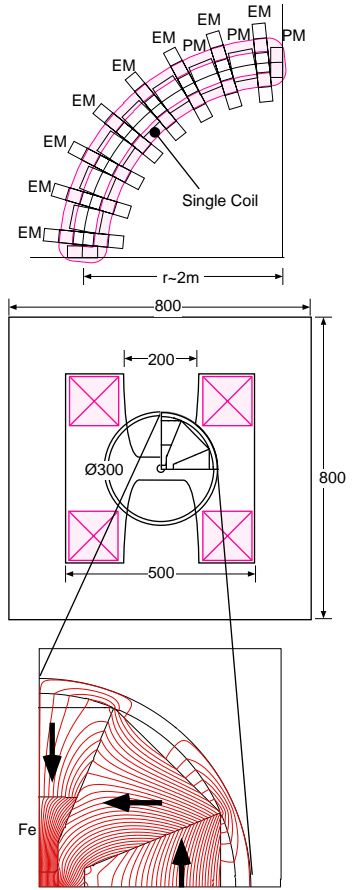


図5 Saturated iron core magnets and electromagnets are placed alternately where the coils are wound together.

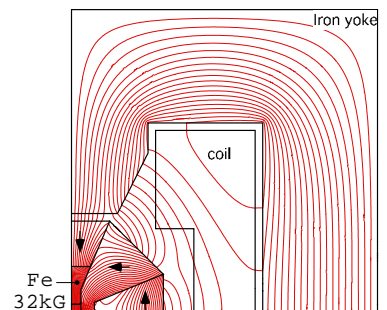


図6 Saturated iron core magnet installed in the gap of an electromagnet.

くないので、外部磁界の重ね合わせによる磁場勾配の可変方法は期待できない。このため、磁気回路を変えて磁場を調整する方法を採ることになり、磁石を内側と外側に分割し、外側を回転させる方法や、一個のQを前後に分割して互いに逆方向にまわす方法などがある。前者の場合は磁極に（飽和しない）鉄を用いる事が多いようだが、スキュー成分がでにくい一方、構造が多少複雑になる。後者は原理的には 0~100%の可変範囲があるが、中間状態では本質的にスキュー成分が存在し、ビームのベータ関数が大きく変化しない場所以外ではよほど細かく分割しないかぎり使いにくい。

4. リニアコライダーの最終集束

リニアコライダーではその衝突点でビームを nm サイズにまで絞り、ルミノシティーを稼ぐ（図 7 参照）[4]。オプティクスはディテクターの仕様はかなり左右され、設計にもよるがかなり強い磁場勾配（~150T/m）が必要とされる。現時点では超伝導、常伝導、永久磁石の 3 種類のオプションが考えられているが、このように比較的小さなアパーチャーの場合には永久磁石による四極磁石がその強みを発揮する。ビーム軸上で単一の衝突点を構成するため、ビーム軸は 8mrad 程度の交差角を持つ。このため、衝突点を通り過ぎた後のビームは反対側のレンズと干渉する可能性がある。3 種類のオプションでそれぞれ対応策が異なり、超伝導ではアパーチャーを大きく取ってどちらのビームもレンズに当たらないようにし[5]、常伝導ではボールの隙間が空くことを利用してレンズとしてのアパーチャー大きくせず、通り過ぎてきたビームを通り抜けさせる（図 8 参照）。永久磁石では元々外径が小さいので、通り過ぎてきたビームを磁石の外を通すようにできる（図 9 参照）。衝突点から最寄りのレンズまでの距離は 2m 程度なので、外半径 16mm をクリアするレンズが要求される。場合によってはビームと干渉する部分のセグメントの外縁部を取り除くことでこのマージンを増やすことも考えられる。

JLC ではビームエネルギーを変えるために集束強度を可変にしたいという要望があり、永久磁石ではひと工夫必要となる。衝突点近くでの許容外半径が小さいため、入れ子構造ではなく軸方向に分割して廻さざるを得ないが、ビームが非常に扁平なため、スキュー成分の発生は避けたい。このため、一つの四極磁石を複数個に分け、一つおきに 0°ないし 90°

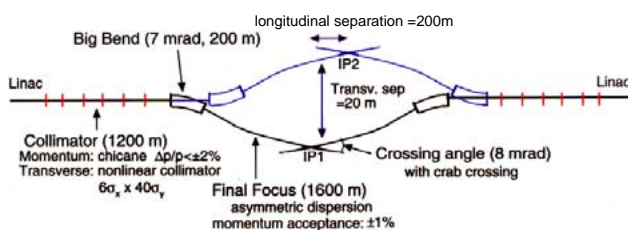


図 7 JLC Beam delivery system

の回転角を切り替え、全体としての集束力をディスクリットに可変とすることを考えている。この領域はディテクターのソレノイドの磁場が大きく、補償コイルでうち消すことも考慮しているようだが、ゼロにはならないので、磁場中でも働く駆動機構が必要になる。これ

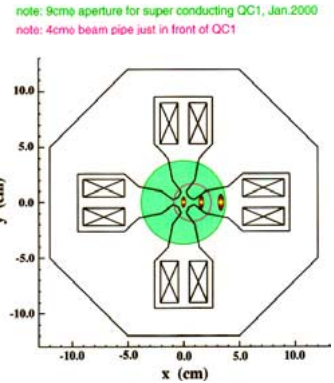


図 8 Beam position in QC1

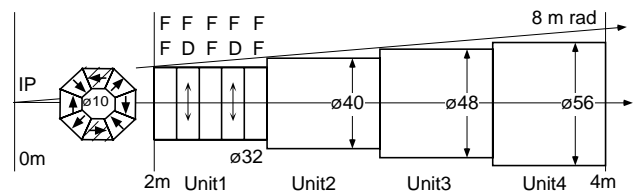


図 9 Layout of a final focus Q lens.

には超音波モーター[6]か、空圧シリンダー等が考えられる。ベータ関数の変化が小さいところでは超音波モーターによる回転機構を使えば連続的に可変できるが、スキューの許容範囲については詳細な検討が必要である。

いずれにしても軸受けとしてベアリングを使わずを得ないが、回転時の軸ずれなどをサブミクロンで補正する技術の開発も必要である。また、NdFeB系の素材は SmCo 系に比べて放射線に弱いとされているが、永久磁石の放射線照射による減磁は線種にもよるので、システムティックなデータの取得が急務である。このような減磁や、温度変化で強さは変わるがこれは上流の光学系で調整可能であると見ている。外から来る振動による影響のフィードバックなども今後の課題である。

参考文献

- [1] K.Halbach, IEEE, Trans., NS26(1979),3882, NIM, 169(1989) 1, NIM,187(1981) 109, NIM,198(1982) 213
- [2] 特願 2001-086098 磁界発生装置、熊田雅之、幸田勉 M.Kumada, T.Fujisawa, Y.Hirao, M.Endo, M.Aoki, T.Kohda, Y.Iwashita, Bolshakova, R.Holyaka, "Development of a model 4 tesla diopole magnet", To be published in pac2001, June,18-22, 2001, Chicago M.Kumada, T.Fujisawa, Y.Hirao, M.Endo, M.Aoki, T.Kohda, Y.Iwashita, Bolshakova, R.Holyaka, "Development of high field permanent magnets", To be published in MT17 (International magnet technology conference), 9/24-28,2001, Geneve
- [3] M. Kumada et al., patent pending. CERN Courier, volume 41,number 7,September 2001, p. 9, M. Kumada et al., apac01, 9/17-21,2001,Beijing,China
- [4] <http://www.walkuicrkyoto-uac.jp/www/accelerator/sspm/Tauchi.pdf>
- [5] <http://www.walkuicrkyoto-uac.jp/www/accelerator/sspm/Tsuchiya.pdf>
- [6] <http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/topj.html>