

超強力永久磁石による四極磁石

三原 貴憲^{1,A)}、岩下芳久^{A)}、熊田雅之^{B)}、青木雅昭^{C)}、E. Antokhin^{D)}

^{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 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

^{C)}住友特殊金属株式会社 マグネット応用開発部

^{D)}BINP, Novosibirsk, Russia

概要

Halbach型の磁気回路配列に磁気飽和鉄を導入して発生磁束密度を上げる手法を用いて永久四極磁石を試作した。この磁石と、その測定結果について報告する。また、温度補償、集束強度の可変性を検討している。

1. はじめに

永久磁石の改良型Halbach磁気回路^[1]により、4.45Tという超電導並みの二極磁場を発生できる事が立証された^[2]。この技術を応用し、改良型Halbach磁気回路を用いた四極磁石によってリニアコライダー用最終集束レンズを構成する事を検討している。現在までに、試作機を作り、SLACにおいて磁場測定も行なった。その測定結果を元に、その性能について報告する。

この永久磁石を用いた四極レンズの利点は小型で非常に強い集束力を持つことである。解決すべき問題点としては主に二つが挙げられる。一つには永久磁石の発生磁場が温度依存性を持つことで、一般には整磁合金が使われる。もう一つは、集束強度の可変性が必要になるという点である。これは軸方向に磁石を分割してそれぞれを回転することによって実現することを考えている。

2. 永久磁石による四極レンズ

NdFeBを用いた強力な永久磁石NEOMAXを用いて、改良型Halbach磁気回路を用いた四極磁石を製作した。Fig.1は概観図である。構成要素は永久磁石と軟鉄。強く飽和した鉄は同じ動作点において、永久磁石よりも強い磁束密度を持つ。Fig2の左は磁場計算コードPANDIRAによる磁束の様子がプロットされているが、軟鉄部分の磁束が非常に強く、そろっていることがわかるであろう。

試作機では特に、この原理による磁場勾配の到達点を確認する必要性がのため、中心部での勾配に注目して構成を行なっている。端まで軟鉄を入れておくと磁束が軸方向に逃げるため、内側に磁化方向を持つ永久磁石を入れて磁場勾配の極大化を図っている。(この磁石をoption magnetと呼んでいる。)

最大磁場勾配ではなく最大GL積を達成するためには、option magnet部分を磁石ではなく軟鉄で埋めた方がよい(これについては後述する)。

Fig3は現物の写真である^[3]。へこんだ部分にoption magnetが入る構造になっている。

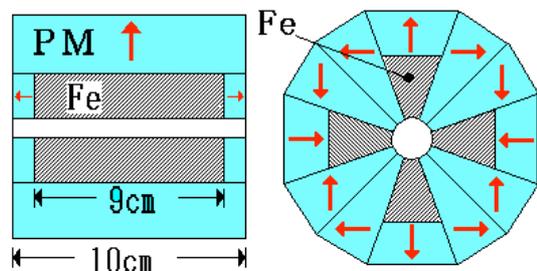


Fig.1 四極レンズの断面図。左が軸に平行に、右が軸に垂直に切った図。左の図で、軸方向の端にある磁石は漏れ磁場を押さえ込む働きをする。

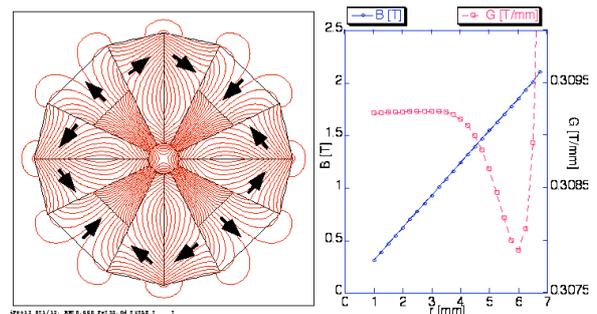


Fig.2 飽和鉄を含んだ永久磁石四極レンズ

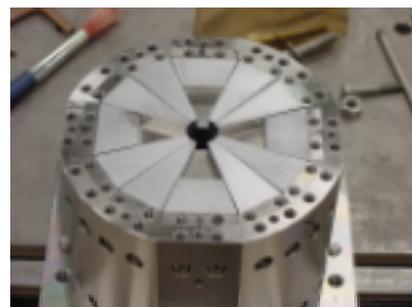


Fig.3 永久磁石四極レンズ。

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

3. 試作機の性能

3.1 SLACでの測定結果

試作した四極レンズはSLACで、rotating coilによる磁場測定を行なった。測定結果から、GL積は28.5[T]である事が解った。磁場計算コードによる計算値が29.7[T]で、誤差5%以内に収まっており、比較的良好である。

同時に多極成分についての測定も行なった。その結果がFig.4である。対称性から、発生多極成分としては4極の上は12極であり、2,6,8,10極成分等はずである。実際にはこれらの成分が観測された。

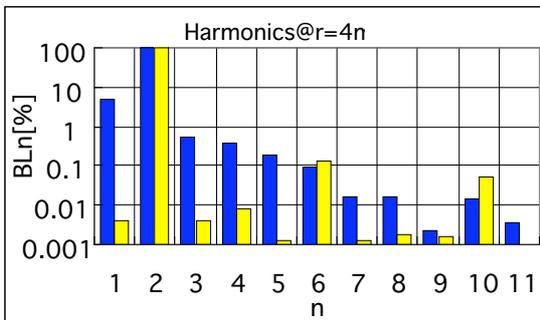


Fig.4 多極成分。左が測定値、右が計算値。測定値では四極成分と十二極成分以外の値が予想よりも大きい。

3.2 多極成分の起源と対策

dipole, sextupole, octupole, decapole等の多極成分の原因を探るべく、以下の仮定を置いて分析を行なった。

- ・ 特定の磁石の減磁(着磁の不具合)
- ・ 特定の磁石の磁化方向のずれ

計算には二次元磁場コードPANDIRA、三次元磁場コードTOSCAを用いた。

特定の磁石の不具合

四極磁石は、12個の磁石と四つの鉄で構成されている。そのうちの特定の一つの磁石の不具合があった時の振る舞いを調べた。

まず最初に、測定された磁場の高次成分の軸中心の円周上での振る舞いを見るために、sextupole以上の高次成分をplotした。

Fig.5と比べるために、PANDIRAを用いて、磁石のうち一つの磁力を10%下げて計算してみたが、大きい影響は見られなかった。次に、一つの磁石の磁化方向を20°回転して、Fig.5と同じ様にsextupole以上をplotしたのがFig.6である。

このグラフは、12個の磁石の中で、怪しいと思われるいくつかの磁石の磁化方向を変えてみたもののうちのの一つであるが、グラフの形状が非常によく似ている。グラフの触れ幅は回転角に大体比例している。これが原因だとすれば、予備の磁石を作っておいて、素性のよいものを選べば改善できる。

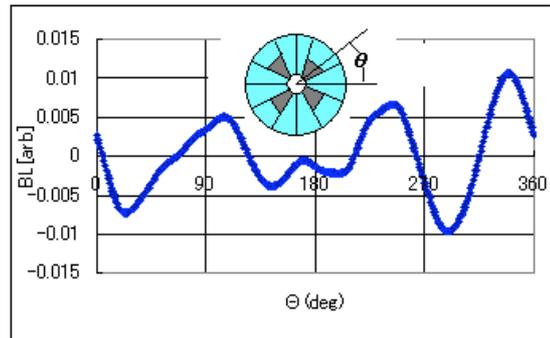


Fig.5 測定値の、sextupole以上の高次成分のplot。

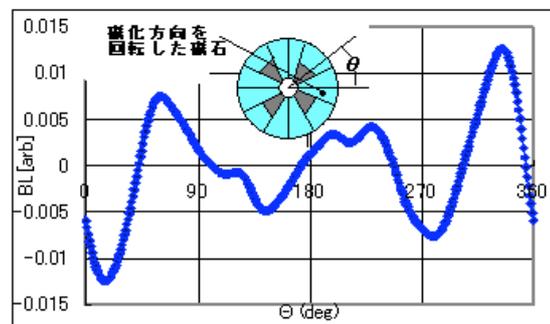


Fig.6 磁石のうちの一つの磁化方向を時計回りに20°回転させた計算値。

4. 温度補償

約-0.11[%/K]という温度係数を持つ永久磁石では、周囲の温度変化によって発生磁場が変わるという欠点がある。この変化を整磁合金を用いて補正することを検討した。

この磁気回路の場合、鉄が入っているため、温度係数は永久磁石のみの場合に比べて小さくなり、温度係数は約0.09[%/k]になる。ここではGL積を大きくするためにoption magnet部分を軟鉄で埋めたものを基準としている。様々な配置について、TOSCAを用いて最適化を行なった (Fig.7参照)。整磁合金の量はかなり多くなり、場所をとるのが難であるが、温度係数は約0.005[%/K]まで下がる。一方、GL積は約4%減る。

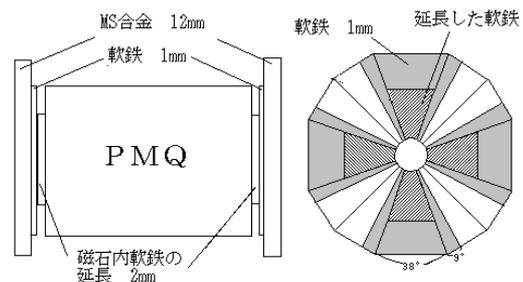


Fig.7 温度補償材を装備した四極磁石。四極磁石を挟んでいるのが温度補償材 (MS-1)である

