

## 超強力永久四極磁石の改良

三原 貴憲<sup>A)</sup>、岩下芳久<sup>A)</sup>、熊田 雅之<sup>B)</sup> 青木 雅昭<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設

<sup>B)</sup> 独立行政法人放射線医学総合研究所 加速器物理工学部

<sup>C)</sup> 住友特殊金属株式会社 マグネット応用開発部

### 概要

Halbach 型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リニアコライダーの最終集束に向けた永久四極磁石を試作し、性能評価を行った。ボア半径 14φ、全長 10cm の四極磁石で 28.5[T] という GL 積を達成している。永久磁石は温度係数が大きく、リニアコライダー用の四極磁石として使うためには温度補償が必要なため、温度補償材料である MS-1 を用いた永久四極磁石の温度補償の設計を行い、テストを行う。

また、永久四極磁石において強度を可変にするためのアイデアである、二重リング構造を紹介する。

### 1 はじめに

永久磁石の改良型 Halbach 磁気回路[1]により、4.45T という超伝導磁場並みの二極磁場を発生できることが実証された[2]。この技術を応用し、リニアコライダー用最終収束四極磁石を構成することを検討している。現在までに試作機を作り、SLAC において磁場測定を行い、性能評価を行った。この四極磁石は小型で非常に強い集束力をもつ。一方で、そのままでは強度可変でないことと、永久磁石が温度係数を持つことが問題となる。

主材料である NdFeB 永久磁石は永久磁石の中でも温度係数が大きい。これを補償するために、整磁合金を用いた温度補償部品を設計した。現在製作段階に入っており、完成次第四極磁石に装備し、測定を行う予定である。

また、リニアコライダーでは集束強度を可変にする必要があるため、軸方向に磁石を分割して、それぞれを回転するという手法を用いることにした。さらにそれを発展させて、磁石を二重のリングに分けて外側だけを回転する手法を考えており、二重リング構造と呼んでいる。これについて紹介する。

## 2 永久磁石による四極レンズ

### 2.1 構造

永久四極磁石は以下のような形状をしている。Halbach 型磁気回路はすべて永久磁石で構成されているが、改良型磁気回路では一部が軟鉄によって置き換えられているため、磁束を集める効果によって従来のものより強力な永久四極磁石を作ることが出来る。

図 1 左はビーム軸に平行な断面図である。斜線部分が軟鉄である。図 1 右はビーム軸に垂直な断面図で、二次元磁場計算コード PANDIRA による磁束の様子である。軟鉄部分に磁束が集まっていることがわかる。

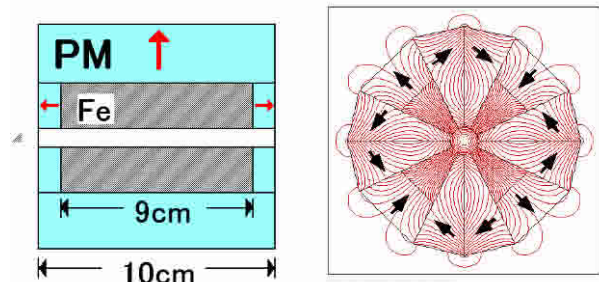


図 1 永久四極磁石の概略図。左がビーム軸に平行な断面図。右はビーム軸に垂直な断面の磁場分布図。

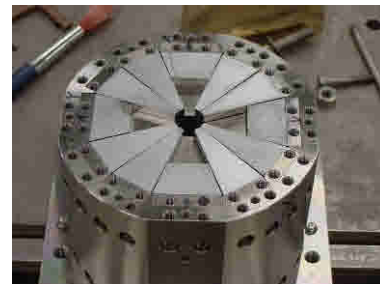


図 2 永久磁石四極レンズの写真[3]

### 2.2 試作した四極磁石の性能

図 2 は試作した四極磁石である。永久磁石は住友特殊金属製の NEOMAX 3 9 SH を使用しており、軸方向 10cm、半径 10cm でボア半径 7mm というサイズである。GL 積は測定値で 28.5[T] という大きな値であった。磁場計算コードによる計算値が 29.7[T] であり、差異は 5% という良好な値を示している。

図 3 は多極成分のグラフである [4]。対称性から 6 極、8 極、10 極成分は出ないはずなので、測定値で見られるこうした成分は製作誤差から来ているとみられる。

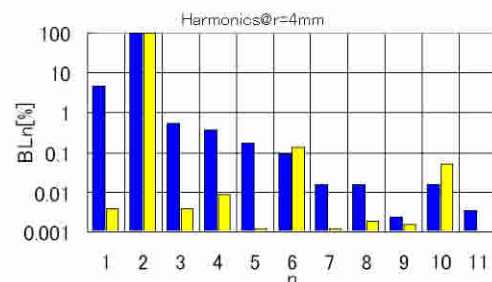


図 3 多極成分。左が測定値、右が計算値

### 3 温度補償

#### 3.1 整磁合金

電磁石の場合は電流によって磁場強度が決まるため、鉄の線膨張率  $10^{-5}$  程度の温度係数であり無視できるが、NdFeB 永久磁石はその 100 倍程度の温度係数を持つため、温度環境による発生磁場の変化が無視できない。この変化を温度補償材で補償することを検討した。(図 4 参照) 使用した整磁合金は住友特殊金属の MS-1 である。室温付近での温度係数が一定であるという特徴を持つ。NEOMAX の残留磁化  $B_r$  の温度係数が  $-0.11[\%/^{\circ}\text{C}]$  であるのに対し、MS-1 の飽和磁化  $(0.2[\text{T}])@20^{\circ}\text{C}$  の温度係数は室温付近(約  $20^{\circ}\text{C}$ )で  $-2.5[\%/^{\circ}\text{C}]$  と大きい。概算すると、磁石に対して MS-1 は約 1/5 の量を必要とする。

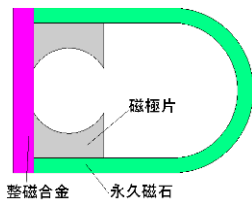


図 4 整磁合金による温度補償

整磁合金をつかって磁気回路をショートすると、磁極片間に発生する磁場は弱くなる。温度が上がると永久磁石の発生磁場は下がるが、整磁合金の残留磁化が大きく下がるため、打ち消しあって磁場は一定に保たれることになる。

#### 3.2 最適な設計

試作機の GL 積を保ちながら効率よく温度補償をするには、軸方向の両端に MS-1 のプレート装備して軟鉄から磁束を抜くのがよい事がわかった。しかし、軸方向に MS-1 を付けるとスペースを消費し、必要な四極磁石の長さが増大する。長さ辺りの集束力を高めるためにはなるべく軸方向へのスペースをとらない設計が求められる。TOSCA によって最適な設計を考えた結果、図 6 の様な形状がよいと考えた。図 6 は具体的な構造設計案である。

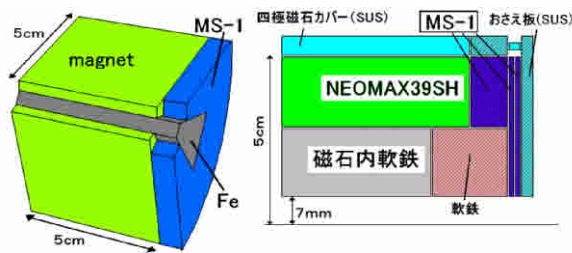


図 6 補償材付永久四極磁石の 8 分の 1 図。MS-1 の厚みは 10mm。

図 5 は MS-1 を装備した四極磁石の磁場勾配の分布である。中心付近は MS-1 から遠いため、磁場が下がるだけで温度補償の効果はあまり見えないが、外に行くにつれて MS-1 の影響が強くなり、GL 積で見ると効果が出てくる。MS-1 を装備時に外の方まで磁場勾配が強くなっているのは、鉄芯と MS-1 の接触面積を大きくするため伸ばしてあるからである。

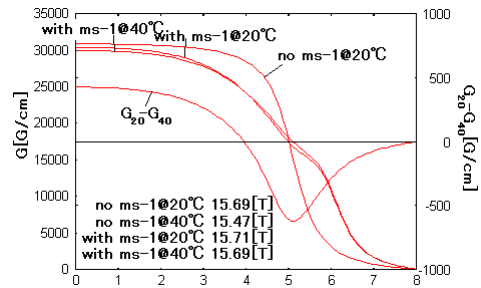


図 5 MS-1 を装備する前後の磁場勾配の分布と GL 積 (TOSCA による計算) 右軸は  $20^{\circ}\text{C}$  と  $40^{\circ}\text{C}$  での磁場勾配の差。GL 積では変動分が打ち消しあっている。

MS-1 はロット間で温度係数のばらつきが大きく(最大で約  $\pm 20\%$ )、計算だけでは厳密にサイズを決定できない。よって、実際には約 80% の大きさに作っておいて、調整するために薄い MS-1 を複数枚追加できるように設計し現在製作中である(図 6 参照)。

### 4 強度可変設計

#### 4.1 単純軸方向分割

強度不変である永久磁石で集束強度を変えるために、磁石をビーム軸方向に分割して  $90^{\circ}$  回転し、focus と defocus をスイッチすることで強度を可変にすることが可能になる。(図 7)。全長の 20 分の一を  $90^{\circ}$  回転すると強度は 10% 変わる。リニアコライダーで求められている 1% という分解能を達成するためには 0.5% 単位で分割すればよいことになる。

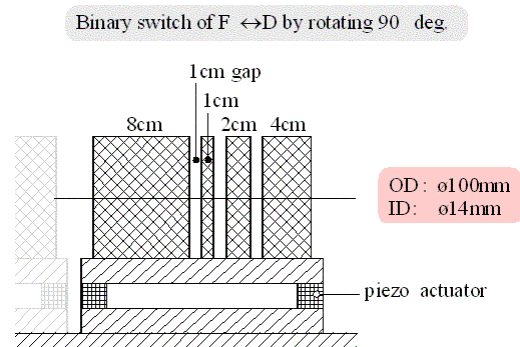


図 7 単純軸方向分割型 PMQ

#### 4.2 二重リング構造

回転機構の軸ずれによる磁場中心のずれや回転精度誤差による skew の発生は極力抑える必要がある。実際には軸から遠い外側の部分はこれらに対する影響が小さいので、内側と外側に分割した二重リング構造にして内側を固定することによって、変動を抑えることが出来る。このように外輪だけ回転することで、軸ずれや skew の抑制のみならず、分解能をあげることもなる。

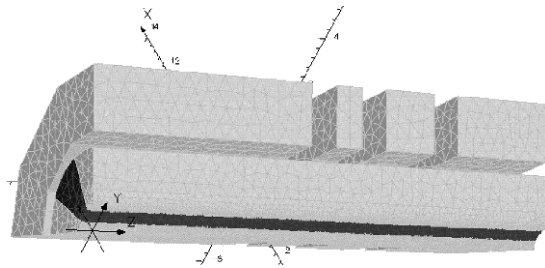


図7 二重リング構造。左から 8,1,2,4cm に分割されており、gap は 1cm。全長は 18cm になる。寸法は内輪外半径 2.5cm、外輪内半径 2.8cm、外輪外半径 5 cm である。

磁石の回転精度誤差が  $1^\circ$  だとすると、単純軸方向分割では skew が  $1^\circ$  になるが図 8 のような二重リング構造では磁場計算上約  $0.03^\circ$  となる。また、軸ずれに関しても、単純軸方向分割では 1mm ずれるが、図 8 の二重リング構造では 0.03mm となり、いずれも約 1/30 と影響は小さくなる。

#### 4.3 可変範囲とトルク

外径を一定に保ち、外輪の厚みを減らすと分解能はあがる。一方で、可変範囲も狭まるため、要求水準を満たしながら最適な値を決めて行くことになる。また、内輪と外輪の間にかかるトルクが大きい事も解決すべき問題である。

表 1 はトルクと可変範囲のまとめである。表中、寸法の、「3.5-3.8」は、内輪の外半径 3.5cm、外輪の内半径 3.8cm をあらわしている。

トルクの目安として回転角度  $45^\circ$  と  $46^\circ$  の時の stored energy の差分をとっている。

| 寸法[cm]  | トルク [J] | 回転後の強度 (%) | 磁場勾配 (T/mm) |
|---------|---------|------------|-------------|
| 3.5-3.8 | -74.5   | 44.1       | -0.292      |
| 3-3.3   | 73.3    | 30.1       | -0.289      |
| 2.5-2.8 | -63.0   | 8.8        | -0.290      |

表1 各寸法とトルクの目安、可変範囲、磁場勾配

直感的には外輪が薄いほうが磁場分布の変化が小さいためトルクが小さいはずだが、実際には外輪が小さくなるにつれてトルクが大きくなっている。これは、外輪内半径と内輪外半径を固定して (つまりギャップを一定に保ちながら) 外輪の厚みを小さくすると、 $45^\circ$  に回転した時の内輪と外輪の距離が、外輪の厚みが小さいほど近くなるためである。(図 9 参照)

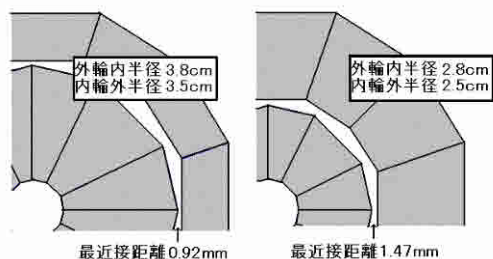


図8 寸法とギャップ間隔

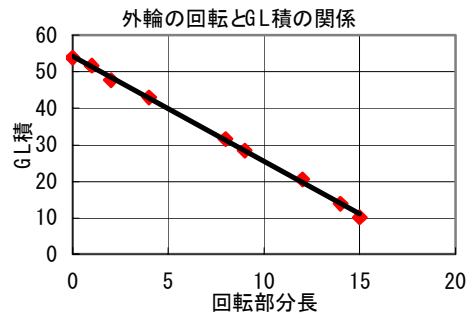


図10 回転部分の長さ と GL 積の関係

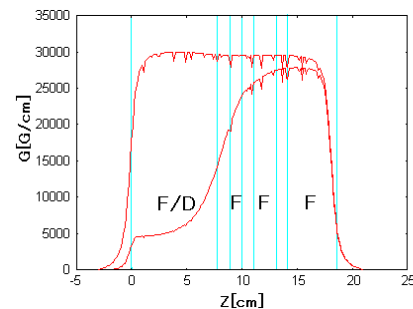


図11 図8のPMQの磁場勾配分布。8cmを回転して比較している。

#### 4.4 回転と磁場勾配

図 8 の構造で、外輪の各部分を  $90^\circ$  回転することによる GL 積の変化を図 10 に plot した。GL 積の変化は回転部分の合計長にほぼ比例している様子が見て取れる。図 11 は磁場勾配の分布である。

## 5 SUMMARY

永久磁石を用いて、 $\phi 14\text{mm}$  で約 300[T/m] という非常に強い 4 極レンズが作れることを実証した。リニアコライダーではアパーチャーが狭いため、永久磁石の利点を生かすことが出来、集束強度が強くてかつコンパクトな四極磁石を構成できる。永久磁石の温度係数の補償のための、試作一号機用温度補償部品については、設計もほぼ完了した。部品が完成しだい、実験して性能評価する予定である。

また、今年度内に作成予定の二重リング型永久四極磁石については、単純に分割するよりも回転や軸ずれにたいする精度が緩和出来、強度可変分解能も高い。

二重リング構造を取り入れた試作二号機のパラメータもほぼ決まっており、今後設計を進めて行く予定である。

## 参考文献

- [1] K.Halbach, IEEE, Trans., NS26(1979),3882, NIM169(1989)1 NIM 187(1981)109 NIM 198(1982)213
- [2] M.Kumada et al.,patent pending,CERN Courier, volume 41,number7,September 2001,p.9,M??
- [3] Y.Iwashita,T.Mihara,E.Antokin,M.Kumada,M.Aoki: "Permanent magnet quadrupole for final focus for linear collider", PAC03, MAY,12-16,2003, Oregon
- [4] 三原貴憲、岩下芳久、青木雅昭、熊田雅之、E.Antokhin "超強力永久磁石による四極磁石" 第28回リニアック技術研究会proceedings.