

## A SUPERSTRONG ADJUSTABLE PERMANENT MAGNET QUADRUPOLE FOR THE FINAL FOCUS LENS IN A LINEAR COLLIDER

T. Mihara<sup>1,A)</sup>, Y. Iwashita<sup>A)</sup>, M. Kumada<sup>B)</sup>, E. Sugiyama<sup>C)</sup>

A) Nuclear Science Research Facility, Institute for Chemical Research, Kyoto University  
Gokanoshō, Uji, Kyoto 611-0011

B) National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555 JAPAN

C) NEOMAX Co., Ltd. Egawa, Shimamoto-cho Misima-gun, Osaka, 618-0013

### Abstract

A super strong adjustable permanent magnet quadrupole was fabricated. Strength adjustability can be obtained by slicing the magnet into pieces along the beamline direction and rotating these slices. But this technique may lead to movement of the magnetic center and introduction of a skew quadrupole component when the strength is varied. A double ring structure, which is the scheme of the adjustability for the fabricated PMQ, can reduce the movement of the magnetic center and a skew quadrupole component to 1/10 and 1/60 respectively.

The properties of the permanent magnet materials change with time. The magnet can be stabilized by heating it to a temperature well above its operating temperature for a few hours. The magnets of PMQ were heated to temperatures above the room temperature respectively. Their field gradients were measured before and after the heating process. Their properties changed less than 1%.

### 強度可変な超強力永久磁石を用いたリニアコライダー用最終集束レンズ

#### 1. はじめに

改良型Halbach磁気回路を用いたdipoleが4.45Tという非常に強力な磁場を記録した[1, 2]。この技術を応用し、リニアコライダーの最終集束レンズへ向けた改良型Halbach磁気回路による四極磁石を構成した。NLC(Next Linear Collider, SLAC)のパラメータに準拠した場合、最終集束レンズは、反応点から3.5mの距離にある。また、反応点での電子陽電子ビームの交差角が20mradであることから、最終集束レンズ周辺では入射ビームラインの7cmそばを対向ビームラインが通ることになり、集束磁石と対向ビームの干渉を避ける工夫が必要となる。最も簡単な方法は、最終集束レンズを半径が7cmよりも小さい四極磁石で構成することである。この大きさで非常に強い磁場勾配を得ることは電磁石では難しいが、永久磁石であれば可能である[3]。試作一号機は製作から測定までを終え、半径7mm、磁石外径50mmの大きさで磁場勾配が0.3T/mmという強力な値を示した。

解決すべき問題点が二点ある。一つは永久磁石の

温度依存性である。永久磁石は一般に温度係数を持つ。なかでも今回使用しているNdFeB系永久磁石は温度係数が比較的高く、補償を行う必要がある。これには温度補償材を用いた方法が有効である。われわれは温度補償材をもちいて試作一号機の温度係数を $-7 \times 10^{-4} \%/^{\circ}\text{C}$ から $-3 \times 10^{-5} \%/^{\circ}\text{C}$ まで減少することが出来た。[4,5]。

もう一つは、強度が固定されているという点である。リニアコライダーの最終集束に用いるためには1%以上の分解能で強度可変である必要がある。これを解決するために、強度可変な二重リング構造を用いた永久四極磁石の試作二号機を製作した。

また、永久磁石は経年変化することが知られており、長期の使用を考えた場合この影響が懸念される。そこで、経年変化を緩和するために、使用環境より高温な環境に磁石をおいて経年変化を強制的に進ませておく、エージング処理を行った。また、この過程で減磁が起らなかったことを確かめるためにエージング前後に磁場測定を行った。

本稿では強度可変構造とエージング処理について論じる。

#### 2. 強度可変構造

永久四極磁石は電磁石のように励磁電流で集束強度をコントロールすることは出来ない。そこで、図2のように軸方向に磁石を分割して回転することが考えられる。四極磁石は $90^{\circ}$ 回転すると集束と発散が入れ替わるため、分割した磁石の一部を回転することで全体の集束強度を変化させることが出来る。最終集束レンズではskew成分を極力避ける必要があるため、四極磁石の回転角は $0^{\circ}$ と $90^{\circ}$ に限定する。

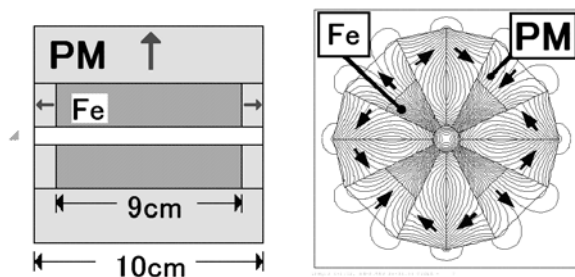


図 1 永久四極磁石(試作一号機)

<sup>1</sup> E-mail: mihara@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

こうすることで、理想的にはskew成分は0にすることが出来る[4]

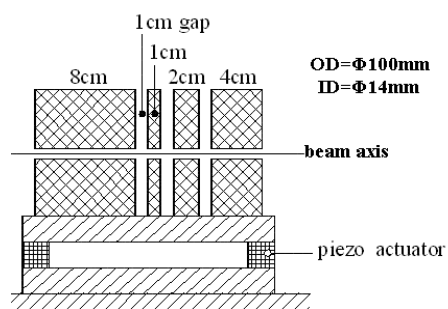


図 2 強度可変構造

### 3. 二重リング構造

図2のような磁石の回転時には機械的な軸ずれや、停止角度のズレが予想される。これらの影響を緩和するために、二重リング構造が有効である(図3)。

二重リング構造では磁石はまず動径方向に二つに分かれており、それぞれ外輪、内輪と呼んでいる。このうち外輪のみが軸方向に分割されており、内輪

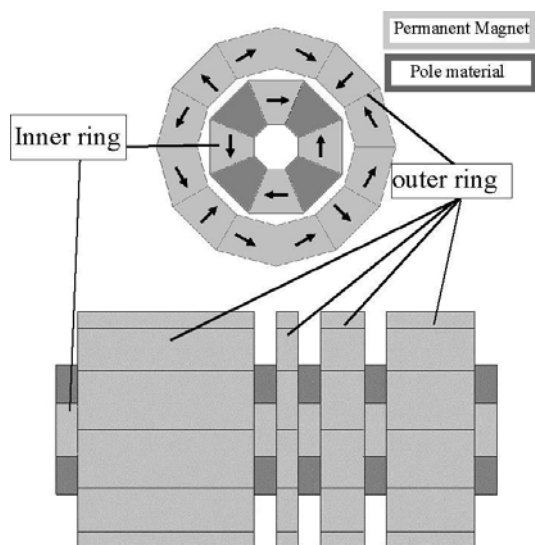


図 3 二重リング構造

は固定し、外輪のみを回転する。ボアから遠い部分のみを回転するため、軸ずれやskewへの影響が緩和される。今回設計、製作した試作二号機はこの二重リング構造を用いている。設計データをモデルにした計算機シミュレーションによると、図2のような構造に比べて回転誤差の軸ずれへの影響は1/10、skewへの影響は1/60と大きく緩和される。[4, 5]

### 4. 温度補償

試作一号機では温度補償材で磁気回路をショートすることで温度係数を $-7 \times 10^{-4} \%/^{\circ}\text{C}$ から $-3 \times 10^{-5} \%/^{\circ}\text{C}$ まで減少することが出来た。この手法は試作二号機にも適用されるが、二重リング構造では磁場分布が

回転前後で変わるため、温度補償材の効果が回転前後によって変わり、正しい配置をしなければ回転前後の温度係数が大幅に変わることになる。これは外輪と内輪それぞれ独立に温度補償を施すことで解決

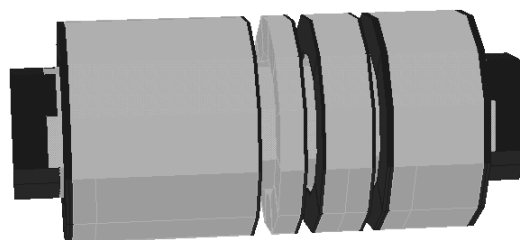


図 4 温度補償材(MS-1)付永久四極磁石

できる。

TOSCAによるシミュレーションの結果を元に、回転前後での温度係数をそれぞれ1/10以下に抑えられるように内輪と外輪の温度補償材の分量と配置を決定した(図 4)。今後性能試験を行う。

### 5. エージング処理

永久磁石は経年変化する性質を持つ。長期にわたって使用する際には無視できないパラメータである。永久磁石を通常使用する環境よりも高い温度に置いておくことで、この経年変化を早くおこさせておく(エージング)、使用時の経年変化量を少なくすることが出来る[6,7]。試作二号機に使用する外輪磁石、内輪磁石それぞれのエージング処理を行った。

#### 6.1 磁石の仕様

今回使用している永久磁石はNEOMAX社製のNdFeB系磁石で内輪と外輪で材質を変えてある。図5に見られるように内輪は、ボアに近いところでの逆磁場が強く、最大で20kOeを超える。この逆磁場による減磁を防ぐために内輪磁石は固有保持力(iHc)が高いNEOMAX38AH (iHc=28kOe, Br=1.22)を使っている。一方外輪は逆磁場が高々12kOeなので、残留磁束密度(Br)の高いNEOMAX44H (iHc=16kOe, Br=1.30)を使っている。

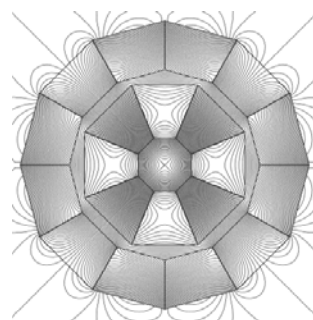


図 5 二重リング構造の磁束分布 内輪の、磁極に磁束が集中している。磁極をはさむ磁石の磁束がボアの近くで反転している。

### 6.2 エージング条件

磁気回路では永久磁石には逆磁場がかかっており、キュリー点より低い温度下でも減磁の危険性があるため、PANDIRAによるシミュレーションと永久磁石の固有保持力の温度特性(図6)から、減磁が起こらない様に留意してエージング温度を決定した。組立前の磁石において最も強い逆磁場は内輪で18kOe、外輪で12kOeであった。エージング温度を「固有保持力が逆磁場の最大値より30%以上高い温度」とし、内輪は60℃、外輪は40℃でエージングを行った。エージングにかけた時間は共に約4時間である。

### 6.3 エージング前後での変化

エージングを行うことによる発生磁場の変化は微小であるが、減磁が起これば大きく変化する。減磁していないことを確かめるために、エージング前後

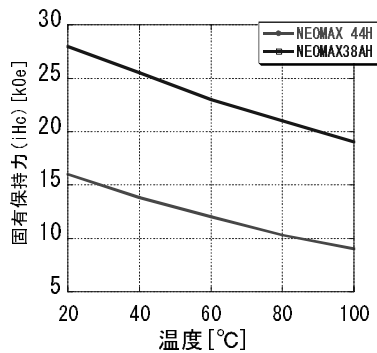


図 6 永久磁石の固有保持力の温度依存性

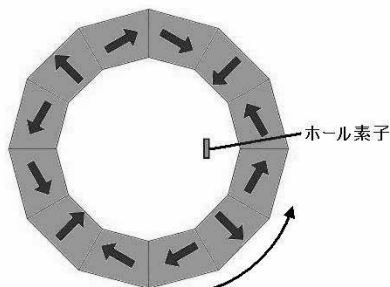


図 7 磁場測定の概略図(外輪)。ホール面は動径方向または回転方向に向けられる。

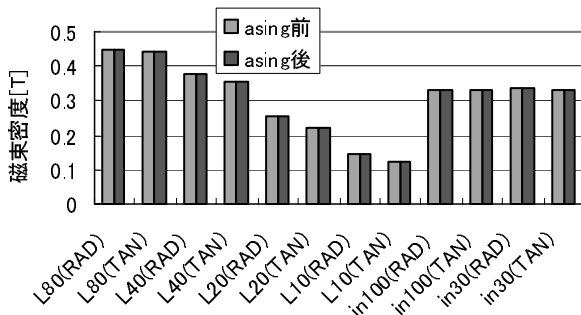


図 8 エージング前後の磁場測定結果。(RAD)は動径方向、(TAN)は回転方向の測定値。L80は外輪8cm部品を、in100は内輪(測定位置が端から100mm)をあらわしている。

の磁場測定を行い、比較した。磁石を回転台に載せ、図7の様にホール素子を配置し、磁石を回転してホール素子で測定した。磁場測定の絶対精度は約1%程度となる。図8に磁場測定結果を示す。測定精度より大きい磁場の变化は外輪、内輪共に無かった。これによって、減磁は起っていないことが確かめられた。

## 6. まとめ

超強力永久四極磁石の試作二号機を構成した(図9)。強度可変な二重リング構造をもち、温度補償材を装備している。

経年変化の影響を緩和するためにエージングを行った。これによる、1%以上の発生磁場の減少は見られなかった。

今後は試作二号機の磁場勾配の測定、それに伴って温度係数の測定を行う予定である。

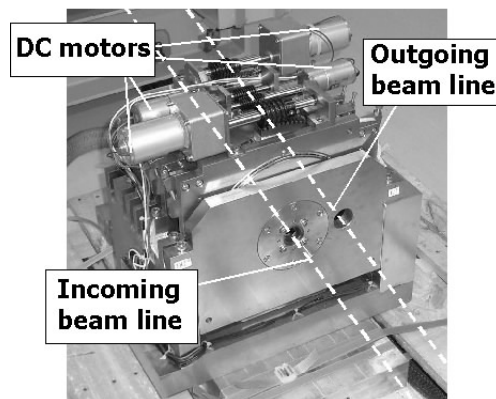


図 9 永久四極磁石試作二号機

## 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.
- [3] Y. Iwashita, T. Mihara, E. Antokhin, M. Kumada, M. Aoki, "Permanent Magnet Quadrupole for Final Focus for Linear Collider", PAC03, May 12-16, 03, Portland, OR,p2198-2200 : [http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p03/PAPERS/WPAB06\\_9.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p03/PAPERS/WPAB06_9.pdf)
- [4] T. Mihara, Y. Iwashita, M. Kumada, C.M. Spencer, E. Antokhin, "Super Strong Permanent Magnet Quadrupole for a Linear Collider" 18th International Conference on Magnet Technology, Japan, 2003
- [5] T. Mihara, Y. Iwashita, M. Kumada, E. Antokhin, E. Sugiyama, C.M. Spencer, "A Super Strong Permanent Magnet for the Final Focus Quadrupole in a Linear Collider", APAC04, May 22-26,2004, South Korea.
- [6] W. Lou, D. Hartill, D. Rice, D. Rubin, and J. Welch "Stability considerations of permanent magnet quadrupoles for CESR phase-III upgrade" PRST-AB VOLUME 1, 022401 (1998)
- [7] J. T. Volk et. al. "Stability Test of Permanent Magnets Built with Strontium Ferrite" pac01 p3260-3262