

ADJUSTMENT OF SUPER-STRONG PERMANENT MAGNET QUADRUPOLE

#T. Mihara^{A)}, Y. Iwashita^{A)}, Masayuki Kumada^{B)}, Cherrill M. Spencer^{C)}

^{A)} Kyoto University Institute for Chemical Research

Gokasho, uji, Kyoto 611-0011

^{B)} National Institution for Radiological Science

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

^{C)} Stanford Linear Accelerator Center

Menlo Park, California

Abstract

A superstrong permanent magnet quadrupole (PMQ) is one of the candidates for the final focus lens for the International Linear Collider (ILC). The magnetic center of the PMQ must not move more than a few microns during a 20% strength change to enable a Beam-Based Alignment (BBA) process to work. Our PMQ can be mechanically adjusted to suppress the center movement from more than 30 μ m to less than 10 μ m during strength changes.

超強力永久四極磁石の精度調整

1. はじめに

われわれが開発している強度可変永久四極磁石は現在リニアコライダーの最終集束レンズの候補のひとつである。ILC(International Linear Collider)計画はR&Dが急速に進んでおり、それに伴って最終集束部のパラメータも収束してきている。

BBA(Beam Based Alignment)[1]によって調整を行う場合、磁石の磁場中心が数マイクロメートル程度の範囲で安定でなければならず、強度を変化させた場合の磁場中心のずれを押さえ込む必要がある。われわれのPMQでは磁石は内輪と外輪に分かれた構造をしており(図1参照)、内輪磁石を固定して外輪磁石を機械的に回転して強度を変化させる。軸ずれの補正は外輪軸の調整で行う。

また、永久磁石の温度補償のために用いているMS-1合金(株NEOMAX製)の特性を最大限に発揮するために今後改造を予定している。

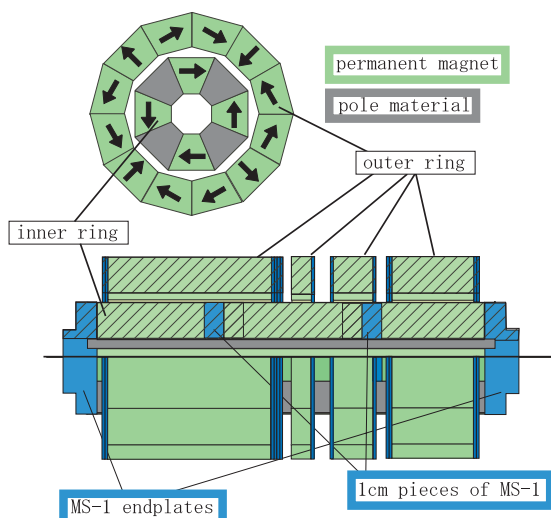


図1 強度可変PMQの概念図。

2. 強度可変永久四極磁石

われわれはILC用の超強力永久磁石(PMQ)を開発しており、最終集束レンズでの採用を目指している。図1は永久四極磁石の磁石構造である。磁石は内輪と外輪に分かれており、外輪はさらに軸方向にも1cm、2cm、4cm、8cmの四分割になっている。内輪は機械的に固定されていて、外輪は正確に90°回転することでそれぞれの外輪の位相を反転させ、全体の集束力を変化させることが出来る。4つの外輪の組み合わせによって本機では16段階の強度調整が可能となっている。内輪と位相が同じになっている外輪の長さの和をわれわれはSwitched on length(SWL)と呼んでおり、PMQのGL積はほぼSWLに比例している事が確認されている。

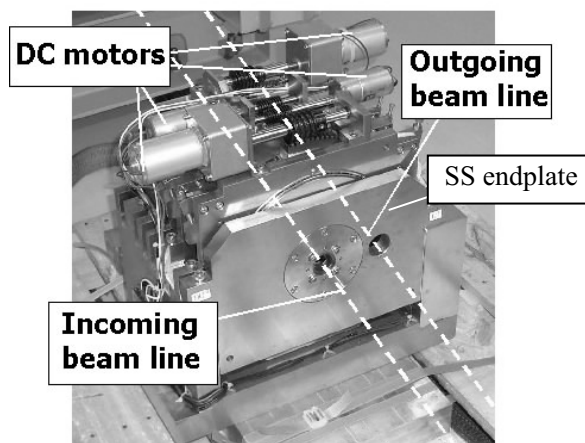


図2 試作したPMQ

内輪はステンレス製の土台に対して固定されており、外輪はボールベアリングを介してステンレス製のサポートプレートに固定されている。
基本的なパラメータを表1に示す。

表 1 PMQの基本パラメータ[2]

Bore radius	1cm
Inner ring diameter	ID 2cm OD 6cm
Outer ring diameter	ID 6.6cm OD 10cm
Outer ring section lengths	1cm, 2cm, 4cm, 8cm
Physical length	23cm
Pole material	Permendur
Magnet material(inner ring)	NEOMAX38AH
Magnet material(outer ring)	NEOMAX44H
Integrated gradient(strongest)	24.2T
Integrated gradient(weakest)	3.7T
Int. gradient step size	1.4T

3. 外輪回転停止角度

ILCの最終集束レンズではskewを数 μrad 以下に抑える必要がある。PMQには外輪停止角度の調整機構が付いておりこれにより外輪と内輪との位相差を減らし、skewを低減出来る。

図3は外輪停止角度の調整機構の概念図である。外輪はDCモーターを用いてウォームギアを介して回転され、スパーギアに付いているストッパーブロックがストッパーレバーに接触することで停止する仕

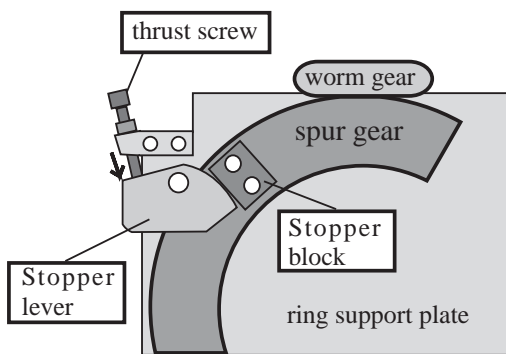


図3.外輪調整機構

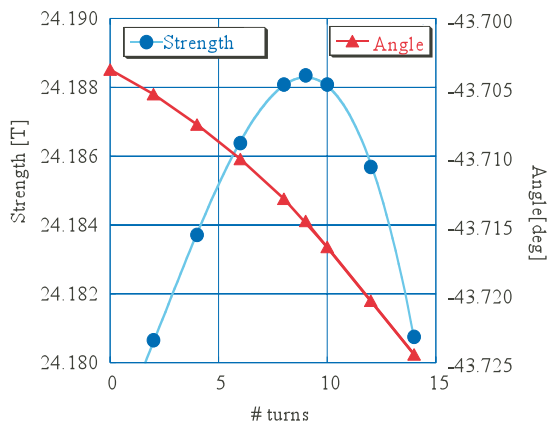


図4 停止角度と GL 積の関係

組みになっている。押しねじを回し、ストッパーレバーの位置をずらすことで停止角度が変わる。

押しねじによって停止角度を調整しながら、ローテーションコイルを用いてGL積を測定し、最適な停止角度を調べた。図4は四極磁場の極の相対角度とGL積の関係を見ている。この角度はほぼ単調に変化し、それぞれ2カ所の停止位置で調整出来るため、これで両者のskewの調整が独立に可能になることがわかる。最適な停止位置でGL積が極値をとると考えて調整すれば、図4の場合角度が -43.715° の時に内輪と外輪の位相が一致しているはずである。

4. 外輪回転軸の調整

最終集束レンズにおいてBBAが有効に働くためには磁場中心のずれを数 μm 以内に押さえ込む必要がある。一方PMQの強度変化と軸ずれの関係を見ると(図5)、特にY軸方向でずれが大きく、数十 μm 程度動いていることがわかる。

軸ずれの原因としては外輪の回転中心と磁場中心がずれていることと、外輪の回転軸と内輪の磁場中心がずれていることが考えられる。ここでは外輪の回転軸を調節してどの程度改善するかを試みた。

図6はシム調整の場所を示している。Base blockと、外輪のサポートプレートとの間に $25.4\mu\text{m}$ 厚のシムを挿入することで回転軸をずらしている。

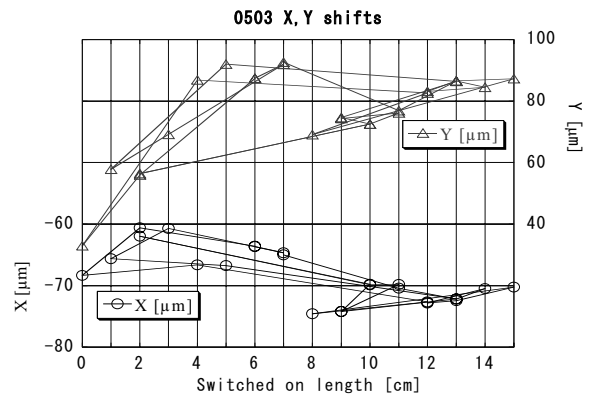


図5 強度と磁場中心の関係

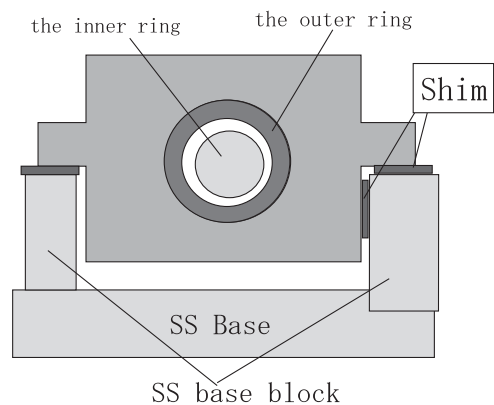


図6.外輪軸調整の概念図

外輪8cmのサポートプレートを51 μm 持ち上げることで、外輪8cm回転時の軸ずれを30 μm から10 μm に低減することが出来た。そこで外輪8cmを76 μm 持ち上げ、さらに外輪4cmを-X方向に51 μm 移動させたところ、外輪8cmの回転に対してY軸方向の軸ずれは5 μm 以下になり、外輪4cmの回転によるX軸方向の軸ずれは1 μm 以下に収まった(図7参照)。より細かい調整を行えばさらに改善出来ると思われる。

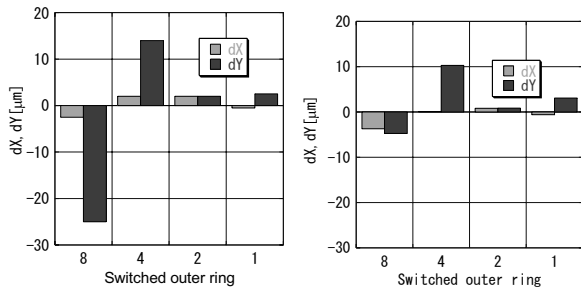


図7. シムの効果。左はシムを入れる前で右は入れた後。軸ずれの低減が見られる。

5. 今後の改良案

可変PMQには永久磁石を用いているため、温度係数を補償するために温度補償合金(MS-1)が用いられている[4]。最適な温度補償をする形で設計したが、MS-1素材の温度による変化はどれもカタログ値より小さかった(図8参照)。(カタログ値はシート状のMS-1についての保証値。) MS-1は casting から熱間圧延・冷間圧延を経てシート状に整形されるが、このうち冷間圧延工程で透磁率は上昇する。一方我々が制作したMS-1端版はブロック状のため冷間圧延工程を経たおらずカタログ値よりも常に透磁率が小さかったのもこのためだと思われる。図8によると最初に製作したMS-1端版より次に確保したMS-1端版部材の方が高い透磁率になっているが、これは前者が casting 削りだしのみであるのに対して後者が鍛造工程を経ているため透磁率が上昇したと考えられる。また、MS-1は生産ロットごとの性質のばらつきが大きいので先にロットの性質を測定してから温度補償部品の設計を行う必要がある。

また、カタログ値では50OeまでのBHカーブと100Oeでの磁束密度のみ記載されているが[3]、われわれのPMQではMS-1を主に非常に強い磁場のところ(1k~10kOe)で使っているため、高い磁場をかけてMS-1の飽和磁束密度を測定する必要があり、計画中である。

6. まとめと今後

回転停止角度は角度調整用の押しねじによってストッパーレバーで調整できる。強度最大時に外輪8cmの調整ねじの一回転は約20 μrad のskew調整に相当する。

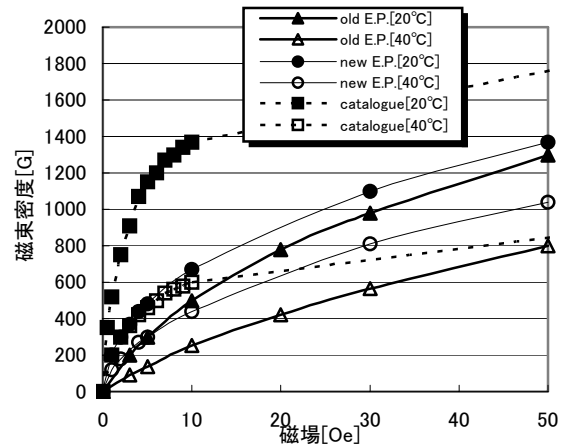


図8. MS-1のBHカーブ。カタログ値に比べて製作したEP(end plate;端版)の磁束密度、磁束の変化量とも小さい。

25.4mmのシムを用いて外輪の磁場中心を調整した。その結果、外輪8cmの回転によって生じた軸ずれは、外輪8cmを76 μm 持ち上げることによってY軸方向で数十 μm から約5 μm までに改善し、外輪4cmにおいても-X方向に51 μm 移動することで軸ずれの影響を押さえ込むことが出来た。シムでは外輪を持ち上げるか-X方向に調整することしかできない。今後はサポートプレートを削って調整範囲を広げる事、軸調整機構を付ける事等を検討している。より細かい調整によってさらに変動量を押しさえ込むことが出来ると考えている

温度補償材であるMS-1は高い磁場領域での磁気特性が未知であることと、現状ではカタログ値よりも透磁率が小さく出ることがわかっているため、今後は広い範囲での磁気特性の測定を行い、新たに温度補償部品を設計して内輪の改良を考えている。

また、我々のPMQはリニアコライダーに向けてボア径 ϕ 20mmで設計されたが、さらなる高磁場勾配をもつ永久四極磁石を実証するために、磁極の飽和をより高める ϕ 14mmでの内輪の新調も検討している。

参考文献

- [1] P. Tenenbaum, et al. "Beam Based Alignment of the Final Focus Test Beam" SLAC-PUB-7058, Dec 1995.
- [2] T. Mihara, Y. Iwashita, M. Kumada, C.M. Spencer "Superstrong Adjustable Permanent Magnet for a Linear Collider Final Focus" 12th Linear Accelerator Conference. Lubeck, Germany. August 16-20, 2004. SLAC-PUB-10878.
- [3] 住友特殊金属, "住友特殊金属の整磁合金"
- [4] T. Mihara, Y. Iwashita, M. Kumada, E. Antokhin, C. M. Spencer "SUPERSTRONG PERMANENT MAGNET QUADRUPOLE FOR A LINEAR COLLIDER." IEEE Trans. Appl. Supercond. 14:469-472, 2004