

永久磁石を用いた軌道補正磁石の評価 EVALUATION OF ORBIT CORRECTION MAGNET WITH PERMANENT MAGNETS

栗山靖敏^{*A)}、岩下芳久^{A)}、不破康裕^{B)}、照沼信浩^{C)}
Yasutoshi Kuriyama^{*A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{C)}
^{A)}Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KURNS)
^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
^{C)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

An orbit correction magnet using a permanent magnet is one of the candidates for orbit correction magnets in the ILC damping ring. We have fabricated a prototype permanent magnet orbit correction magnet and evaluated its performance. In this presentation, the performance of the permanent magnet orbit correction magnet will be discussed.

1. はじめに

ILC Reference Design Report Vol.3, 2007 [1] (RDR2007) によると、Damping Ring (DR) には、水平、鉛直合わせて 300 台の軌道補正用マグネットが使用される計画となっている。補正磁石について、他のマグネットと同じく電磁石タイプの補正磁石とすることが現在の設計案が念頭に置かれているが、永久磁石を用いた補正磁石の使用も検討が進められている。電磁石タイプの補正磁石と比較した場合に、永久磁石タイプの補正磁石のメリットとして、建設時における冷却水や電気配線等付帯設備に必要となるコストを大幅に下げることが可能になることが挙げられる。その一方で電磁石ではコイルに流す電流量を調整することで容易に可能である磁力の調整について、永久磁石では永久磁石の位置を物理的に調整するための機構が必要になることがデメリットとして挙げることができる。

永久磁石には放射線の影響による減磁が知られており、減磁の評価についての研究も併せて進められている [2]。これらの諸問題を解決することで、永久磁石は特定のプロジェクトに留まらず、加速器を構成する汎用の磁石としての利用拡大が見込まれる。本報告では、永久磁石を用いた軌道補正磁石試作機の詳細について報告を行う。

2. 永久磁石によるバイポーラ補正磁石

2.1 永久磁石によるバイポーラ補正磁石原理検証用試作機の設計と製作

永久磁石によるバイポーラ補正磁石原理検証用試作機として、上下 2 個ずつ、合計 4 個の 8 角柱のフェライト磁石を使用する永久磁石補正磁石試作機の設計 [3] および製作を実施し、基本性能を確認している [4]。バイポーラ実現のために、8 角柱のフェライト磁石には回転機構があり、回転させることで磁場強度、磁場の極性を反転可能となっている。原理検証用試作機の製作にあたり、CST Studio [5] (以後、CST とする) を用いて、多極成分の抑制に主眼を置いて、

使用するフェライト磁石形状の最適化を実施している。Figure 1, 2 に、CST を用いて最適化したフェライト形状を、Fig. 3 に、製作した永久磁石補正磁石試作機の実機写真を示す。

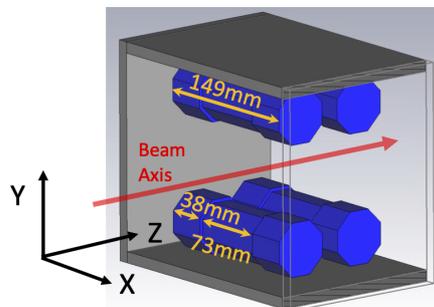


Figure 1: Schematic view of 4 rotor prototype correction magnet with PM.

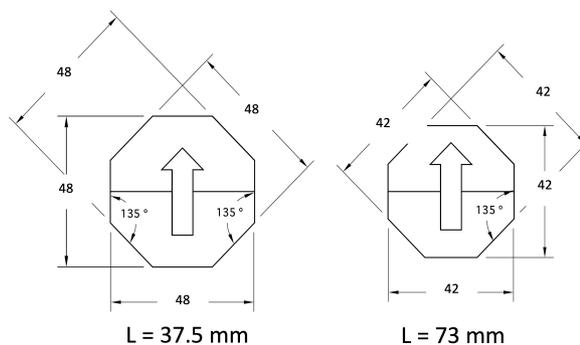


Figure 2: Optimized ferrite magnet shapes using CST studio to suppress multipole component.

Figure 3 に示すように、4 個の 8 角柱型永久磁石は運動しての回転が可能となっており、磁石上部に設置したパルスモーターを制御することで、遠隔からの回転操作が可能となっている。

* kuriyama.yasutoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

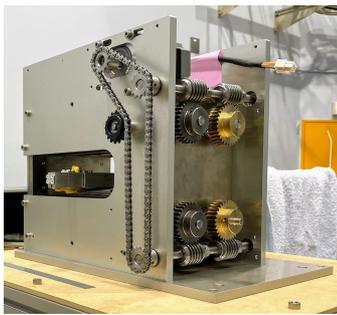


Figure 3: Pictures of prototype correction magnet.

2.2 永久磁石補正磁石試作機の磁場測定結果と計算結果との比較

補正磁石の磁場強度を調整するための機構である角柱ローターを 30 度ごとに回転させ磁場測定を実施している。得られたメッシュ状の測定データを元に、磁場計算より得られた結果と同様に、メッシュ状のある地点における磁場 B_y T とメッシュ間隔 L m を用いて、 $B_y \times L$ T.m を BL 積として定義する。Figure 4 に、8 角柱の回転角に対する磁場の積分値 (BL 積) についての測定結果と計算結果を示す。BL 積にて、測定結果が計算値よりも 15% ほど強く、補正磁石を構成する 8 角柱フェライト磁石の残留磁化について、製作上の不均一性が発生した可能性がある。測定および計算で得られた BL 積に対して、4 次

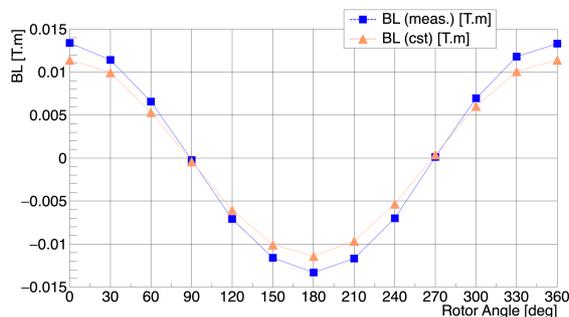


Figure 4: Integrated magnetic fields from measured data and calculated result.

の多項式でフィッティングを行うことで多極成分の導出を行なっている。Figure 5 には、計算結果から得られた多極成分を、Fig. 6 には、測定より得られた多極成分を示す。磁石の設置の対称性が完全であれば現れることのない偶数次の磁場成分が発生していることから、磁石素材のばらつきか、磁石の組立設置の対称性に問題があると思われる。

3. 8 角柱フェライト磁石単体磁場測定

試作機の磁場性能に CST 計算との違いが生じていることから、試作機を構成する 2 種類の 8 角柱フェライト磁石について、個別に磁場測定を実施した。試作機では、長さが 37.5mm のもの (以後、S タイプとする) を 8 個と長さが 73mm のもの (以後、L

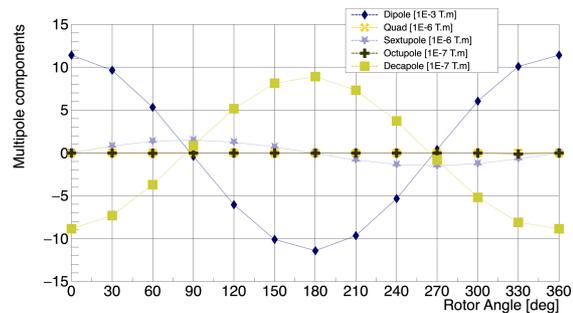


Figure 5: Integrated multipole components from calculated results as functions of rotation angle of the rotor.

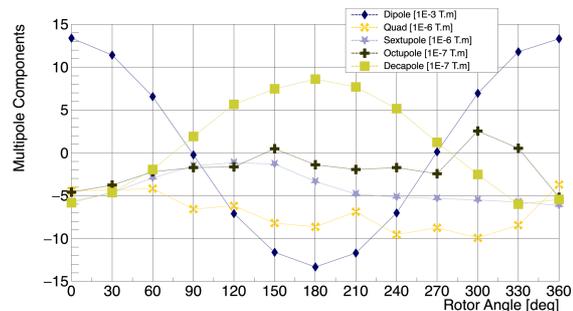


Figure 6: Integrated multipole components from measured data as functions of rotation angle of the rotor.

タイプとする) を 4 個使用している。Figure 7 に単体磁場測定の際の座標を示すが、Y 方向にホール素子を移動させ、8 角柱フェライト磁石の残留磁化の測定を実施した。Figure 8 に、測定結果と対応する

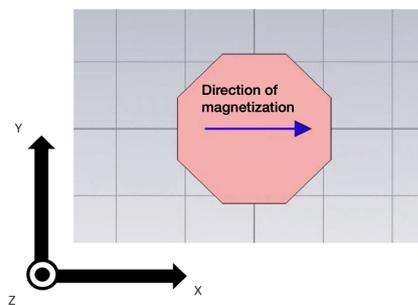


Figure 7: The magnetization direction of the ferrite magnet is the X-axis and the axis perpendicular to the magnetization direction is the Y-axis. The ferrite magnetic field measurement was performed by moving the hall-probe in the Y-axis direction.

CST 計算結果の一例を示すが、多項式によるフィッティングより磁場強度のピーク値を求め、CST による計算結果及び実測したフェライト磁石の残留磁化強度と定義する。Figure 9 に、L タイプ、S タイプの計 12 個の測定結果についてまとめたものを示す。測定結果は CST によって規格化されており、L タイプ残留磁化が CST と比較して +1 ~ +6%、S タイプ

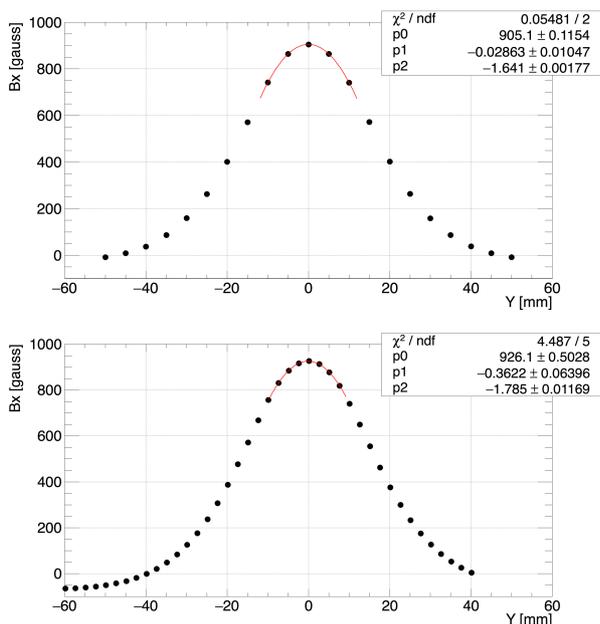


Figure 8: The magnetic field strength of the ferrite magnet (L=73mm) as a function of the y-axis at 37.5 mm from the center of the ferrite magnet. The upper plot shows the results obtained by CST calculations, and the lower plot shows the results obtained by measurements.

が $-21 \sim -13\%$ の範囲で異なっていたことが判明した。この違いが、Fig. 4 で示されている積分磁場の違いを生み出していることが推測される。また、Fig. 6, Fig. 5 で示されている多極成分の違いの原因となり得ることが示唆された。

4. 8角柱フェライト磁石の極性による残留磁化の違い

試作機に使用している8角柱フェライト磁石は、母材となる台形状のインゴットを2つ使用して製作されているが、製作工程は次のようになっている。

1. 母材 (インゴット) 150×100×25.4t を工場です厚み研磨 (両刀研磨) 加工
2. ラフカットした無着磁品の母材を接着で貼り合わせ
3. 各面取り加工し、最終形状に加工
4. 着磁

上記の製作工程の2. であるインゴット張り合わせの際に、台形の上底と下底で接着、上底または下底同士で接着、上底と下底の4パターンがあり、インゴット内の材質の不均一性があった場合には、張り合わせ方によって、製作された8角柱フェライト磁石の残留磁化の極性による違いにパターンが見られる可能性がある。フェライト磁石の残留磁化が張り合わせ方によって異なる可能性を確認するために、8角柱磁石のN極側とS極側の残留磁化の測定を実施した。Figure 10 に測定結果を示すが、製作上発生することが予想された残留磁化の極性による違いのパ

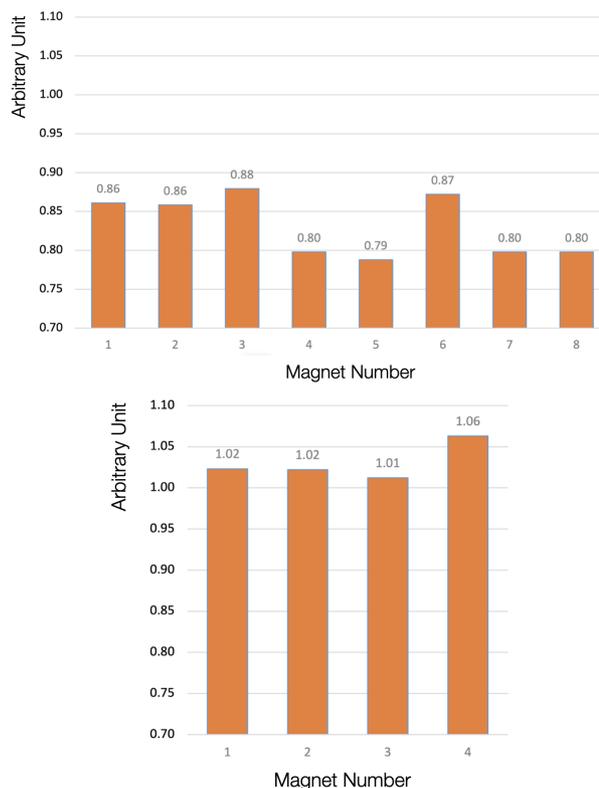


Figure 9: The upper plot shows the measured magnetic field strength of the long type (L=73mm) of magnet normalized using the CST calculation results. The bottom plot shows the normalized measured magnetic field strength of the short type (L=37.5mm) of magnet using the CST calculation results.

ターンは測定されなかった。一方、測定した2種類、計12個の全ての8角柱フェライト磁石について、N極側の残留磁化がS極側よりも強い結果となっている。

5. まとめ

永久磁石補正磁石試作機を製作し、磁場性能を評価したところ、積分磁場及びローター回転角に対する多極成分の強さにおいて、CSTによる計算結果と実測での違いが測定されたため、試作機を構成する8角柱フェライト磁石単体での磁場測定を実施した。試作機の1本のロータは2種類の8角柱フェライト磁石で構成されるが、CSTでの計算で使用した残留磁化で規格化すると、短いタイプで $-21 \sim -13\%$ 、長いタイプで $+1 \sim +6\%$ の測定結果が得られた。この残留磁化の計算入力値との違いが、試作機の磁場性能の計算結果との違いを生じている主要因の一つと考えられる。また、8角柱フェライト磁石の個体差を生じさせる要因として、母材となるインゴットの組み合わせ方から生じる残留磁化のバラツキが考えられるため、同一の8角柱フェライト磁石に対して、N極側、S極側それぞれの残留磁化の測定を実施した。磁場測定の結果からは、残留磁化の違いの

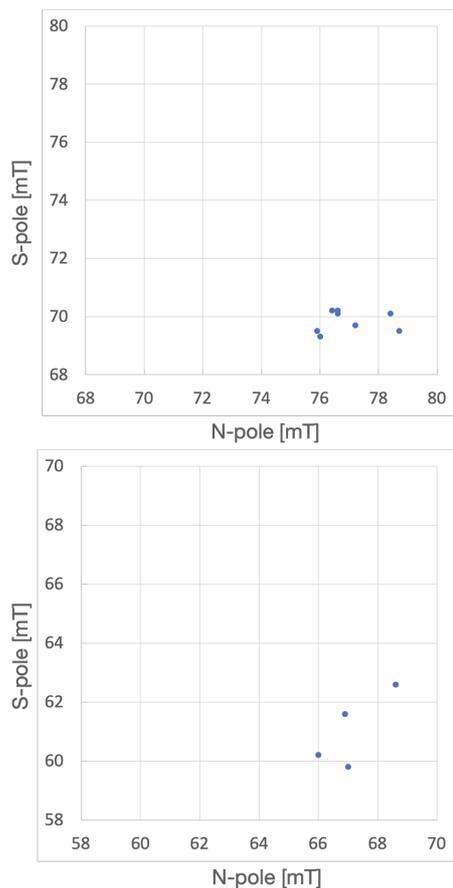


Figure 10: The upper plot shows the measured magnetic field strength of the long type (L=73mm) of magnet. The bottom plot shows the measured magnetic field strength of the short type (L=37.5mm) of magnet. These are the results of measurements on both sides of the same ferrite magnet.

有意な差は見られなかった。一方で、測定した12個の8角柱フェライト磁石全てにおいて、N極側の残留磁化がS極側よりも強い結果となったため、着磁のプロセスに、偏りを生じさせる要因があることが推測される。永久磁石を用いる際に問題となるのが上記の残留磁化の強さや向きの個体差であるが、これらは製造プロセスを厳密に管理することで緩和されることが可能であると考えられるため、製造メーカーと連携し、個体差を低減させる製造プロセスの構築を目指している。また、単体での性能評価を行った8角柱フェライト磁石を用いて補正磁石を組み上げ、磁場性能の確認を実施することで、CSTによる計算の再現性評価を行うことを予定している。

参考文献

- [1] International Linear Collider reference design report: ILC Global Design Effort and World Wide Study; <https://cds.cern.ch/record/1061261>
- [2] Y. Fuwa *et al.*, “Magnetization measurement scheme for radiation demagnetization evaluation of permanent magnets”, MOOBO07, PASJ2021.
- [3] Y. Iwashita *et al.*, “STEERING MAGNETS WITH PERMANENT MAGNETS”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 30, NO. 4, JUNE 2020.
- [4] Y. Kuriyama *et al.*, “Performance of Bipolar Correction Magnet with Permanent Magnets”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 32, Issue:6, September 2022.
- [5] CST Studio Suite. ; <https://www.3ds.com/>