

永久磁石を用いたバイポーラ補正磁石の磁場評価 EVALUATION OF MAGNETIC FIELD OF BIPOLAR 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

Bipolar correction magnets using permanent magnets are one of the candidates for correction magnets in the ILC damping ring. A prototype of a permanent magnet correction magnet was manufactured and magnetic field measurement was performed. In this presentation, we will discuss the magnetic field performance of permanent magnet correction magnets.

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。Figure 1 [2] に ILC 計画における各加速器の配置を示すが、DR はビームの低エミッタンス化を目的として使用され、Fig. 2 [3] に示すように、1 台の偏向電磁石、4 台の 4 極電磁石と 6 極電磁石、1 台のスクュー 4 極電磁石、それらに 2 台の補正磁石を組み合わせると 1 セルが構成される設計となっている。

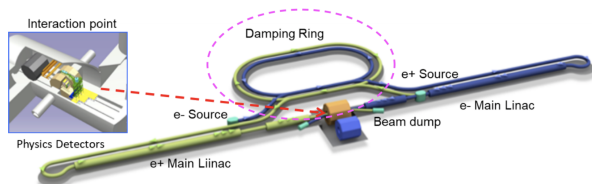


Figure 1: ILC schematic figure of ILC250 accelerator overview. (from Recommendations on ILC Project Implementation, Fig. E.1)

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。また、加速器運転時のランニングコストの低さや安定性の高さも大きなメリットとなり得る。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

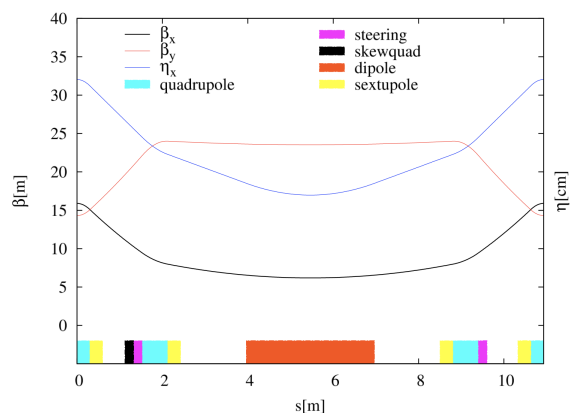


Figure 2: Lattice design of ILC damping ring.(from ILC Technical Design Report 2013, Volume 3.ii: Accelerator Baseline Design, Fig. 6.3)

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。また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は、今年会において別途報告 [4] しているが、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

RDR2007 より、DR における補正磁石には曲げ角 2 mrad が要請されている。先行研究 [5] では、本要求を満たすため、上下 4 個ずつ、合計 8 個の 8 角柱フェライト磁石を使用する設計を行い、磁場計算によりその性能を評価している。Figure 3 に、8 個の 8 角柱フェライト磁石を使用する PM-CM の模式図を示す。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。

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

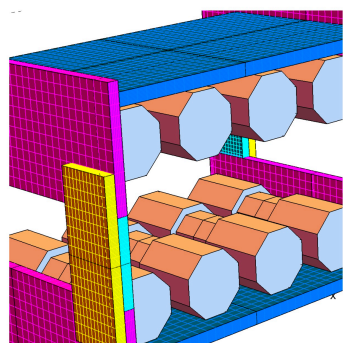


Figure 3: 8 rods model of correction magnet by permanent magnet.

先行研究に続き、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的设计 [6] および製作を実施した。Figure 4 に、製作した4個の8角柱のフェライト磁石を使用する試作機の模式図を示す。

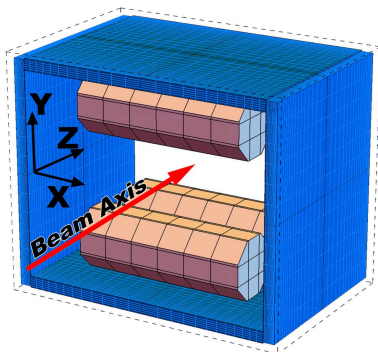


Figure 4: Prototype correction magnet consists of 4 rods permanent magnet.

Figure 5 では、赤線が磁力線を緑線が磁場の向きを示しており、上下対称に8角柱永久磁石を配置することで、ミッドプレーン上で2極磁場を実現することが可能となっている。8角柱を回転させることで、

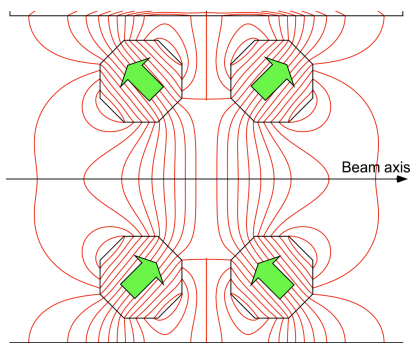


Figure 5: Prototype of correction magnet.

磁化の向きを変更することができ、ビームが感じる磁力の調整が可能である。仮に Fig 5 の状態から角柱

を180度回転させた場合には、磁場の極性が反転することになり、永久磁石を使用した場合でも両極性を実現することが可能である。

Figure 6 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 6 に示すように、4個の8角柱型永久磁石は連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。

2.1 磁場計算による永久磁石形状の最適化

試作機の製作にあたり、永久磁石形状の最適化を実施している。磁場計算には CST Studio [7] を使用し、Fig. 7 に示す8角柱フェライト磁石 (青色) に加えて、灰色で示す鉄ヨークを計算に含めている。

永久磁石の形状最適化では、8角柱に内接する円の半径及び、ダンベル状の細くなっている部分の長さを自由度とし、6極成分の抑制を目的として、8角柱形状の最適化を実施している [8]。磁場計算では、メディアンプレーン上の磁場について、水平方向、ビーム進行方向ともに5mm間隔のメッシュ状のデーターを出力している。

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 8 に磁場計算より得られた BL 積を、Fig. 9 に BL 積より求めた多極成分の強さについて示す。

3 永久磁石補正磁石試作機の磁場測定

試作機の磁場測定には1軸のホールプローブ (Group3 DTM-151 + MPT-14-15s) を3台使用し、スキャンのために、3軸ロボット (YAMAHA RCX240) を組み合わせて測定系を構築し、ミッドプレーン上の2次元平面の磁場について測定を行った。Figure 10 に磁場測定システムの写真を示す。

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。磁場測定の測定範囲は、水平方向を ± 40 mm、ビーム進行方向を ± 200 mm、測定間隔を水平方向、ビーム進行方向ともに5mmと設定した。本測定範囲は、RDR2007において許容誤差の基準点として示されている $x = 20$ mm を含めること、及び、十分に鉛直方向の磁場が減少していることを考慮して決定した。本測定範囲の設定では、測定点数は1,377回、測定時間は70分ほどである。

Figure 11, 12 に磁場測定の結果を示すが、ローターの角度を変更させることで、磁場強度の調整が可能であり、極性の反転が可能となっていることが示された。

3.1 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

得られたメッシュ状の測定データーを元に、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 13 に、8角柱の回転角に対しての磁場の積分値 (BL 積)

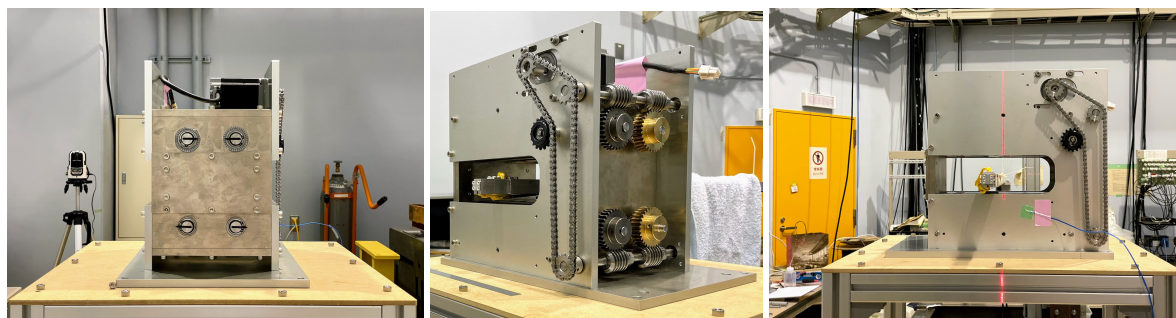


Figure 6: Pictures of prototype correction magnet.

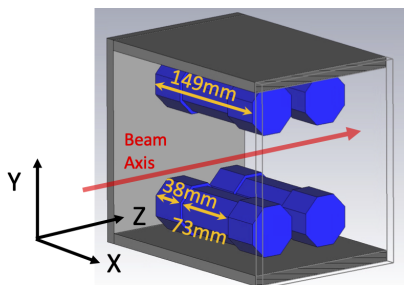


Figure 7: 3d model of magnetic field calculation.

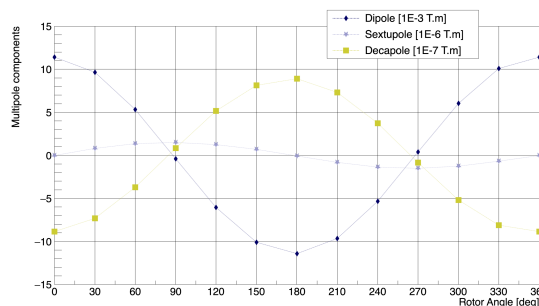


Figure 9: Calculation result of multipole components as functions of rotation angle of the rotor.

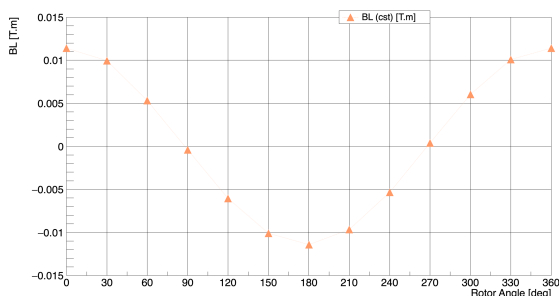


Figure 8: Calculation result of integrated magnetic field (BL) as a function of rotation angle of the rotor.



Figure 10: Setup of magnetic field measurement.

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 14 には、計算結果から得られた多極成分を、Fig. 15 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。

4. まとめ

永久磁石補正磁石試作機を製作し、磁場測定を実施した。試作機の磁場測定を行い、補正磁石として

求められる極性の反転の実現を確認した。

永久磁石補正磁石試作機の磁場測定の結果と CST Studio による計算結果の比較において、15 % ほど試作機の磁場が強い。磁場計算時にはフェライト磁石の残留磁化としてカタログ値を用いたが、実物のそれはカタログ値より大きかった可能性がある。現在、組立前の部品磁石の磁化測定をしてから組立をする準備を進めている。これにより、計算値と実測値の差を違いの原因がわかるはずである。

いっぽう、永久磁石補正磁石試作機の測定結果から積分磁場を算出し、積分磁場に含まれる多極成分の導出を行う磁場性能評価手法の確立を行った。多極成分の偶数次の磁場成分の大きさから 8 角柱フェライト磁石の設置誤差に起因する磁場エラーが含まれていることが推測される。

8 角柱フェライト磁石の残留磁化の評価精度および磁石の組み上げ精度を向上させた試作機 2 号機の

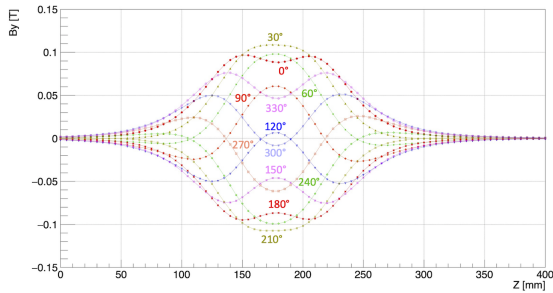


Figure 11: Measured magnetic field distribution along the beam direction. Each number on the curve indicates rotation angle of the rotor.

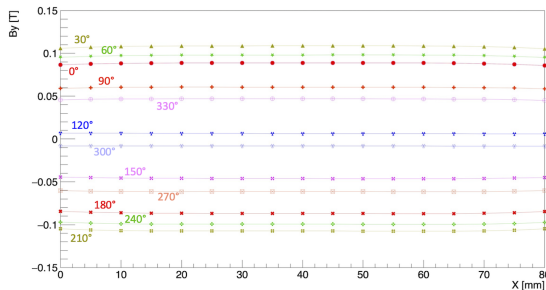


Figure 12: Measured magnetic field distribution along the horizontal direction. Each number on the curve indicates rotation angle of the rotor.

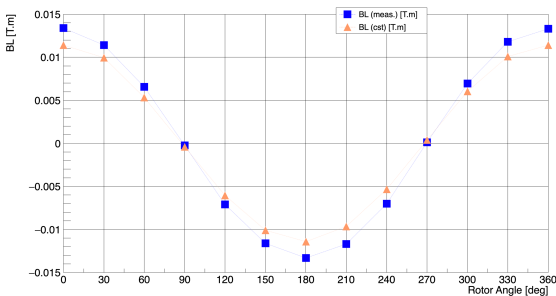


Figure 13: Integrated magnetic fields from measured data and calculated result.

製作が進められている。

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] Recommendations on ILC Project Implementation High Energy Accelerator Research Organization (KEK) October 1, 2019; <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/10/02/1000/>
- [3] The International Linear Collider Technical Design Report; <https://cds.cern.ch/record/1601969>
- [4] Y. Fuwa *et al.*, “Magnetization measurement scheme for ra-

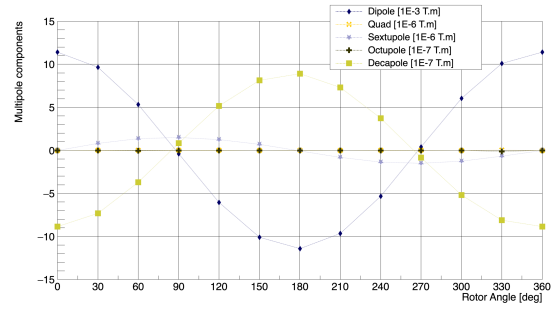


Figure 14: Integrated multipole components from calculated results as functions of rotation angle of the rotor.

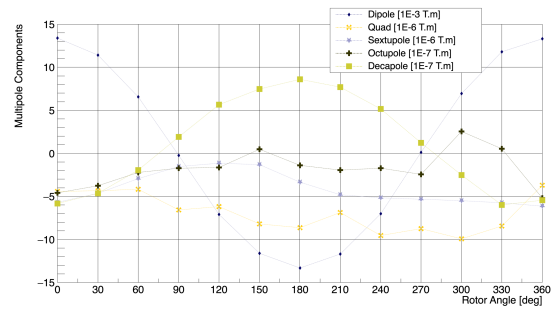


Figure 15: Integrated multipole components from measured data as functions of rotation angle of the rotor.

- diation demagnetization evaluation of permanent magnets”, MOOBO07, PASJ2021.
- [5] Y. Iwashita *et al.*, “Bipolar Correction Magnet With Permanent Magnets”, Proceedings of 29th Linear Accelerator Conf(LINAC2018), Beijing, China.
 - [6] Y. Iwashita *et al.*, “STEERING MAGNETS WITH PERMANENT MAGNETS”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 30, NO. 4, JUNE 2020.
 - [7] <https://www.3ds.com/>
 - [8] M. Abe *et al.*, “IMPROVEMENT OF CORRECTION MAGNETS WITH PERMANENT MAGNETS”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.