

中間磁極を用いた永久磁石補正磁石の最適化と試作機の製作検討 OPTIMIZATION OF PERMANENT MAGNET CORRECTOR MAGNETS USING INTERMEDIATE POLES AND STUDY ON PROTOTYPE DEVELOPMENT

栗山靖敏 ^{*,A)}, 不破康裕 ^{A)}, 岩下芳久 ^{B)}, 照沼信浩 ^{C)}

Yasutoshi Kuriyama ^{*,A)}, Yasuhiro Fuwa ^{A)}, Yoshihisa Iwashita ^{B)}, Nobuhiro Terunuma ^{C)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)} RCNP, Osaka University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We are developing a correction magnet for charged particle beams using permanent magnets. In the correction magnet under development, the polarity of the magnetic field can be switched between positive and negative directions by rotating the permanent magnet rods that generate the field. Performance evaluation of the prototype revealed that non-uniformity in the residual magnetization of the permanent magnets significantly affects the multipole components. As a method to suppress this effect, we are investigating a correction magnet configuration that includes intermediate poles with anisotropy. In this presentation, we report on the results of our study on the improved design aimed at suppressing the multipole components. We also report on the current status of our plan to fabricate a prototype correction magnet equipped with intermediate poles and test it by installing it in an actual beamline.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) では、建設費と運転費を削減するため、ダンピングリングにおいて、主ダイポールと補正ダイポールに永久磁石 (PM) を用いた加速器磁石を使用することが検討されている [1,2]。PM は電磁石に比べ、大容量の電源やその配線、冷却水を必要としないため、消費電力や取り扱いに優れている。そこで、PM を用いた軌道補正磁石試作機が製作され、磁場性能が評価されている [3]。

この PM 補正磁石試作機は、PM ロッドを回転させることで両極の磁場を発生させることができる。Figure 1 に製作した PM 補正磁石試作機を示す。フェライト磁石製の 4 本のロッドを回転させることで、着磁方向を変えることができる。このとき、ビームが受ける磁場強度はロッドの回転角度によって変化し、ロッド回転角度に依存した強さを持つ磁場の多極成分が誘導される。試作機の実際の磁場測定では、磁場の多極成分が計算値を超える強さで測定されている。これは、ロッドを構成するフェライト磁石製八角柱の残留磁場がロッド

ごとに異なるためと推測される。磁石部品の残留磁場均一性の公差をより厳しくすることで、磁場計算結果と実際のロッド磁場性能の乖離を小さくすることは可能であると考えられるが、製造コストに大きな影響を与えることが予想される。そこで、製作した八角柱の残留磁場強度の不均一性を緩和するために、PM ロッドとビームダクトの間に異方性中間磁極を設置することを検討している [4]。

2. 異方性中間磁極を用いた設計

Figure 2 に異方性中間磁極を補正磁石に設置した際の概念図を示す。異方性中間磁極は、異なる透磁率を持つ材料を積層した構造で構成されている。ビーム方向には低透磁率、鉛直方向には高透磁率となるようにすることで、ダイポール成分への影響を抑え、かつ多極成分を抑制することを目的としている。

3次元磁場計算により、中間磁極の有無によって磁場の多極成分が制御可能であることを確認している [4]。

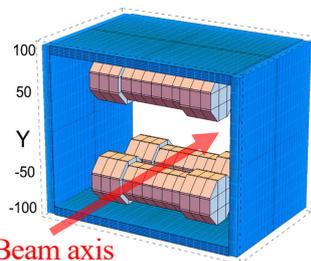


Figure 1: A prototype correction magnet using a permanent magnet.

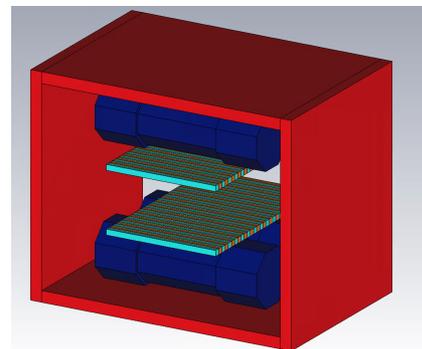


Figure 2: Conceptual Illustration of a prototype correction magnet using a permanent magnet with anisotropic intermediate poles.

* yasutoshi.kuriyama@j-parc.jp

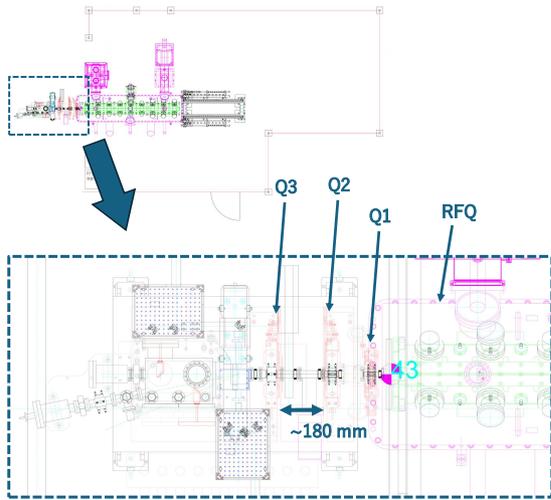


Figure 3: J-PARC RFQ test stand.

3. J-PARC RFQ テストスタンドでの実証試験

3.1 RFQ テストスタンド

異方性中間磁極を用いた PM 補正磁石試作機について、J-PARC RFQ テストスタンド (RFQ-TS) [5] にインストールし、実際のビームを使用した実証試験を計画している。Figure 3 に RFQ-TS の概略図を示す。

RFQ-TS では、3 MeV の H^- ビームが使用可能となっている。PM 補正磁石試作機は、取り出しビームラインに設置されている 2 台目と 3 台目の 4 極電磁石の間にインストールするために、ビーム進行方向の長さを 150 mm として、概念設計を進めている。

3.2 RFQ-TS に向けた設計

Figure 4 に設計を進めている RFQ-TS 向けの PM 補正磁石試作機概念図を示す。この PM 補正磁石試作機では、フェライト磁石と比較して、より均一な残留磁場が期待できるサマリウムコバルト磁石を用いてロッドを製作することを計画している。サマリウムコバルト磁石製ロッドの寸法について、Fig. 5 に示す。

1 台の補正磁石では、上下 2 本、計 4 本のロッドを使

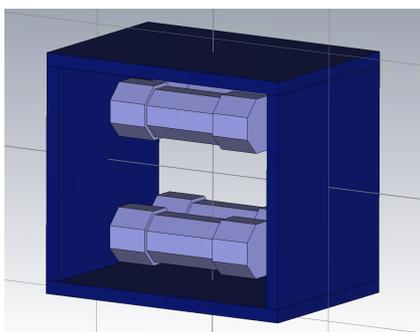


Figure 4: Conceptual illustration of a prototype correction magnet employing Samarium-Cobalt magnets.

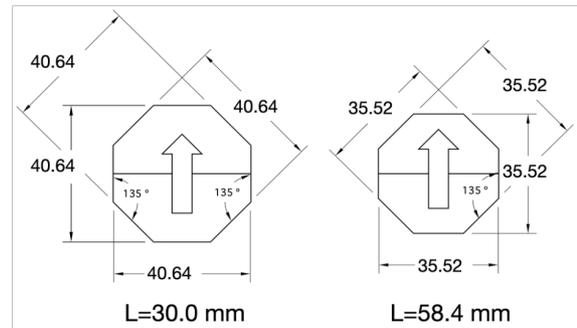


Figure 5: Dimensions of the samarium-cobalt magnets used for rod fabrication.

用する。1 本のロッドは、Fig. 5 左に示す短尺のもの 2 本と、右に示す長尺のもの 1 本で構成されている。

試作機では、異方性中間磁極を取り外し可能な構造とし、異方性中間磁極による多極成分抑制の効果についても測定を行うことを計画している。

3.3 サマリウムコバルト磁石を使用した補正磁石試作機の磁場強度計算

磁場計算は、Fig. 4 に示すサマリウムコバルト磁石製ロッドを用いた補正磁石試作機に対し、中間磁極を設置しない条件で、CST Studio [6] を用いて実施した。Figure 6 では、ロッド回転角を変化させながら計算した水平方向に対しての磁石中心における鉛直方向の磁場成分 (B_y) を、Fig. 7 には、同じくロッド回転角を変化させながら計算した B_y をビーム進行方向に対してのプロットしたものを示す。また、Fig. 8 には、 B_y をビーム進行方向に積分した BL 積を示している。

フェライト磁石を用いた試作機と比較して、使用しているロッドの大きさは約 80 % に縮小したサイズとなっているが、サマリウムコバルト磁石に変更したことで、 B_y のピーク強度での比較で、約 3 倍の磁場強度となっている。水平方向の一様性では、 B_y での評価で、±10 cm の範囲において、1 % の範囲に収まっていることを確認している。

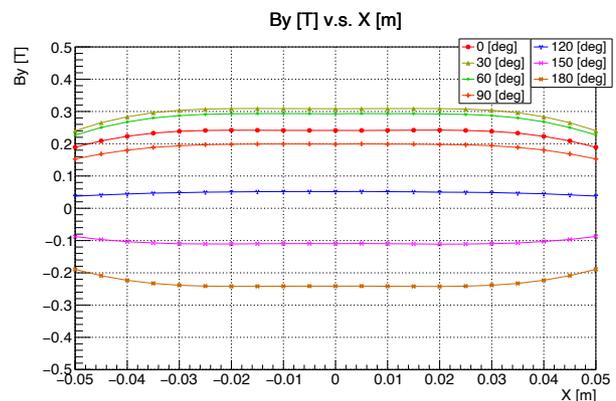


Figure 6: Vertical magnetic field component (relative to horizontal). Points correspond to rod rotation angles.

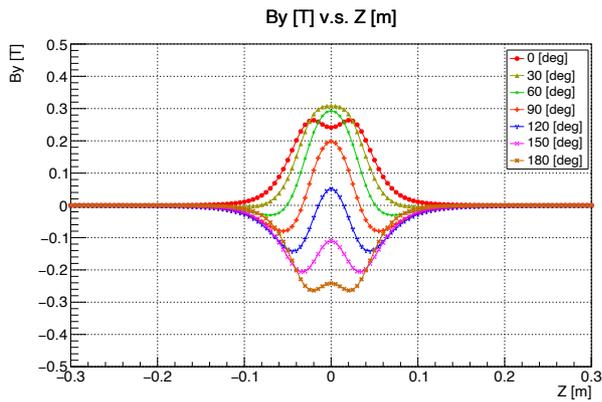


Figure 7: Vertical magnetic field component (relative to the beam direction). Points correspond to rotation angles.

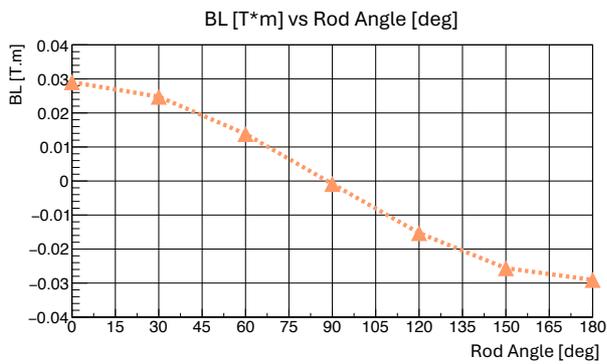


Figure 8: BL product as a function of the rod's rotation angle.

4. まとめと今後の展開

フェライト製ローターを用いた補正磁石試作機を製作し、磁場性能を評価した結果、残留磁場不均一性に

よる多極成分の抑制が課題であることを確認している。そのため、課題解決に向け、異方性中間磁極を用いた設計の検討を開始した。また、フェライト磁石よりも均一な残留磁場が期待できるサマリウムコバルト磁石を用いた設計検討を開始しており、新試作機はサマリウムコバルト製ロッドを採用し、異方性中間磁極の着脱が可能な構造とする予定である。

2025年度に新試作機の製作を行い、その性能評価を実施する予定である。2026年度には、新試作機のJ-PARC RFQ-TS ビームラインへのインストールを行い、ビームを用いた実証試験を実施する計画である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（科研費）[課題番号 25K15757] の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] “International Linear Collider reference design report (RDR): ILC Global Design Effort and World Wide Study”. doi:10.5170/CERN-2007-006
- [2] “The International Linear Collider Technical Design Report (TDR) - Volume 3.I: Accelerator R&D in the Technical Design Phase”. doi:10.48550/arXiv.1306.6353
- [3] Y. Kuriyama *et al.*, “Performance of Bipolar Correction Magnet with Permanent”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 6, pp. 1-4, Sept. 2022, Art no. 4007204. doi:10.1109/TASC.2022.3180300
- [4] Y. Kuriyama *et al.*, “Design Improvement of Bipolar Correction Magnet with Permanent Magnets”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2024, Art no. 4004005. doi:10.1109/TASC.2024.3365099
- [5] Y. Kondo *et al.*, “Development of a radio frequency quadrupole linac implemented with the equipartitioning beam dynamics scheme”, Phys. Rev. Accel. Beams, vol. 22, issue 12, Dec., 2019. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.22.120101
- [6] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>