

磁場強度調整可能な永久磁石型偏向磁石の開発 (2)

DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD ADJUSTABLE PERMANENT MAGNET DIPOLE (2)

目黒和幸^{#, A)}, 菊地晋也^{B)}, 今健一^{C)}, 松本教之^{D)}

Kazuyuki Meguro^{#, A)}, Shinya Kikuchi^{B)}, Kenichi Kon^{C)}, Noriyuki Matsumoto^{D)}

^{A)} Iwate Industrial Research Institute

^{B)} SUN AI Inc.

^{C)} Iwate Industry Promotion Center

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have been developing the permanent magnet dipole for bending magnet of particle accelerator by our manufacturing technology of permanent magnetic chucks. The magnetic field strength is adjusted by rotatable permanent magnets. We made the prototype of the magnetic circuit and showed that the magnetic field strength can be adjusted from +1,300 G to -10 G.

1. はじめに

大型加速器施設ではビームの偏向や収束などのために数多くの電磁石が用いられている。これらの電磁石は磁場発生時に大電流を流す必要があり、それに加えて発熱を抑えるための冷却設備や空調も必要となることから、トータルとして多大なランニングコストがかかる。これを受けて、近年では加速器の建設と運転の両面に係るコスト削減のために電磁石を永久磁石に置き換える研究開発が盛んに行われている。永久磁石を用いることで、上述の消費電力の削減になるだけでなく、冷却水の配管や電源ケーブルの敷設が不要になるために建設コストを低減でき、電気系トラブルや水漏れ事故のリスク低減と保守費用の削減といったメリットがある。欧州の大型放射光施設 ESRF-EBS のメインリングでは永久磁石を用いた偏向磁石が採用され[1]、既に量産段階に入っている。SPring-8-II でも偏向電磁石の永久磁石化[2,3]に関する研究開発が進められ、蓄積リングへのビーム輸送ラインに設置して運用を開始、性能実証中である。国際リニアコライダー(ILC)計画においても、技術設計書(TDR)検討当初には永久磁石化は盛り込まれていなかったが、建設・運用コスト低減のために永久磁石化が再検討され

ている[4]。我々は、これまで機械加工分野等で用いる永久磁石型マグネットチャックの研究開発を行ってきた経験を活かし、複数の永久磁石の配置を機械的に動かすことで磁束を調整可能な永久磁石型偏向磁石の基本設計に取り組んできた[5]。本稿では、永久磁石を用いた C 型偏向磁石の設計および試作した結果について報告する。

2. 磁気回路の設計

固定された起磁力を持つ永久磁石によって磁場強度を調整するには、いくつかの方式が考えられている。SPring-8-II[2,3]で採用されている方式は、永久磁石を短絡するように鉄片を接近して磁束を漏れさせる構造をとり、鉄片の距離によってギャップに伝わる磁束量をコントロールするものである。電気回路に置き換えれば負荷に並列に置かれた可変抵抗を調整して負荷へ流れる電流を増減させるものである。我々は、Fig. 1 (a)に示すような C 型の磁性体ヨークに円筒形状の永久磁石を直列に二個配置し、それぞれが面内で自由に回転できる構造を基に設計を行っている。Y 軸を基準として永久磁石の磁化方向の回転角を θ と定義する。(b)のように 2 個の永久磁石の磁化方向を $\theta = 0^\circ$ に直列に揃えると、ギャップ

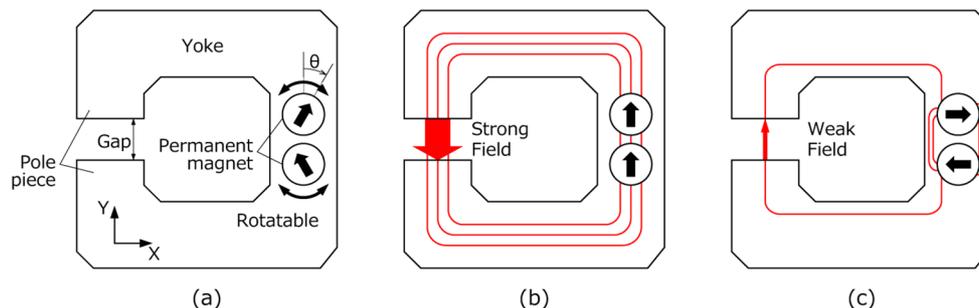


Figure 1: Structure of the magnetic circuit with rotatable permanent magnets.

[#] kmeguro@pref.iwate.jp

へ多くの磁束を伝えることができ強い磁場が誘起される(ON 状態)。一方、(c)のように上側磁石を $\theta=90^\circ$ 、下側磁石を $\theta=-90^\circ$ と反平行に配置すると、大半の磁束は短いパスを通して近接する磁石間でループを形成し、わずかに漏れた磁束のみがギャップを通り磁極には弱い磁場のみを生じる(OFF 状態)。上側磁石を $+\theta$ 方向、下側磁石を $-\theta$ 方向に同期して回転させると、X 方向の磁化は上下の磁石で向きが反対になるため相殺され、Y 方向の磁化のみが磁極間の磁場形成に寄与することになる。

永久磁石回転式磁気回路の磁場調整性能を調べるため、Fig. 2 に示す断面モデルにより二次元磁場解析コード PANDIRA[6]を用いて磁場シミュレーションを行った。永久磁石にはネオジウム磁石(N45、 $\phi 10$ mm)、継鉄(ヨーク)には一般構造用圧延鋼材 SS400 を用いた設計である。永久磁石が磁性体の中に完全に埋没してしまうと ON 状態であっても磁気回路の短絡が生じてしまうことから、永久磁石の両側に空隙(non-mag gap = 5 mm)を設けた。non-mag gap は空気のように示されているが、構造的強度から比透磁率 $\mu \div 1$ の材料(真鍮など)を入れることを想定している。

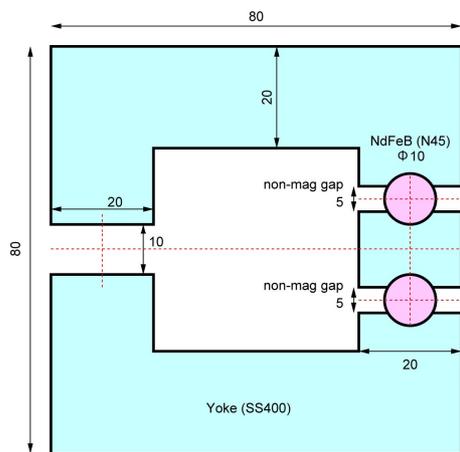


Figure 2: Cross sectional layout of the magnetic circuit for simulation.

永久磁石を同期回転させたときの磁束線分布の様子をシミュレーションした結果の一部を Fig. 3 に示す。 $\theta=0^\circ$ および $\theta=180^\circ$ のときに ON 状態になりギャップ中に強い磁場が形成され、 $\theta=90^\circ$ のときには OFF 状態となってギャップ中に磁束が伝達しないことがわかる。このように、複数の永久磁石を同期回転させることでギャップ中の磁場強度を調整可能であることが示された。回転角に対するギャップ中の磁場強度の依存性について Fig. 4 に示す。グラフ中の横軸は同期回転角 θ 、縦軸はギャップ中の磁束密度を示す。赤丸がシミュレーションによって得られた結果であるが、ほぼ完全に $\cos \theta$ カーブと一致する依存性を示すことがわかった。この結果は、永久磁石の起磁力を大きく変化させてもヨークは Y 方向の磁化のみを効率よくギャップ中に導いており、電磁石における電流制御と同じ感覚で容易に磁場調整を行うことが可能であることを示唆している。磁場調整範囲は+1,945 ~ -1,945 G と広く、バイポーラ磁石として使用可能である。さらに、 $\theta=90^\circ, 270^\circ$ では ± 3 G 程度の低磁場を実現できる。

実際には残留磁化の影響でそこまで下がらないと考えられるが、搬入時やメンテナンスの際には極限まで磁場を下げられることから安全面でも有用であろうことが期待される。

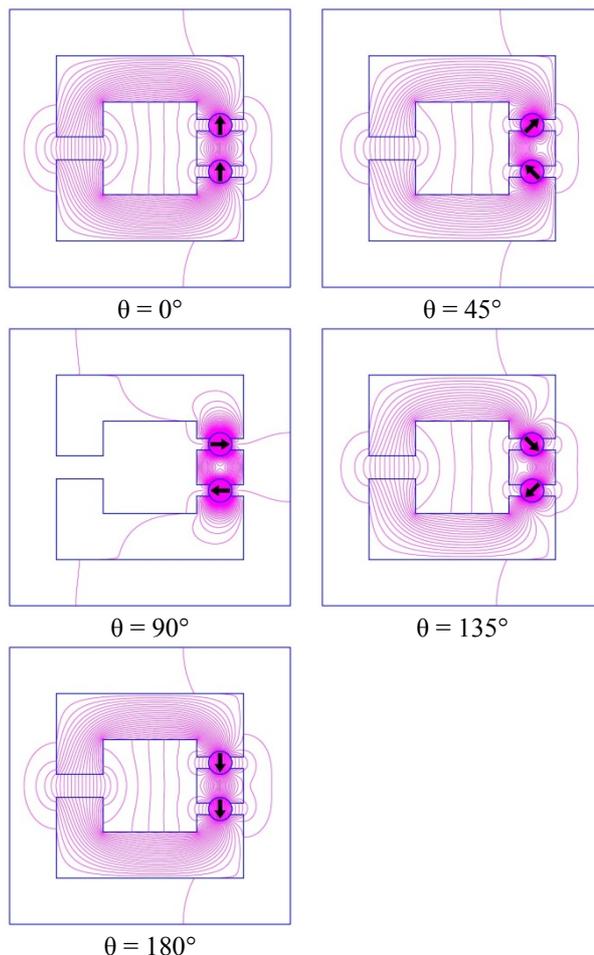


Figure 3: Simulated rotation angle dependency of magnetic flux lines.

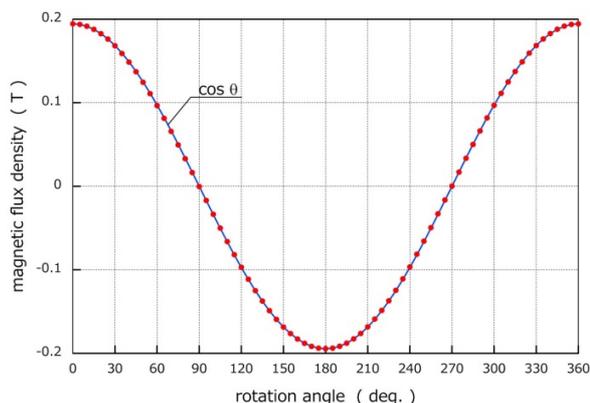


Figure 4: Calculated magnetic field strength at the center of pole-piece as a function of rotation angle.

3. 磁気回路の試作

前項では円筒形の永久磁石を自由に回転可能なモデルを設計したが、永久磁石を回転させる機構の実装に課題が残っている。具体的には回転トルクの見積もりが十分でないことや、円筒形への回転軸の導入方法などである。そこで、角型形状の永久磁石を用いた試作品の評価を先行して行った。試作品の断面形状と ON 状態・OFF 状態における磁束線図を Fig. 5、作製した試作品の写真を Fig. 6 に示す。SS400 鋼材を切削加工し、 $10\text{ mm} \times L 50\text{ mm}$ のネオジム磁石を一つにつき 4 個直列に用いることで全長 200 mm の試作品を作製した。このモデルでは永久磁石を回転させることはできないため、ON 状態と OFF 状態を切り替えるには磁石を一度取り外してから向きを変えて挿入し直す必要がある。ON 状態では磁極間にかかる磁場により大きな吸引力が生じるため、磁石側のヨーク側面と中空部にアルミ板を

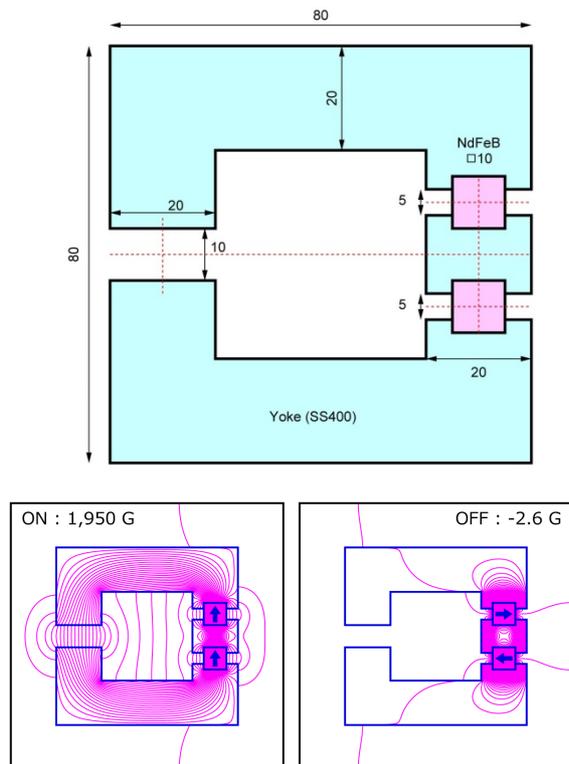


Figure 5: Cross sectional layout of the magnetic circuit for prototype evaluation.

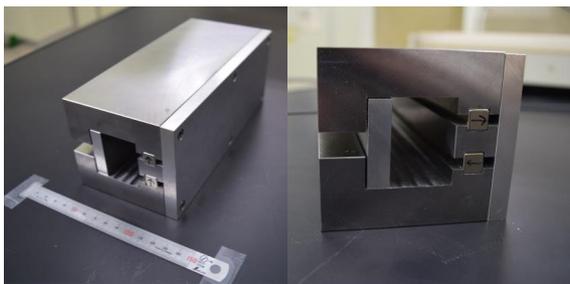
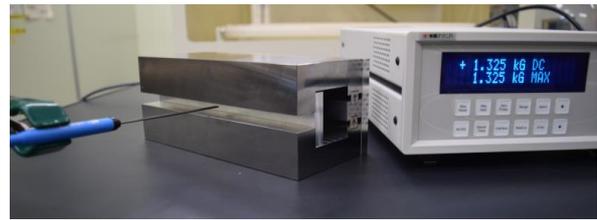
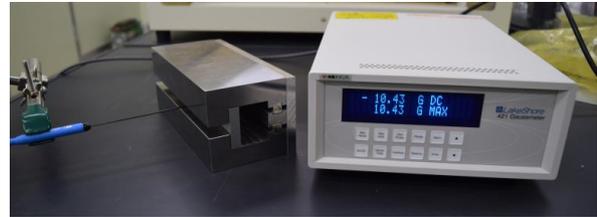


Figure 6: Prototype of the magnetic circuit.



(a) ON state



(b) OFF state

Figure 7: Measurement Prototype of the magnetic circuit.

設置して支持した。

磁気回路試作品の磁場強度測定結果を Fig. 7 に示す。磁場強度は試作品の長手方向の中央部付近で測定した。ON 状態において +1,325 G、OFF 状態では -10.43 G であった。この測定結果と Fig. 5 のシミュレーション結果と比較すると、ON 状態では -625 G (-32.0%)、OFF 状態では -7.83 G (-316%) となった。幅 10 mm のネオジム磁石をはめ込むためにヨークへ幅 10.2 mm の溝を切っているが、ネオジム磁石の幅はプラス公差が大きいため一部で密着性が悪い箇所が生じていた。ON 状態がシミュレーションによる予想より低い磁場強度を示した理由としては、この密着性が悪いことが原因の一つと考えている。また、OFF 状態での差については、先に ON 状態での測定を行った後で OFF 状態の測定を行ったため、ヨークの残留磁化が影響したことが考えられる。磁場強度の絶対値についてはシミュレーションと良く一致しているとは言えないが、永久磁石の向きを回転させることで磁場強度を 1,300 G \leftrightarrow -10 G の間で調整可能であることが実証された。

4. まとめと今後の展望

本研究では、2 つの永久磁石を回転させて磁場強度を調整できるビーム偏向用磁気回路の開発を行った。二次元磁場解析コード PANDIRA を用いた磁場シミュレーションによる設計と縮小モデルの試作評価を行い、下記のような結果が得られた。

- (1) 回転可能な 2 つの永久磁石を配置した C 型ビーム偏向器のモデルにおいて、同期回転角 θ に対してギャップ中の磁場強度がほぼ完全に $\cos \theta$ カーブと一致する依存性を示すことがわかった。磁場強度は、磁化の向きを直列にすることで ON 状態、反平行にすることで OFF 状態を作り出せる構造であり、さらにバイポーラ磁石となっている。
- (2) 角型形状の永久磁石を用いた長さ 200 mm の試作品を作製し、磁場強度の評価を行った。試作した磁気回路の磁場強度を測定した結果、ON 状態にお

いて 1,325 G、OFF 状態では-10.43 G であった。シミュレーション結果との一致はあまり良くないが、磁石の回転により磁場強度を変えられることを実証した。

現状では原理試作の段階であるため、永久磁石を回転できる構造にすることがまだできていない。今後は永久磁石を回転させる機構の実装に取り組み、磁気回路切替時の回転トルクの評価や新方式の開発を進める。

参考文献

- [1] C. Benabderrahmane *et al.*, “Magnets for the ESRF-EBS project”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, pp.1096.
- [2] T. Taniuchi *et al.*, “Status of permanent dipole development for SPring-8-II”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3 (2017), pp. 60-63.
- [3] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Physical Review Accelerators and Beams, 20 (2017) 072401.
- [4] 国際リニアコライダー(ILC)に関する有識者会議 技術設計報告書(TDR)検証作業部会 第3回 議事録
- [5] K. Meguro *et al.*, “Development of magnetic field adjustable permanent magnet dipole”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3 (2017), pp. 524-526.
- [6] Poisson/Superfish version 7.17, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-96-1834.