

磁場強度調整可能な永久磁石型偏向磁石の開発

DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD ADJUSTABLE PERMANENT MAGNET DIPOLE

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. When non-magnetic gap is set as half of the height of the permanent magnet, flux leakage of the off position becomes smallest. This article describes the design of permanent magnet dipole.

1. はじめに

大型放射光施設をはじめとする加速器では、数多くの偏向電磁石が用いられている。これらの偏向電磁石は高い磁束密度を発生させるための大電流だけでなく、その発熱を抑えるための冷却水や空調が必要となるなど電力だけでも多大なランニングコストがかかっている。例として、あいちシンクロtron光研究センターの蓄積リングにおいては、冷却システムを含めた消費電力は全体の実に3割にも及ぶ[1]との報告があり、加速器の運転における省エネルギーは重要な課題である。そこで、次世代放射光施設におけるリングでは、永久磁石を用いた偏

向磁石を採用する計画が検討されており、研究開発が進められている[1,2]。永久磁石を用いると、上述の消費電力の削減になるだけでなく、小型化が可能であることや、電源電圧変動によるリップルや冷却水からの機械的振動を低減させる効果が期待されるという効果もある。また、偏向磁石だけでなく永久磁石によるビーム集束用四極磁石も開発が進められており[3]、リニアコライダーにおける集束レンズや各種加速器の小型化につながる技術として永久磁石による磁気回路は益々重要性が高まっている。

我々はこれまで主に機械加工分野で用いる永久磁石型マグネットチャックの開発を行ってきた。マグネットチャックとは、Figure 1 に示すような加工対象物を磁力によって吸着固定する治具のことであり、内蔵されたネオジム磁石の配列を機械的な動作によって切り替えることで表面磁束密度をON/OFFすることが可能である。従来のマグネットチャックでは水平方向の力がかかると加工対象物が横滑りしてしまうため研削加工や放電加工等に限定して使用されてきたものであるが、磁気回路の再検討により切削加工でも使用できることに成功した[4]。この磁気応用製品の設計・製造の経験に基づき、永久磁石型偏向磁石の開発に取り組んでいる。本稿では、永久磁石を用いたC型偏向磁石の設計の状況について報告する。

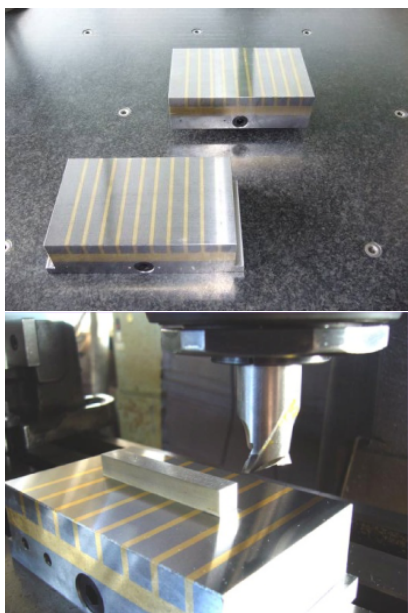


Figure 1: permanent magnetic chuck for milling.

2. 磁気回路の設計

永久磁石型偏向磁石でギャップ間の磁束密度を可変するには、① ギャップの間隔を変える、② 鉄片の位置を動かして磁気抵抗を変えて磁気回路を開放・短絡させる、③ 永久磁石の位置を動かしてギャップに伝える磁束の量を調整する、などの方法がある。マグネットチャックからの延長という点では永久磁石の位置や姿勢を変える方法が考えやすい。例えば、円筒形状の永久磁石を複数個配置してそれぞれ回転させることで、永久磁石の向き、即ち磁化方向を変化させてギャップの磁束密度を調整する方法が報告されている[5]。永久磁石の向きを

[#] kmeguro@pref.iwate.jp

回転させて、磁化方向をギャップに対して垂直にすることで磁束密度が最大に、ギャップに対して平行にすることで磁束密度を最小に設定することが可能である。この方式の特徴は、永久磁石の磁気特性にばらつきがあっても、それぞれの永久磁石を独立に回転することが可能であるためこの影響を解消することができる。

Figure 2 に設計している永久磁石型偏向磁石の断面図を、Table 1 に偏向磁石の設計値を示す。2 個のネオジウム磁石 (N45, □20 mm) を直列に配置し、この磁化の向きを変えることでギャップ中の磁場強度を調整できる機構を考案した。ネオジウム磁石の磁化の方向を、垂直方向に直列に揃えると磁束がギャップ中を通過して ON 状態に、永久磁石を 90° 回転して反平行にすると磁石のごく近傍で閉回路を形成して OFF 状態にできる構造である。この構造において、磁石の周囲の空隙(non-mag gap)を適切に選ぶため、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。

Figure 3 に、non-mag gap の間隔を変えたときの磁力線の様子をシミュレートした結果を示す。non-mag gap をゼロ、即ちネオジウム磁石がヨーク中に完全に埋まった形状にしてしまうと、ON 状態、OFF 状態ともに磁石近傍で閉回路を形成してしまい、偏向磁石として機能しないことが分かる。non-mag gap を少しでも開くと、ON 状態と OFF 状態を切り替えることができるようになる。電子ビー

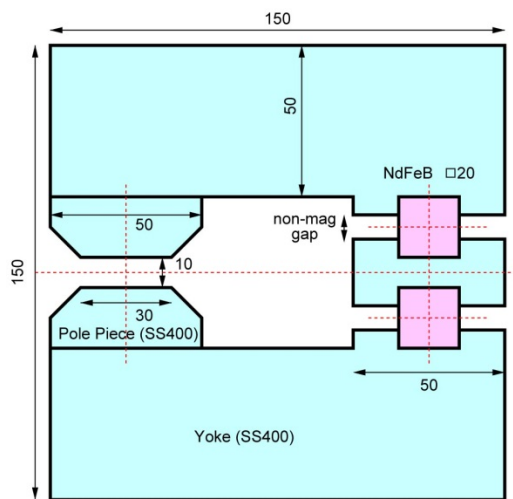


Figure 2: Cross sectional layout of the permanent magnet dipole.

Table 1: Design Values of the Permanent Magnet Dipole

ギャップ長 L_g	10 mm
磁極 D_p	30 mm
磁場強度 B_g	300 mT
磁場均一度	10^{-3} (磁極中心より±10 mm)
永久磁石	N45 (NdFeB)

ム軌道における磁束密度を non-mag gap に対してプロットしたグラフを Figure 4 に示す。ON 状態においては、non-mag gap が広いほど磁束密度が高くなっていく。一方、OFF 状態においては non-mag gap が 10 mm 程度で極小値を示し、狭すぎても広すぎても漏れ磁束が発生することが分かる。これらのことから、non-mag gap は磁石のサイズの半分程度に設定することが最も効果的であると言え、ヨークの太さや永久磁石の間隔を多少変更してもこの傾向に大きな違いがないことを確認している。ON 状態と OFF 状態で磁場の方向が入れ替わっているが、これは磁石の回転方向に依存するものであり、OFF 状態を逆方向に回転すると磁場の反転は見られない。この磁場の反転を積極的に用いれば OFF 状態における漏れ磁束をさらに低減できる可能性もある。

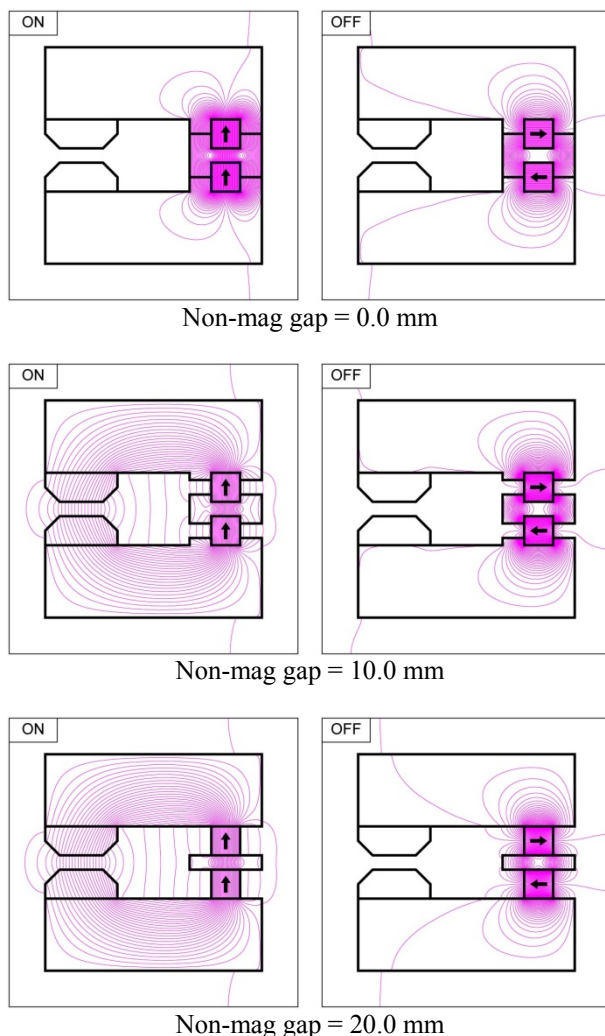


Figure 3: Comparison of magnetic flux lines simulated by PANDIRA.

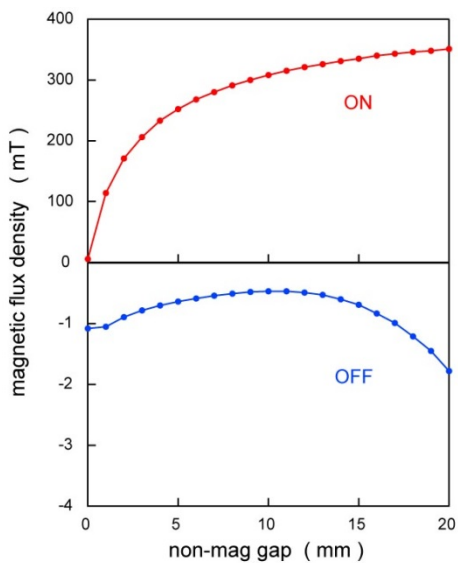


Figure 4: Calculated magnetic field strength at the center of pole-piece as a function of non-mag gap.

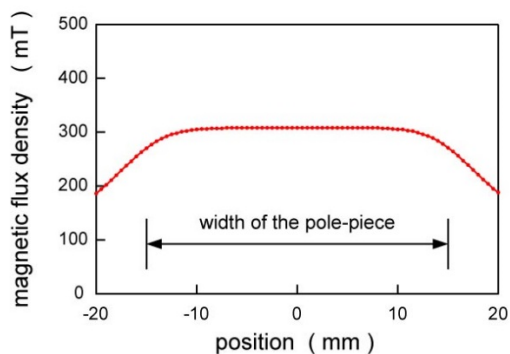


Figure 5: Calculated magnetic field strength distribution along the center line of pole-piece.

Figure 5 に電子ビーム軌道の水平面上における磁束密度分布を示す。現状では磁極先端に磁場分布を補正するシム形状を形成していないため、均一磁場の範囲は ± 12 mm 程度である。ON 状態における磁場強度は最大 308 mT、OFF 状態においては最大 0.47 mT であった。

3. まとめと今後の展望

永久磁石型マグネットチャックの設計および製造技術を活用して、磁場強度調整可能な永久磁石型偏向磁石の開発に着手した。2 個のネオジウム磁石の磁化方向を、垂直方向に直列に揃えると ON 状態に、反平行にすると OFF 状態にできる構造について磁場シミュレーションを行い、non-mag gap を永久磁石の高さの半分にすることで OFF 状態の漏れ磁束を最小にできることを見出した。一方で、電子ビーム軌道の水平面上における磁束密度分布は平坦部 ± 12 mm に対して磁場強度を 300 mT 程度にできる。ON 状態における磁場強度は最大 308 mT、OFF 状態においては最大 0.47 mT であった。

今後は、磁場強度の増強のために更なる磁気回路のアイデアの検討と、シム形状の最適化について取り組んでいく。また、磁気回路の切り替えにかかるトルクの評価、機械的強度や固定方法等の製造技術についての検討も同時に進めていきたい。

参考文献

- [1] S. Fukue *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug 8-10 (2016), 1233-1236.
- [2] T. Taniuchi *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug 8-10 (2016), 689-693.
- [3] T. Mihara *et al.*, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Nov 11-13 (2003).
- [4] 菊地晋也・目黒和幸, 「保持装置」特許第 5716232 号 (2015 年 3 月 27 日).
- [5] T. Honma *et al.*, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 361 (1995), 13-20.
- [6] Poisson/Superfish version 7.17, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-96-1834.