

あいち SR における永久磁石を用いた偏向磁石の開発

DEVELOPMENT OF PERMANENT DIPOLE MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING

福江修平^{#, A)}, 保坂将人^{B)}, 真野篤志^{B)}, 持箸晃^{B)}, 高嶋圭史^{B)},
庄司善彦^{C)}, 林憲志^{D)}, 加藤政博^{D)}

Shuhei Fukue^{#, A)}, Masahito Hosaka^{B)}, Atsushi Mano^{B)}, Akira Mochihashi^{B)}, Yoshifumi Takashima^{B)},
Yoshihiko Shoji^{C)}, Kenji Hayashi^{D)}, Masahiro Katoh^{D)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} Graduate School of Engineering, University of Hyogo

^{D)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

We are developing a permanent dipole magnet for Aichi SR storage ring, with the aim of replacing the currently installed electromagnets in order to reduce electrical power consumption and maintenance costs. Using the analysis software PANDIRA, we have designed a magnet that meets the following requirements: magnetic flux density of 1.4 T, good field region ± 30 mm and pole gap of 50 mm. This paper presents the design of permanent dipole magnet and the results of the conducted simulation. The one-fifth scale prototype that is under consideration is also discussed.

1. はじめに

省エネルギーは地球規模の課題であり、加速器分野においても、将来に向けて取り組むべき重要な課題となっている。特に次世代加速器においては設計上の重要な要求事項となっている。既存の加速器施設においても、ランニングコストの低減に結びつくことから、老朽化・高度化に向けた改造の際に積極的に検討すべき事項である。

電磁石と比べ、永久磁石は付帯設備(電源、コイル、冷却システム)が不要なため電力を消費せず省エネ効果が期待される。加えて、コンパクト化、メンテナンス減、リップルフリーなど多くの利点もあげられる。

先行研究として、SPring-8の将来計画であるSPring-8 II計画においては、永久磁石型偏向磁石の導入が検討されており、試作品の製作とその性能評価が行われている[1]。温度依存性、放射線減磁、製造コストなどが検討課題とされており、加速器の信頼性、安定性の向上にはこれらの課題解決は不可欠である。

Table 1: Parameters of Bending Electromagnets

Magnetic flux density	1.4 T
Good field region	± 30 mm
Gap	50 mm
Magnetomotive force	30132 A·T/coil
Power consumption	24.7 kW
Effective length	1945.6 mm

一方、現在、あいち SR の蓄積リングでは 8 台の常伝導偏向電磁石が稼働している。常伝導偏向電磁石のパラメータを Table 1 に示す[2]。1.4 T の磁束密度を発生

させるために電磁石中の水冷式コイルに起磁力 30132 A·T/coil の大電流を要している。冷却システムを含めたその消費電力はあいち SR 全体のおよそ 3 割をしめており、これを永久磁石に置き換えることができれば、大幅なランニングコストの削減が期待できる。

そこで、我々はあいち SR における現行の電磁石に取って代わる永久磁石を用いた偏向磁石の開発を行っている。到達すべき設計条件は以下の通りである。

- ・磁束密度 1.4 T
- ・有効範囲(磁場均一度 0.1%以下) ± 30 mm
- ・ギャップ 50 mm

Figure 1 に設計したあいち SR 蓄積リング導入用の永久磁石を用いた偏向磁石の立体図を示す。

本研究では、将来のあいち SR 加速器光源への応用を目指し、設計要件を満たす偏向磁石の開発と、運転環境を考慮した課題の解決を試みている。以下、その詳細について述べる。

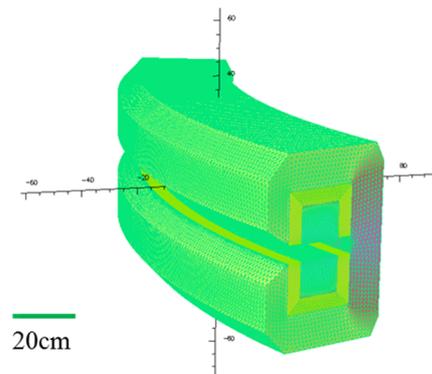


Figure 1: Permanent dipole magnet for Aichi SR.

[#] fukue.shuhei@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

2. 偏向磁石の設計

2.1 偏向磁石の設計

本研究では、永久磁石の中でも良好な磁気特性を有するネオジウム磁石を用いることとした。使用するネオジウム磁石は NEO-MAX[®]: NMX-48BH[3]、ヨーク材は高純度鉄 SSM-250 と仮定した。NMX-48BH の 20°C における残留磁束密度、保持力はそれぞれおよそ 1.39 T, 13.2 kOe である[4]。前述の SPring-8 II 計画における先行研究ではサマリウムコバルト系磁石の利用が検討されている[5]。サマリウムコバルト系磁石は温度特性に優れ、錆びにくいなどの特徴がある[6]。しかし、あいち SR の場合、比較的大きなギャップや有効範囲、さらに設置スペースという空間的な制限を満たしながら 1.4 T という永久磁石が持つ磁力のほぼ限界に近い磁場を発生させなければならない。このためネオジウム磁石に比べおよそ 25%磁力が低いサマリウムコバルト磁石では設計条件を実現するのは困難と判断し、ネオジウム磁石を用いることとした。

設計した偏向磁石の断面図と発生する磁力線の PANDIRA[7]による計算結果を Figure 2 に示す(赤矢印は磁化容易軸)。台形の断面形状を持つネオジウム磁石を隙間なくヨーク内に配置し、3 方向から磁力線を集めることで、磁力線を電子軌道上に集中させる磁気回路を設計した。また、リターンヨーク部分は鉄材が飽和してしまわないよう、必要十分な幅を確保するよう設計した。

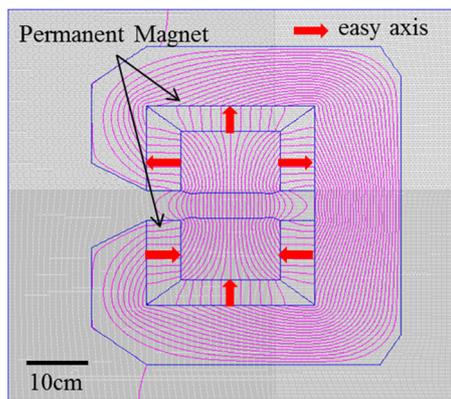


Figure 2: Cross section of the permanent dipole magnet.

Figure 1, 2 で示した磁石モデルについて、電子軌道上の磁束密度とその均一度を定量的に評価した。Figure 3 に電子軌道上水平方向磁場分布を、Figure 4 にその均一度分布を示す。グラフ中の赤線は設計条件を表している。シミュレーションの結果、電子軌道上の最大磁束密度は 1.497 T であり、その有効範囲は 0.1%の範囲誤差で±32.4 mm であった。以上の結果、上記モデルはあいち SR 蓄積リング導入のための設計条件を満たしていることを確認した。

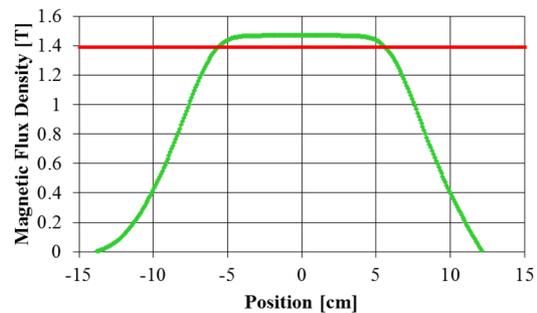


Figure 3: Magnetic field distribution in the horizontal plane.

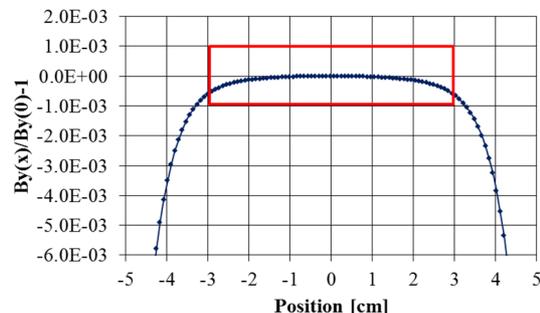


Figure 4: Distribution of magnetic homogeneity.

2.2 温度依存性

永久磁石の磁気特性は温度に大きく依存する。NMX-48BH の温度係数は残留磁束密度、保持力に関してそれぞれ-0.11 %/K, -0.59 %/K である。鉄の線膨張率は 10^{-5} 程度の温度係数であり、ヨーク材の膨張による磁場の変化はおよそ-0.001 %/K と無視できるほど小さい。しかし、ネオジウム磁石の温度係数はその 100 倍程度であるため、温度環境による磁場の変化を無視できない。Figure 5 に 20~30°C にわたる電子軌道上磁束密度のシミュレーション結果を示す。温度の上昇に伴い電子軌道上の磁束密度が減少していることが分かる。永久磁石を用いた偏向磁石の蓄積リングへの導入を実現させるには、この温度変化による磁束密度変化を補償し、広い温度範囲にわたって発生磁場を一定に保持する必要がある。

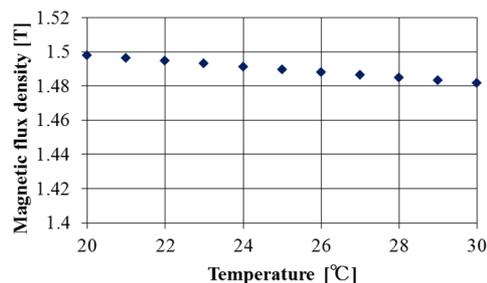


Figure 5: Simulated temperature dependency of magnetic flux density on the electron orbit.

2.3 温度依存補償

2.2 で述べた温度変化による磁束密度変化を補償する方法としてよく使われる手段が整磁合金による磁気回路の分路である。永久磁石より常温で大きな温度係数をもつ整磁合金を磁極間付近に置き磁束の一部を分路させる。これにより、温度の上昇に伴い、整磁合金を流れる磁束が減少し磁極間に流れるため、広い温度範囲にわたって磁場を一定に保持することが可能である。

本研究では、整磁合金 NEO-MAX[®]: MS-2[8]を用いた磁気分路による温度依存補償に取り組んでいる。整磁合金を磁極間付近に配置した形状についてシミュレーションを試みているが、現段階では最適な形状は見つからない。今後、さらに整磁合金を用いた温度依存補償の検討を続けていく予定である。

また、本研究ではコイルによる温度依存補償についても検討した。リターンヨーク部分にコイルを巻き、コイル中を流れる電流量を調節することで、温度環境による磁束密度変化を補償する方法である。Figure 6 に 20~25°C にわたる電子軌道上磁束密度と電流量の関係のシミュレーション結果を示す。温度の上昇に伴いコイル中の電流量を適切に調節することで、発生する磁力を一定に保持できることを確認した。

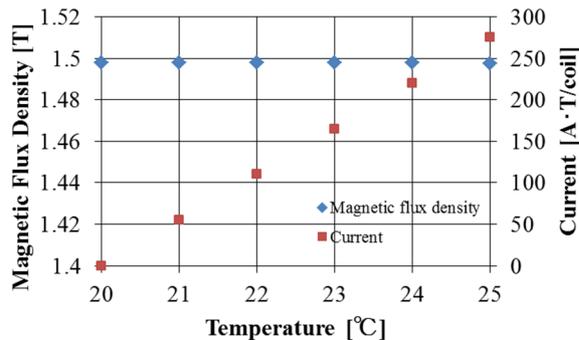


Figure 6: Simulated optimization for current value.

3. プロトタイプの製作

3.1 プロトタイプの設計

我々は永久磁石を用いた偏向磁石のプロトタイプの製作を検討している。製作の目的は、電子軌道上磁場分布およびその有効範囲のシミュレーション結果との比較、温度依存性とその補償方法の検討、漏れ磁場の測定である。Figure 7 に、現在検討を進めているプロトタイプの立体図を示す。形状は実機が sector 型であるのに対して rectangular 型で、スケールは実寸大の 5 分の 1 である。

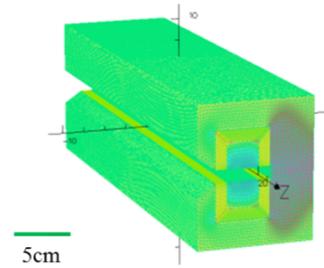


Figure 7: One-fifth scale prototype of rectangular permanent dipole magnet.

プロトタイプに関して行ったシミュレーション結果について、Figure 8 に電子軌道上水平方向磁場分布を、Figure 9 にその均一度分布を示す。シミュレーションの結果、電子軌道上の最大磁束密度は 1.459 T であり、その有効範囲は 0.1% の範囲誤差で ±6.6 mm であり、ともに設計条件を満たしていることを確認した。実寸大のシミュレーション結果とおおむね一致したため、5 分の 1 スケールの rectangular 型モデルでも磁場分布のシミュレーション結果を確認するのに十分であると判断した。

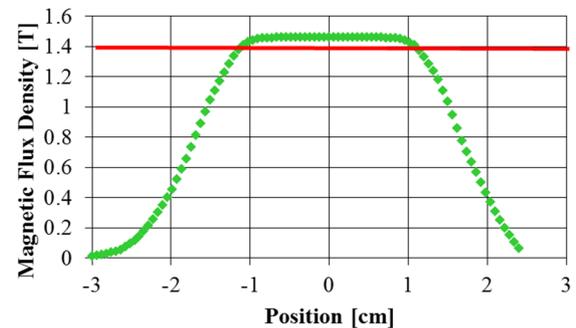


Figure 8: Magnetic field distribution in the horizontal plane of prototype.

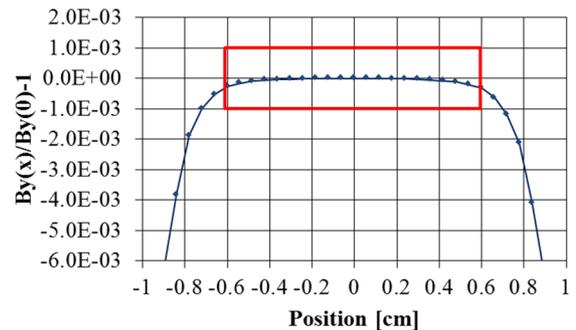


Figure 9: Distribution of magnetic homogeneity of prototype.

3.2 磁場測定

製作するプロトタイプの性能確認のため、磁場測定実験を行う予定である。ホール素子を用いて電子軌道上の磁束密度、及びその温度依存性等を観測する。

電子軌道上磁束密度を正確に測定するため、3 軸ホール素子と、自動ステージを用いた自動駆動式測定系を用意し、PC 上でソフトウェアを用いて、ステージの移動を制御する測定システムを構築する。

謝辞

この研究において、渡部貴宏博士をはじめとして SPring-8 の皆様には、多大なるご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。また、日立金属株式会社藤澤様、並木様のご協力により、研究の進捗をすることができております。皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Taniuchi, *et al.*, *Proc. of IPAC 2015*, WEPMA050 (2015).
- [2] NSSR デザインレポート光源 091204.pdf
- [3] <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/auto/el/pdf/hg-a27-f.pdf>
- [4] <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/auto/el/pdf/nmx.pdf>
- [5] T. Watanabe, *et al.*, *Proc. of IPAC 2016*, TUOCB03 (2016).
- [6] <http://www.neomag.jp/>
- [7] Poisson/Superfish Los Alamos National Laboratory ReportNo. LA-UR-96-1834.
- [8] <http://www.hitachi-metals-neomaterial.co.jp/technology/catalog/pdf/cat10.pdf>