

SPring-8-II のための永久磁石ベース偏向磁石開発の現状

STATUS OF PERMANENT DIPOLE MAGNET DEVELOPMENT FOR SPRING-8-II

谷内 努^{#, A)}, 青木 毅^{A)}, 松原伸一^{A)}, 高野史郎^{A, B)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)}

Tsutomu Taniuchi ^{#, A)}, Tsuyoshi Aoki^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)},

Shiro Takano^{A, B)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

We have been investigating permanent magnets for dipole magnets of SPring-8-II in point of small electric power consumption, compactness and so on. Some demonstration magnets with a field-variable structure, a longitudinal field gradient for emittance reduction and a magnetic shunt circuit for temperature compensation were designed, manufactured and tested. Based on the knowledge and the experience gained in these demonstrations, we built a dipole magnet for SPring-8-II lattice and a replacement dipole magnet for SPring-8 injection section. In this paper, we report a present status of permanent dipole magnet development for SPring-8-II.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 のアップグレード案として低エミッタンス高輝度放射光源 SPring-8-II[1]が提案されているが、我々は 2012 年に永久磁石ベース偏向磁石を提案[2]し、本アップグレード計画のための開発研究[3,4]を進めてきた。永久磁石ベース偏向磁石は電磁石と比べてコイルのはみ出しが無いので、低エミッタンス蓄積リングにおける偏向磁石の分割数増に伴う加速器コンポーネントの高充填化に対応しやすい上、消費電力の大幅な削減や冷却水に起因する振動の低減、空調・冷却水などのユーティリティ設備の規模縮小など多くのメリットが得られると考えられる。永久磁石ベース偏向磁石はこれまでビーム輸送系などで採用された実績があり、現在進行中の Sirius[5]、ESRF-EBS[6]などの次世代放射光源の主リング用としても採用されて始めている。我々は永久磁石を用いた偏向磁石を次世代放射光源に適用するための検討を進めており、シミュレーションによる磁気回路設計や原理実証機による測定、長期安定性や信頼性など解決すべき各課題について検証結果を積み上げてきた。さらに、これまで得られた知見を反映させ、昨年度から下記のような実機サイズの磁気回路製作を開始した。

- SPring-8-II のラティス設計において最大の磁場強度を有する Normal Bend
- 放射線実環境における長期安定性を確認するための SPring-8 蓄積リング入射部ビーム輸送系偏向磁石 (SSBT-BM5)

さらに、この磁気回路に漏れ磁場打ち消し構造を付加した、次世代リング型光源のビーム入射部に用いるための永久磁石型 DC セプトタムの試作[7]も行っている。

本論文では、SPring-8-II に向けた永久磁石ベース偏向磁石の開発研究の経緯及び現状と今後の展開予定について報告する。

2. SPring-8-II 用偏向磁石

現在提案されている SPring-8-II のラティス (Figure 1) では、1セルあたり5つの偏向磁石が配置される。セル中心に設置される Normal Bend (NB)とそれに対して対称に設置される 2 種類×2 台の Longitudinal Gradient Bend (LGB)である。これらの偏向磁石の主なパラメータを Table 1 に示す。

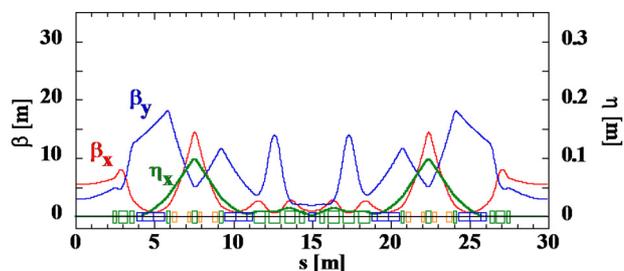


Figure 1: A unit cell of the 5-bend achromat optics for SPring-8-II (tentative).

Table 1: Major Specifications of Permanent Bending Magnets for SPring-8-II (tentative)

Magnetic field [T]	
NB	0.953
LGB type 1	0.193, 0.274, 0.544
LGB type 2	0.259, 0.362, 0.791
Effective length [m]	
NB / LGB	0.42 / 0.7, 0.7, 0.35
Gap [mm]	25
Good Field Region [mm]	±6
Field error	5×10^{-4}

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

3. 要素技術開発および放射線減磁評価

我々は SPring-8-II に向けた永久磁石型偏向磁石を 2012 年に提案し、原理実証及び要素技術開発のための試作[8]を行ってきた。一連の開発研究で、永久磁石を用いた偏向磁石に関する下記の項目について評価を行い、SPring-8-II の偏向磁石として十分機能する目処が付いた。

- ・ 永久磁石(ネオジム系 NMX-44CH, NMX-33UH)を用いた偏向磁石の組み立て
- ・ シミュレーション(CST STUDIO SUITE®[9])結果と実測値の比較
- ・ Outer Plate(上下配置)による磁場調整機構の原理実証(可変範囲、ヒステリシス等)
- ・ 磁場分布の均一性(磁化の不均一性緩和)
- ・ 磁気回路全体における温度係数
- ・ 永久磁石組み入れによるギャップの製作精度
- ・ 磁気回路セグメント間の間隙に発生する磁場ディップをノーズ構造により補正
- ・ 整磁合金を用いた温度補償回路
- ・ LGB における 3 セグメントの一体化、アライメント
- ・ 永久磁石(Sm₂Co₁₇系 LM-32SH)を用いた偏向磁石の組み立て
- ・ 回転ヨークによる磁場調整機構の原理実証
- ・ 磁場強度長期安定性観測のための磁場モニタ(ヨーク内スロットにおける NMR 磁場測定、精密天秤による磁力測定)

さらに、永久磁石の初期減磁に対する熱枯らしや放射線環境下における減磁についても検討を行っており、8GeV 電子ビーム照射試験の結果、ネオジム磁石に比べ Sm₂Co₁₇ 磁石の耐放射線性が高いことを確認した。また、磁気回路内で永久磁石に加わる逆磁場の大きさを表すパーミアンス係数が大きいほど(逆磁場が小さいほど)放射線減磁が起こりにくいことが知られているため、磁気回路設計においては、パーミアンス係数が小さくなりすぎないように留意している。

4. 実機サイズ磁気回路製作

4.1 SPring-8-II 用 Normal Bend

SPring-8-II のレギュラーセル試作に向け、永久磁石型偏向磁石のうち最大の磁場強度 0.95T を有する Normal Bend の製作を行った。使用した永久磁石は、Sm₂Co₁₇ (TOKIN LM-32SH, B_r>1.12T, H_{cb}>795kA/m) [10]で、初期減磁及び放射線減磁対策として 200°C の熱処理を施した。完成した Normal Bend とその磁気回路構造を Figure 2 に示す。磁場調整機構は、ヨーク側面で磁束が外部に漏れている場所に配置された磁場調整プレートを上下させる構造とした。磁場調整プレートを支えるリニア・モーショングイド(LM ガイド)は非磁性材質の物が入手できなかったため、標準の SUS440C(磁性)を採用したが、LM ガイドへ常時回り込む磁束を抑えギャップ磁場の減少を極力少なくするため、シミュレーションにより磁石面と LM ガイドの距離を最適化した。

製作コストインパクトの大きい永久磁石量を削減しつつ良磁場領域±6mm を確保できるよう、磁極幅は 35mm とした。このため、真空チャンバー設置後は、磁束密度

測定のために磁極ギャップへアクセスすることが困難になるため、リターンヨーク側に磁場観測用のスロットを設けて NMR 磁場測定器で要求される均一磁場を発生させる。本スロット内に生じる磁束密度はギャップでの値と異なるが、事前に測定あるいはシミュレーションにより得られる相対関係からギャップ値に換算できる。

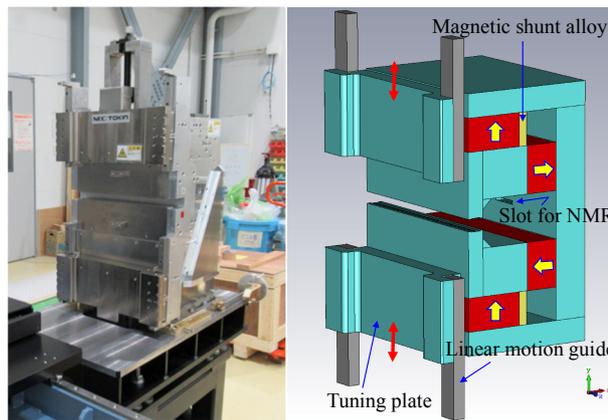


Figure 2: (Left) Normal Bend with sliding outer plates for field adjustments. (Right) Structural drawing of NB magnetic circuit.

磁場調整プレート位置とギャップ中央での磁束密度の測定結果を Figure 3 に示す。

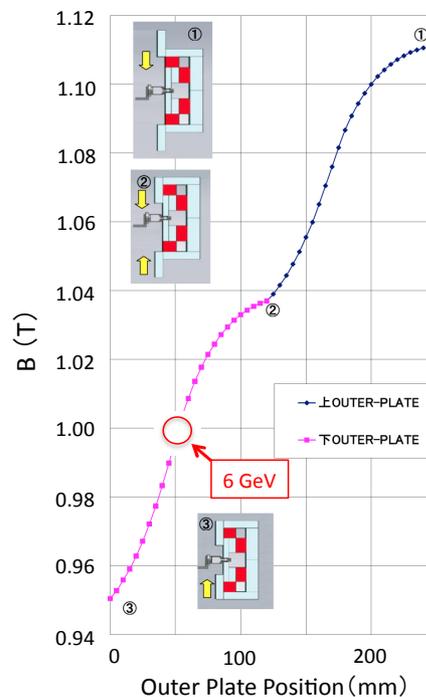


Figure 3: Magnetic field tuning by using outer plates. (Magnetic shunt alloy was not installed.)

上下のプレート移動により約 14%の調整幅が得られている。これにより、着磁及び組み立てによるギャップ磁場

のばらつきを補正するとともに、万が一の放射線減磁等に対応可能となる。

4.2 SPring-8-II 用 Longitudinal Gradient Bend

SPring-8-II ラティスの LGB は Figure 4 に示すように、磁束密度の異なる3つのセグメントから構成され、ビーム軸方向に階段状の磁場分布を形成する。階段状磁場分布を実現するには磁極ギャップを階段上に変える方法が構造的に簡単であるが、ギャップを大きくすると漏れ磁場による隣接4極電磁石への影響が大きくなるため、我々は磁極ギャップを一定としながら磁気回路をセグメントに分け、各セグメントの永久磁石量を変える構造を採用した。磁気回路セグメント間の間隙には磁場分布に凹みが生ずるが、磁極先端にノーズ構造を設けてセグメント間のクロストークを小さくしながら磁場分布の凹みを補正している。磁気回路構造は真空チャンバーのメンテナンス等を考慮して C 型としており、製造時の永久磁石着磁強度のばらつき誤差及び設置後の減磁に対応するための磁場調整機構を有している。本 LGB の磁気回路設計は完了しており、2タイプある LGB のうちの1タイプを本年度中に製作する予定である。

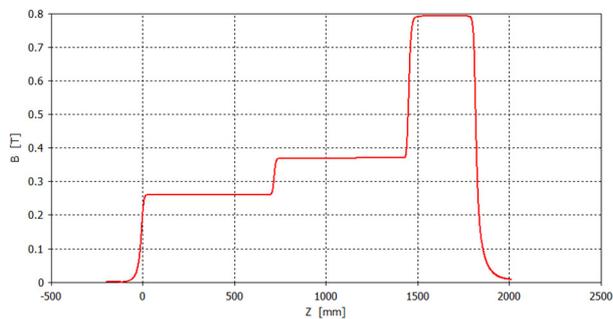
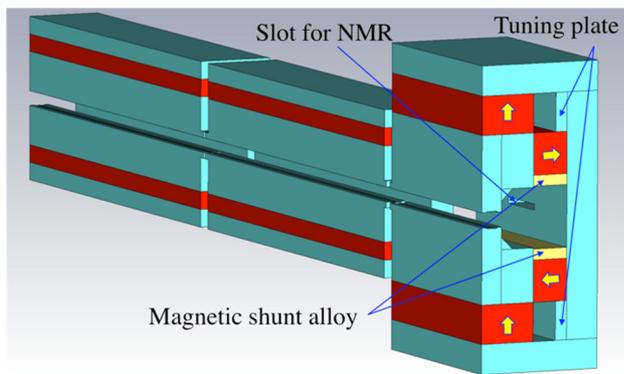


Figure 4: Longitudinal gradient bend (LGB) composed of three segments (upper) and step-like distribution of longitudinal magnetic field (lower).

4.3 SPring-8 入射部用偏向磁石

永久磁石型偏向磁石の長期安定性や蓄積リング収納部における放射線実環境の影響を確認するため、SPring-8 蓄積リング入射部ビーム輸送系の最終偏向電

磁石である SSBT-BM5 を永久磁石型に交換することを計画している。2016 年度は、Figure 5 に示した4セグメント構成の永久磁石磁気回路を製作した。SPring-8-II の LGB で用いられるセグメント構造を踏まえ、また、将来 8GeV から 6GeV に移行した場合にも利用出来るよう、1つの偏向磁石が 4 セグメントにより構成されるよう設計した。これにより、将来、4 セグメントを 3 セグメントに減らすことで BL 積を 3/4 にすることが可能となる。また、本磁石にも、リターンヨーク部に NMR 用のスロットを設けた。

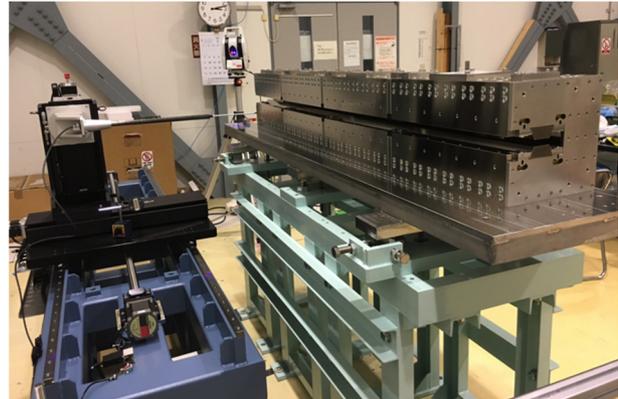


Figure 5: Permanent bending magnet SSBT-BM5 at 3-D field measurement bench.

温度補償のための整磁合金導入量調整は、メーカーにてセグメント単体で行った。その後、4セグメント一体化後の温度係数を、Figure 6 に示す温調ブース(温度設定範囲 18~32°C)にて測定した。その結果、一体化状態での各セグメントの温度係数(27±1°Cの範囲)は、 $-5 \times 10^{-5} \sim +5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ の範囲内に収まり、4セグメント平均の温度係数は $-3.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ となった。今後は3次元磁場測定を行った後、蓄積リング収納部内の仮置きスペースで数ヶ月間の磁場変動観測を行い、今年度冬期メンテナンス期間に電磁石との入れ替えを行う予定である。



Figure 6: Temperature controlled booth for temperature coefficient measurement of permanent magnet circuit.

4.4 次世代リング型光源ビーム入射部用 DC セプタムの試作

永久磁石型偏向磁石の研究開発において得られた設計・製作に関する知見をもとに、次世代リング型光源のビーム入射部に用いるための永久磁石型 DC セプタムの試作を行った。完成品の写真及び構造概念図を Figure 7 に示す。入射ビーム軌道と近接する蓄積ビーム軌道への漏洩磁場を低減するため、磁場打ち消し用磁石により磁気遮蔽板内にギャップ磁場と対抗する磁場を与えて遮蔽板の薄肉化を実現している。また、磁気回路内に配置されたシャント板の位置を変えることにより磁場調整を可能とする構造を採用した。今後、磁気遮蔽ダクトと組み合わせて3次元磁場測定を行う予定である。

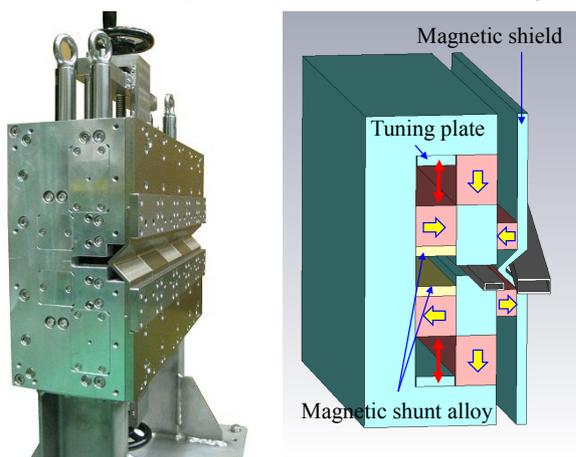


Figure 7: Prototype of permanent magnet based DC septum.

5. 安全対策

これまで、SPring-8-II に向けていくつかの永久磁石磁気回路試作・試験を行ってきたが、作業時に通電を止めることのできる電磁石とは違い、永久磁石では常時強磁場が発生した状態で組み立て作業や測定作業を行う必要がある。強磁場による重大な吸着事故を防止するため、現在我々が取っている対策は、非磁性工具の使用、強磁場発生部へのカバー装着、強磁場警報器 (Figure 8, ディード社マグウォッチャー[11]) の携帯などである。

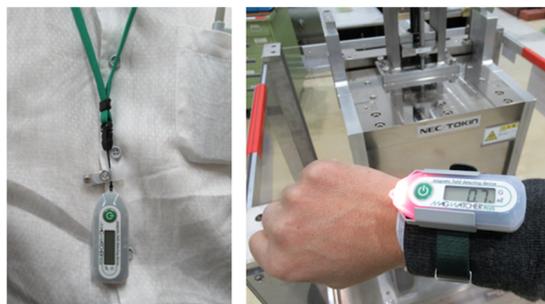


Figure 8: Wearable magnetic field alarm (Magwatcher®) for safe work.

強磁場警報器は病院の MRI 室における吸着事故防止のために開発されたもので、ペンダント型またはリストウォッチ型として作業者が携帯できるよう小型化されている。磁場強度レベルを3段階で設定でき、レベルに応じて発光及び警報音で作業者に磁場の存在を知らせることができ、磁場環境作業に不慣れた作業者はもちろんのこと、熟練作業でもまれに起こる不注意事故を防ぐのに有効である。

6. まとめ

SPring-8 のアップグレード計画である SPring-8-II の偏向磁石として、小型化・省電力化・高安定化が期待できる永久磁石ベース偏向磁石の検討・開発を進めている。現在は、シミュレーションによる設計検討や原理実証機による要素技術開発で得られた知見をもとにした実機サイズ磁気回路の設計・製作のフェーズに入っており、蓄積リング収納部における放射線実環境での長期安定性確認試験及びビーム輸送系での実運用も予定されている。さらに、強磁場を常時発生している永久磁石周りの作業における安全対策など、実運用に向けた課題についても検討していく。

謝辞

本研究は主に理化学研究所開発予算による研究成果である。また、DC セプタムは文部科学省「次世代加速器要素技術開発プログラム」からの委託事業として実施した。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “SPring-8 Upgrade Project”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.2867.
- [2] T. Watanabe *et al.*, “Magnetic-field Variable Permanent Dipole Magnet for Future Light Sources”, Proc. of IPAC’14, Dresden, Germany, p.1253.
- [3] T. Watanabe *et al.*, “Magnet Development for SPring-8 Upgrade”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.1093.
- [4] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams in press.
- [5] L. Lin *et al.*, “Towards Diffraction Limited Storage Ring Based Light Sources”, Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark.
- [6] C. Benabderrahmane *et al.*, “Magnets for the ESRF-EBS project”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.1096.
- [7] S. Takano *et al.*, “Development of Permanent Magnet based DC septum”, TUP070 in these proceedings.
- [8] T. Taniuchi *et al.*, “R&D of Permanent Dipole Magnet for SPring-8-II”, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOP109, Chiba, Japan, 8-10 Aug, 2016, p.689; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP1/MOP109.pdf
- [9] CST STUDIO SUITE®; <https://www.cst.com/products/csts2>
- [10] https://www.tokin.com/product/pdf_dl/eikyu_jisyaku.pdf
- [11] <http://www.deed-jp.com/magwatcher.html>