

永久磁石による縦方向磁場勾配型偏向磁石の開発

DEVELOPMENT OF PERMANENT MAGNET BASED LONGITUDINAL GRADIENT BEND

谷内 努^{#, A)}, 青木 毅^{A)}, 松原 伸一^{A)}, 柳田 謙一^{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)}, Kenichi Yanagida^{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

For the next-generation low-emittance light sources such as proposed SPring-8-II, a longitudinal gradient bend (LGB) that suppresses the quantum excitation of electron beam by changing a deflection angle according to the dispersion function of lattice will be adopted. We have developed permanent magnet based bending magnets that are expected to have merits such as the reduction of power consumption, the failure frequency, and mechanical vibrations due to water supplies. For the purpose, we have proposed and demonstrated mechanisms to solve problems unique to permanent magnets; e.g., the temperature compensation, the magnetic field adjustment, nose structures for smooth magnetic field transition between magnet segments, and the demagnetization. In this paper, we report our design, manufacturing and the results of performance evaluation of the permanent magnet based LGB that we newly developed as an actual size prototype for the SPring-8 lattice.

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 SPring-8-II の偏向磁石として永久磁石ベース偏向磁石を提案[2]し、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を行うとともに、長期安定性や信頼性など解決すべき各課題について検討してきた[3-5]。また、一昨年度からは、これまで得られた知見を反映させ、SPring-8-II 実機サイズの偏向磁石設計・試作を開始するとともに、実放射線環境における永久磁石ベース偏向磁石の長期安定性を確認するため、SPring-8 蓄積リング入射部ビーム輸送系偏向磁石 (SSBT-BM5) を電磁石から永久磁石に置き換えて実機運用[6]を開始するなど、量産に向けた準備段階に入っている。さらに、偏向磁場を発生するための永久磁石回路に加えて漏れ磁場打ち消し構造を有する次世代リング型光源のビーム入射部用永久磁石型 DC セプタムの試作[7]も行うなど、永久磁石ベースの加速器用磁の開発を進めている。昨年度は SPring-8-II ラティスの大きな特徴の一つである縦方向磁場勾配型偏向磁石 (Longitudinal Gradient Bends : LGB) についてプロトタイプを設計・製作した。本論文では、本 LGB の設計・製作について報告する。

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 (Fig. 1) では、1セルあたり5つの偏向磁石が配置される。セル中央に設置される通常偏向磁石 (Normal Bend : NB) とそれに対して対称に設置される 2 種類×2 台の LGB である。

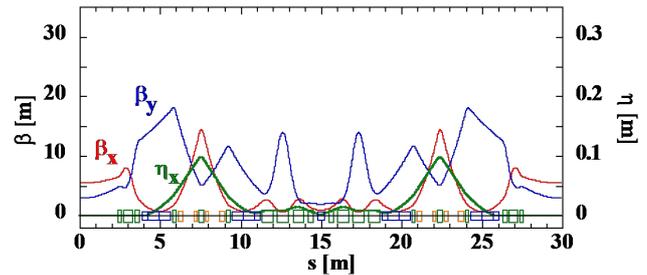


Figure 1: A unit cell of the 5-bend achromat optics for SPring-8-II (tentative).

これらの偏向磁石の主なパラメータを Table 1 に示す。

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

| | |
|------------------------|---|
| Gap field [T] | NB: 0.953 LGB-B1: 0.544, 0.274, 0.193 LGB-B2: 0.259, 0.362, 0.791 |
| Effective length [m] | NB: 0.42 LGB: 0.7, 0.7, 0.35 |
| Gap [mm] | 25 |
| Good Field Region [mm] | ± 6 |
| Field error | $< 5 \times 10^{-4}$ |

3. 磁気回路設計

3.1 概要

LGB は SPring-8-II などの次世代高輝度放射光源り

[#]ihcuinat@spring8.or.jp

ングにおける低エミッタンス化を目的として検討されている偏向磁石で、ラティスの分散関数に応じた磁場強度分布とすることで、一定磁場強度の偏向磁石よりも電子ビームの量子励起を抑制することができる。SPring-8-II ラティスの LGB は Fig. 2 に示すように、ギャップ磁束密度の異なる3つのセグメントから構成され、Fig. 3 のようなビーム軸方向に階段状の磁場分布を形成する。

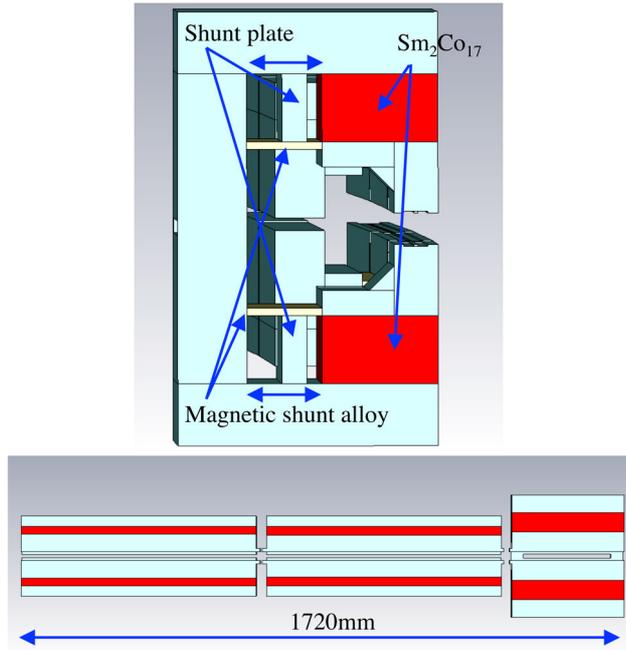


Figure 2: Longitudinal gradient bend (LGB) composed of three segments.

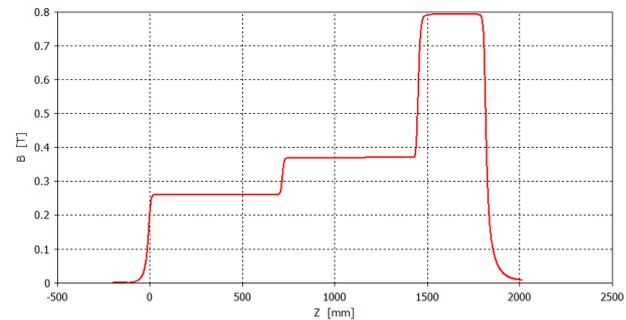


Figure 3: Simulated step-like distribution of longitudinal magnetic field.

階段状磁場分布を実現するには磁極ギャップ長を階段状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、我々はギャップ長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。

ヨーク構造は真空チェンバーのメンテナンス等を

考慮してC型とした。

3.2 磁石配置

磁気回路内の永久磁石位置は、磁場調整機構及び整磁合金の配置、ビーム軸方向への漏れ磁場等を考慮して磁極上下に主磁石を置き、不足分を磁極側面に配置した。

3.3 整磁合金配置

永久磁石の残留磁束密度に対する温度係数は Nd-Fe-B 磁石よりも係数の小さい $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ でも $5 \times 10^{-4}/\text{K}$ 程度あるため、次世代高輝度放射光源リングのラティス磁石としては無視できない。そこで、整磁合金による補償回路を付加している。整磁合金は製造の最終段階で温度特性を測定しながら導入・調整する必要があるため、製造後のアクセスしやすさを考慮して、整磁合金の配置を決定した。

3.4 磁極

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 $\pm 6\text{mm}$ を確保できるように、磁極幅は 35mm とした。また、ビーム軌道が各セグメントの良磁場領域中央付近を通るように、Fig. 4 に示すようなセグメント配置とした。磁極先端には平坦度を向上させ、良磁場領域を広げるためのシム構造を設けた。

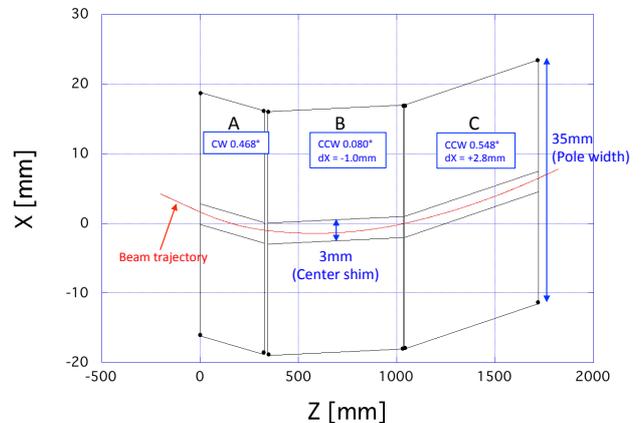


Figure 4: Configuration of LGB segment along beam trajectory.

セグメント間の磁場クロストークによる磁場勾配の緩和化を防ぐためにはセグメント間に間隙を設ける必要があるが、間隙が広すぎると磁場分布に凹みが生じてしまうため、設計通りの磁場勾配を実現しつつ間隙の凹みを小さくする設計は容易ではない。そこで、我々は磁極先端にノーズ構造を設けて磁場分布の凹みを回避する方法を考案し、今回の LGB にも採用した。またこの構造には、セグメント間の磁場クロストークを抑えることにより、セグメント間の引力・斥力が軽減され、磁石の組み立てや解体をより安全に行えるという利点もある。

3.5 磁場調整機構

永久磁石ベースの加速器用磁石においては、製造時の永久磁石着磁強度のばらつき誤差及び長期運用における減磁に対応するため、磁場調整機構が必要である。我々はこれまで幾つかの磁場調整方式を考案・試作してきたが、最初に提案した Outer Plate 方式は、磁場調整範囲を大きく取れるなどの特長を持つ一方、磁石ヨーク上下部にシャントプレートや駆動機構が配置されるため、磁石アライメント作業との干渉や架台下通路を確保しにくいなどの問題があった。そこで、今回製作した LGB では、次世代リング型光源ビーム入射部用 DC セプタム試作で採用した Inner Plate 方式を採用するとともに、シャントプレートの移動方向を垂直から水平に変更して、架台やアライメントとの干渉を回避できる構造とした。シャントプレートに加わる吸引力の例として、LGB-B1 セグメント B の計算結果を Fig. 5 に示す。

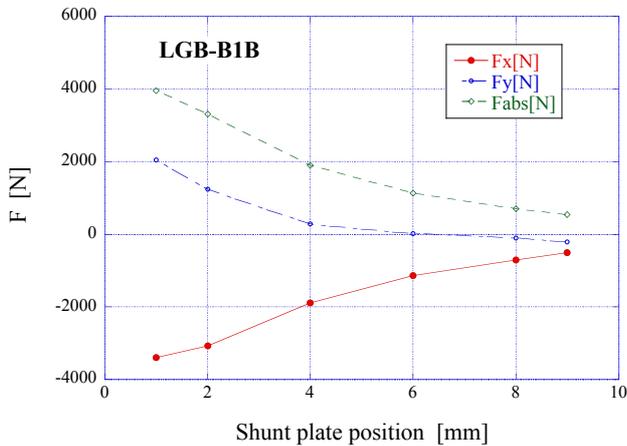


Figure 5: Simulation results of magnetic force acting on the shunt plate of LGB-B1B.

シャントプレートが永久磁石に近づくにつれ、吸引力は急激に増加する。駆動軸への過大な負荷を避けるため、最近距離（ギャップ磁場最小）を 1mm とした。その時シャントプレートに加わる吸引力は、水平方向に 3400N、垂直方向に 2000N に達する。

3.6 長期磁場観測

永久磁石ベース偏向磁石の長期運用は世界的にも実績が少なく、減磁の定量的な予測が困難であるため、実運用時の長期磁場観測は不可欠である。本 LGB では永久磁石量削減のため磁極幅及び磁極ギャップ長を狭くしているため、真空チャンバー設置後は磁束密度測定用 NMR プローブを磁極ギャップ内に設置することは困難である。そこで、リターンヨーク側に磁場観測用のスロットあるいはギャップを設けて磁束密度を観測することとした。ただし、磁極ギャップでの磁束密度が 0.3T 以下になるようなセグメントの場合、リターンヨークに開けたスロット状の観測窓では発生する磁束密度が 0.1T 以下となり、NMR 磁場測定器の測定限界に近く、そのようなケースではスロットではなくギャップ状の観測窓とした。観測窓に生じる磁束密度は磁極ギャッ

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することができる。

4. 製作

4.1 永久磁石

前述のような設計方針のもと、SPring-8-II ラティス設計の 2 種類の LGB を製作した。使用した永久磁石は耐放射線減磁の観点から $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を選択した。永久磁石は着磁器の大きさに合わせて分割着磁され、初期減磁及び放射線減磁を低減するために分割形状（パーミアンス係数 1~2.5）にて熱減磁処理を施されている。

4.2 磁極・リターンヨーク

磁束密度が高くなる磁極部分には SUY 材、リターンヨーク及びシャントプレートには SS400 を使用した。また、安全性の観点からヨークへの磁性体吸着を防止するため、ヨーク天板及び側面を厚さ 10mm 程度の非磁性 SUS でカバーしている。さらに、ビーム軸方向側面には、整磁合金量を調整するための導入用窓を設けている。

4.3 架台・セグメント一体化

電磁石の場合、真空チャンバーを設置する際には電磁石を半割りするが、永久磁石ベースの場合は半割り困難である。そこで、真空チャンバー設置やベキング時には偏向磁石を水平に移動できるような機構を有する架台を製作した。LGB の 3 つのセグメント一体化についてもいくつかの方法を検討した結果、中央のセグメントを水平方向から両端のセグメント間に挿入した。その際、Fig. 6 のような導入機構を用いた。



Figure 6: Installation of the middle segment of LGB-B1. Sliding function of girder system is also used for vacuum chamber installation.

導入時には、セグメント間距離により吸引力 (LGB-B1B の場合、最大 140N) あるいは反発力 (同 98N) が働くが、導入機構を用いることでセグメント間に磁力が働いた状態でも安定に中央セグメントを挿入することができた。

5. 評価

5.1 磁場調整

LGB 製作後に測定された、磁場調整機構による磁場強度可変範囲の例 (LGB-B1A) を Fig. 7 に示す。今回 2 台製作した LGB のうち、1 台 (1 社) については磁場調整機構が想定通り機能し、Fig.7 に示す通り想定通りの滑らかな磁場調整を行うことが出来た。なお、長期運用による万が一の減磁にも対応できるように、上方 10% の調整代が確保されている。一方、もう 1 台 (1 社) については磁場調整機構が正常に作動せず、構造上の問題が確認された。

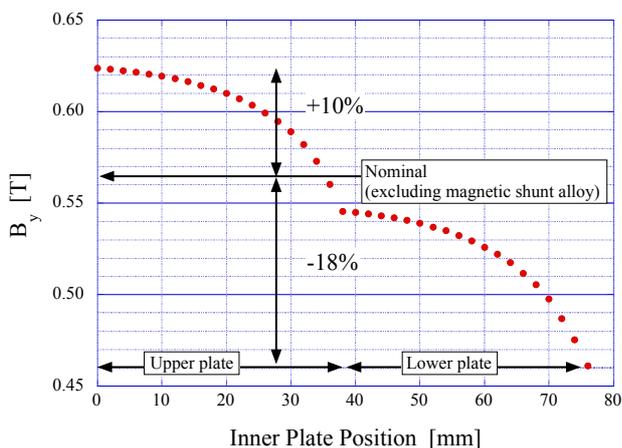


Figure 7: Demonstration of magnetic field strength tuning. (LGB-B1A without magnetic shunt alloy for temperature compensation.)

3次元磁場測定に先立ち、NMR 磁場測定器のプロブを磁極中心部に設置し、磁場調整機構によって各セグメントの磁場強度を仕様値に合わせ込んだ。スパナによる調整軸の手動回転で 10^{-5} 以下の精度で調整できた。セグメント間クロストークがあるため隣接セグメント調整がわずかに影響するが、1 サイクルの Iteration で十分に調整できた。

一部の磁場調整機構では磁力によるシャントプレートの変形や動作不良が見られた。これらの不具合については、シャントプレートの厚みや軸受けの選定、組み立て精度等の検討を行い、改善していく予定である。

5.2 磁場分布

LGB 磁石の磁場分布測定は、SPring-8 サイト内に設置されている 3次元磁場測定器 (3軸ホール素子、温度補正機能付き) を用いて行われた。ビーム軸方

向は、Fig. 8 に示すようなセグメント間に凹みのない設計通りの階段状磁場分布が得られた。

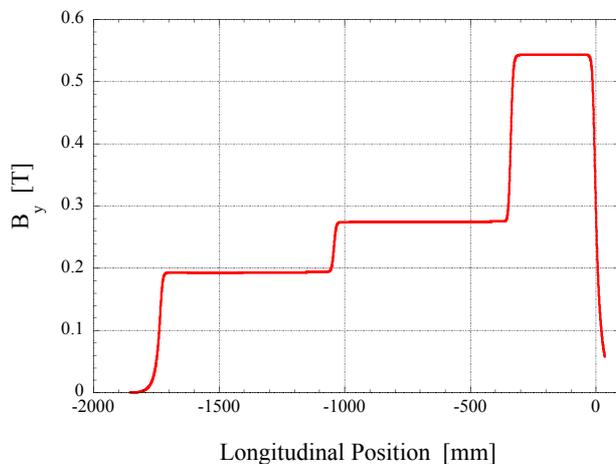


Figure 8: Measured longitudinal magnetic field distribution of LGB-B1.

横方向分布も、Fig. 9 に示すように ± 6 mm の良磁場領域が確保されている。

磁極ギャップの寸法精度は、磁場強度や多極成分のばらつきに影響するが、今回製作した LGB-B1 では、ギャップ長 25mm に対してプラス公差 0.05mm、マイナス公差 0mm が達成できている。

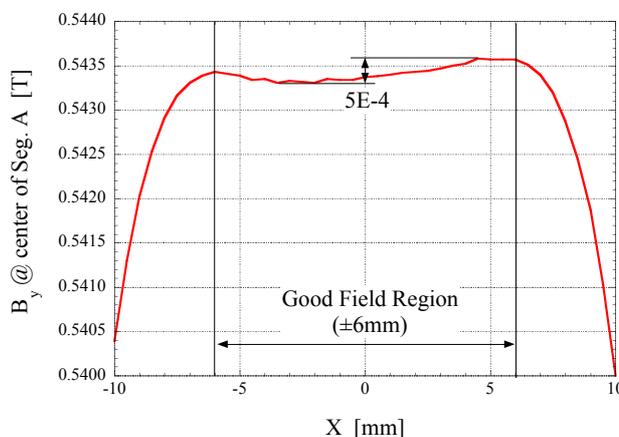


Figure 9: Measured transverse magnetic field distribution of LGB-B1A.

5.3 SPring-8-II 試験ハーフセル設置

今回製作した 2 台の LGB 及び既に製作済みの Normal Bend は、SPring-8-II の試験ハーフセルを構成する多極磁石、モニタ機器、真空チェンバー等の各種コンポーネントとともに SPring-8 実験ホールにおいて設置・アライメントのデモンストレーションや機器取り合いの確認が行われた。(Fig. 10)



Figure 10: Demonstration setup of a test half-cell for SPring-8-II including a normal bend and two LGBs.

PDF/TUP0/TUP070.pdf

6. まとめ

SPring-8 のアップグレード計画である SPring-8-II をはじめとする次世代放射光源用の偏向磁石として、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・開発を進めており、今回、縦方向磁場勾配型偏向磁石（LGB）の実機サイズ機を設計・製作した。階段状磁場分布など LGB 特有の課題についても設計通りの性能が確認されるとともに、架台上への設置やアライメントなど実機設置に向けたデモンストレーションも行われた。一部、磁場調整機構の動作不良が確認されるなど、新たに判明した課題については、今後検討し改善していく予定である。

謝辞

LGB 用水平移動機構付き架台及びセグメント一体化については JASRI 光源基盤部門の安積則義氏に担当いただきました。氏の緻密な設計と熟練の作業により順調に組み立て・設置できましたこと、ここに感謝いたします。

本研究は主に理化学研究所予算による研究成果である。

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 **20**, 072401; <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072401/>
- [5] T. Taniuchi *et al.*, “Status of permanent dipole magnet development for SPring-8-II”, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug 1-3, 2017, p.60; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUOM/TUOM04.pdf/
- [6] T. Aoki *et al.*, “Performance verification of permanent dipole magnet in beam operation of SPring-8 beam injection transport”, WEOM06 in these proceedings.
- [7] S. Takano *et al.*, “Development of Permanent Magnet based DC septum”, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug 1-3, 2017, p.515; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/