

SPring-8-II 蓄積リング用磁石

MAGNETS FOR SPRING-8-II STORAGE RING

深見健司^{#, A, B)}, 青木毅^{B)}, 安積則義^{B)}, 岩下大器^{C)}, 川瀬守弘^{B)}, 近藤力^{A, B)}, 高野史郎^{A, B)}, 田島美典^{B)},
谷内努^{B)}, 西森信行^{C)}, 増田剛正^{B)}, 松原伸一^{B)}, 山口博史^{B)}, 渡部貴宏^{A, B)}
Kenji Fukami^{#, A, B)}, Tsuyoshi Aoki^{B)}, Noriyoshi Azumi^{B)}, Taiki Iwashita^{C)}, Morihiro Kawase^{B)}, Chikara Kondo^{A, B)},
Shiro Takano^{A, B)}, Minori Tajima^{B)}, Tsutomu Taniuchi^{B)}, Nobuyuki Nishimori^{C)}, Takemasa Masuda^{B)},
Shinichi Matsubara^{B)}, Hiroshi Yamaguchi^{B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

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

^{C)} National Institute for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

The storage ring for SPring-8 upgrade, SPring-8-II, composed of a five-bend achromat lattice, is being designed. We apply permanent magnets for most bending magnets to reduce power consumption and avoid downtime due to power supply system failure. This paper describes countermeasure policies against thermal dependence and demagnetization due to the radiation incidence of the permanent magnet. For the electromagnets, we introduce multi-function magnets that generate various magnetic fields simultaneously to secure space for installing other components e.g., beam position monitors, absorbers, etc. Dynamic aperture readily becomes smaller due to a misalignment of the multipole magnets. We aim to ensure installation accuracy using a vibrating wire method on the micrometer order for the multipole magnets. The same design of the multipole magnets and the same alignment scheme have already been applied to NanoTerasu. We report some results in this paper.

1. はじめに

現在、世界中の放射光施設において、回折限界を目指した低エミッタンスリングの設計、建設が盛んに行われており[1-4]、既に放射光の利用がスタートした施設もある[5-9]。これらのリングのエミッタンスは第三世代リングのそれに比べて一桁以上小さい。収束系磁石には従来よりも高い磁場勾配と高い設置精度が要求され、磁石台数も増加傾向にある。SPring-8 においても低エミッタンス化を目指したアップグレード計画、SPring-8-II の設計を行っている。SPring-8-II 蓄積リングは Five-bend achromat で構成される。ここでは、蓄積リングの磁石の設計、及びアライメントスキームについて述べる。

消費電力抑制、電源故障によるダウンタイム解消のため、偏向部の大部分に永久磁石を採用する。永久磁石特有の課題である、1)温度依存性対策、2)放射線による減磁対策、3)磁場調整方法について検討した。偏向部の一部と多極磁石は電磁石とする。多極電磁石の過度なパッキングを避け、ビーム位置モニタ検出ヘッドや放射光吸収体等の他機器設置スペース確保のため、多機能磁石を多数導入する。

直線区間の多極電磁石には、水平、垂直方向位置に関し標準偏差 ± 0.025 mm、この 2 倍をトレランスとする設置精度が要求される。トレランス以内でも、設置誤差が小さくなればなるほどダイナミックアパーチャが広がる。我々はマイクロメーターオーダーの設置精度を目指す。このため、精密設置に Vibrating Wire Method(VWM)を導入する[10]。VWM では磁場中心を検出しながら同時に精密設置を行う。磁場中心位置を一旦外部基準点に写すことなく磁場中心を一直線上に並べるため、目標精度が実現可能である。

[#] fukami@spring8.or.jp

SPring-8-II のために設計してきた電磁石は、今年度放射光供給を開始した NanoTerasu[8] に試験的に適用し、アライメントスキームを実践した。ここでは磁石の設計結果について述べるとともに、アライメント実践により得られた結果についても報告する。

2. 磁石設計

ノーマルセルの上流側半分の磁石配置図を Fig. 1 に示す。セル下流側半分は図中のセル中央で線対称配置であり、対称位置の磁石は同一仕様である。5 台の偏向磁石のうち 4 台はビーム軸方向に磁場勾配を持つ Longitudinal Gradient Bend 部(LGB)と横方向に磁場勾配を持つ偏向-四極複合部(B-Q combined)に分類される。残り 1 台は通常タイプの偏向磁石(NB)である。LGB、NB は全て永久磁石、残りは電磁石とする。四極電磁石(Q)、六極電磁石(SX)はセルあたりそれぞれ 16 台、10 台である。直線区間の多極電磁石は同一の共通架台上に載せる。共通架台はセルあたり 11 台である。高次多極成分補正用として八極電磁石(OC)をセルあたり 4 台用意する。主な仕様を Table 1 に示す。

鉄芯の上面には基準面を用意し、設置の際に水準器を乗せてビーム軸周りの回転(roll)、水平軸周りの回転(pitch)を補正する。基準面にレーザトラック用ターゲット、Spherically Mounted Retroreflector(SMR)の台座を固定し、後述する架台輸送前後の磁石位置の変化の監視等に利用する。直線区間両端の多極電磁石には、固定台座とは別に基準面中央に位置調整可能な台座を設置する。底面と共通架台の間には、三次元の磁石位置調整機構を設置する。位置調整には、従来のボルトナット方式を採用する。

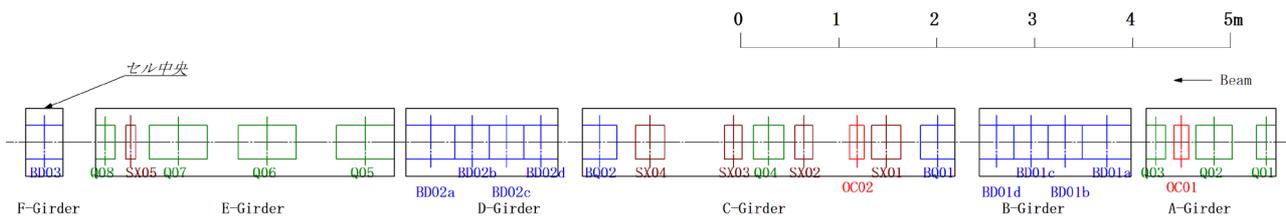


Figure 1: Magnet arrangement of upstream half of SPring-8-II normal cell. Blue boxes indicate bending magnets. BD01~BD02 and BD03 are LGBs and NB, respectively. BQ01~BQ02 indicate dipole-quadrupole combined function magnets. Green, brown, and red boxes indicate quadrupole, sextupole, and octupole magnets, respectively. Black boxes indicate common girders.

Table 1: Major Parameters of SPring-8-II Magnets

Items	LGB	NB	B-Q combined	Q	SX	OC	Steering (in SX)	Steering (in OC)	Skew-Q (in OC)
Number/Cell	4	1	4	16	10	4	6	2	2
Gap or bore diameter	25mm	25mm	44mm	34mm	42mm	50mm			
Maximum field or kick angle	0.62T	0.95T	0.26T 23.8T/m	55T/m	3kT/m ²	100kT/m ³	0.15- 0.45mrad	0.20mrad	0.29T/m
Effective length	1.55m	0.38m	0.35m	0.2-0.65m	0.1-0.3m	0.15m	0.1-0.3m	0.15m	0.15m
Good field region	6mm	6mm	6mm	7mm	7mm				

2.1 偏向永久磁石

ヨーク内に永久磁石を設置し、ビームを通すギャップに二極磁場を発生させる。LGB は 4 つのセグメントに分離し、それぞれ異なる磁場を発生させることでビーム軸方向に 4 段の階段状にする[11,12]。LGB の外観を Fig. 2 に示す。ギャップ寸法は 4 セグメントで同一とし、永久磁石の量を変えることでセグメントごとのギャップ内磁場を変える。セグメント間の磁場干渉を避けて理想的な階段状磁場を発生させるため、磁極先端をノーズ構造とする[11]。

耐放射線性が高いという理由から、永久磁石には $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を採用する。永久磁石とビーム軸との間に鉄製磁極を設置することにより、放射線遮蔽効果を向上させるとともに、磁場均一度を向上させる。NMR プローブを挿入するスロットをリターンヨークに設け、減磁による磁場変化を測定できるようにする。永久磁石の温度依存性を補償するため、鉄芯内に Fe-Ni 合金を設置し、温度変化により増減する磁束を Fe-Ni 合金で短絡させる。合金寸法の最適化により、ギャップ内磁場の温度依存性を $\pm 5 \times 10^{-5} / \text{K}$ 以内に抑制できることを確認した[11,12]。また、鉄芯内に Movable Tuning Plate を設置することで、ギャップ内磁場を最大 10 % 調整可能とする。

2.2 多極電磁石

真空チェンバーとの空間を考慮し、かつ要求磁場勾配を発生させるため、各磁石のボア径を決定した。狭いボア径でも十分広い Good Field Region が得られるよう、磁極両端のシム形状の最適化を行った。メインコイルは全てホローコンダクタを用いて水冷する。消費電力抑制のため、電流密度は 5 A/mm^2 以内に制限した。熱変形抑制のため、冷却水温度上昇は 10 K 以内とした。各セルの同一仕様の B-Q combined、四極、六極、八極電磁石はファミリーとして 1 台の電源にてリング一周分直列励磁

する。四極、六極電磁石は、磁石個体差の補正、ラティス関数の局所補正、及び Beam-based alignment の目的で磁石単体での磁場調整を行う。必要に応じ、磁石個別に補助電源、または外部シャント抵抗を接続し調整する。

六極電磁石のうち SX01, SX04, SX05 にはステアリング磁場を発生させるための補助コイルを設置する。水平、垂直方向に二極磁場を発生させる補助コイルを別々に用意する。空間的に均一な二極磁場を発生させるよう、磁極ごとのターン数の最適化を行った。また、全ての八極電磁石にステアリング磁場を発生させるための補助コイルを設置する。水平、垂直方向に二極磁場を発生させる補助コイルを別々に用意する。磁極ごとに補助コイルの極性を変更することで、ステアリング磁場をスキュー四極磁場に切り替えることが可能である。

B-Q combined は磁場測定やアライメントのしやすさを考慮し、ビームに沿った円弧状ではなく、直線型磁極とする。4 つの磁極で四極磁場を発生させ、水平方向オフセット位置にビームを通すことで、ビームに四極磁場と二極磁場を与える。オフセット位置での四極磁場の均一度を向上させるため、左右非対称の磁極構造とする。

ステアリング磁場の高速設定に対応するため、全ての

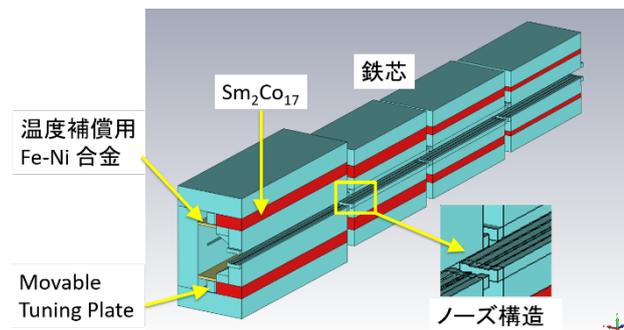


Figure 2: Schematic of LGB.

多極電磁石の鉄芯は、厚さ 0.5 mm の鋼板を積層して形成する。積層鉄芯採用により、寸法精度の向上、生産コストの抑制も期待できる。他機器とのスペースを確保するため、端板は用いず、鋼板の接着と通しボルトのみで固定する。

3. アライメント

3.1 アライメント手順

直線区間の多極電磁石は同じ共通架台に載せる。このため直線区間のアライメントを”On-girder alignment”、偏向磁石を挟んだ 2 直線間のアライメントを”Girder-to-girder alignment”と呼ぶことにする。それぞれのトレランスを Table 2 に示す。

On-girder alignment には VWM を用いる。架台上に磁石を並べた状態で、ビーム軸に沿って張力をかけたワイヤを設置する。ワイヤに一次固有振動数の交流電流を通電することで、磁場との相互作用によりワイヤを強制振動させる。架台上の磁石を 1 台ずつ励磁し、ワイヤの振幅から電磁石個別に磁場中心位置を検出する。直線区間の両端電磁石の磁場中心を結ぶ直線を“基準線”と定義し、両端以外の中間電磁石の磁場中心と基準線との変位が ± 0.005 mm 以内になるよう磁石位置を調整する。調整終了後、両端電磁石については、基準面中央の SMR が磁場中心位置の真上に来よう台座位置を調整し[10]、Girder-to-girder alignment の基準とする。

蓄積リングトンネル外の実験室において、ビニルブース内で On-girder alignment を実施する。共通架台、電磁石の熱膨張を抑制するため、精密空調機を用いてブース内温度を 25 ± 1 °C に制御する。On-girder alignment が完了した共通架台は、電磁石を載せた状態でリングトンネル内へと輸送し、設置する。設置後、トンネル内にてレーザトラックを用いて Girder-to-girder alignment を行う。

Table 2: Alignment Tolerances

Items	x,y	roll, pitch, yaw
On-girder	± 0.05 mm	± 0.1 mrad
Girder-to-girder	± 0.09 mm	± 0.1 mrad

3.2 NanoTerasu でのアライメント実践

NanoTerasu の直線区間の中間電磁石全 160 台について、On-girder alignment 後の基準線からの変位のヒストグラムを Fig. 3 に示す。水平、垂直方向とも ± 0.005 mm 以内に調整できた。従来のボルトナット方式の位置調整機構で、十分調整可能であった。

リングトンネルへの輸送による磁石位置の変化を監視するため、輸送前後の基準面 SMR の三次元座標をレーザトラックで測定した。但し、輸送前後の測定においてトラックの座標系は一致していない。そこで、座標の測定値を用いて、上記の 2 つの座標系間の回転、オフセットを最小二乗法で推定した。座標変換を行い、輸送前後の SMR 座標の変化を求めた。全磁石 800 点の SMR 座標の水平、垂直方向の変化量は概ね ± 0.02 mm の範囲内であった。この測定により On-girder alignment のトレランスを満たすことは確認できた。しかしながら、この測定

値はレーザトラックの誤差を含んでおり、輸送前後の変化量をそのまま示すものではなく、変化量はさらに小さい値であると推定される。

NanoTerasu 蓄積リングのコミッショニング初期段階で、ステアリングを用いることなく電子ビームはリングを 300 周回した[8,13-15]。要因の一つは、この高精度アライメントであると考えている。

4. まとめ

SPring-8-II の磁石を設計し、精密設置のためのアライメントスキームを検討した。NanoTerasu での経験を踏まえ、実機製作に向けた詳細設計を進める。今年度先行セルを製作し、来年度から 2028 年度上半期までの 3.5 年間で量産機を製作予定である。

謝辞

我々の設計した磁石の NanoTerasu への適用、アライメントの実践では、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構に御協力いただき感謝します。

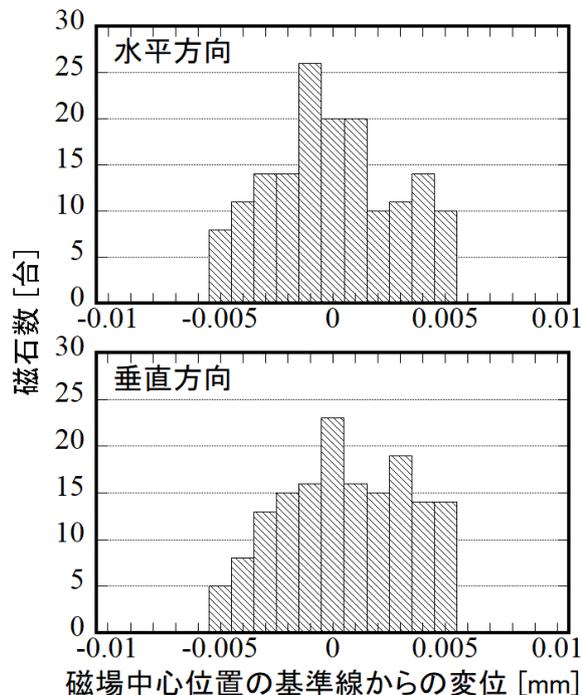


Figure 3: Histograms of the displacements between the reference line and the magnetic centers of 160 aligned magnets in the transverse plane.

本研究開発は理化学研究所による研究費助成を受けたものである。

参考文献

- [1] T. Watanabe and H. Tanaka, “SPring-8 Upgrade Project: Accelerator Redesigned and Restarted” *Synchrotron Radiation News*, Vol.36 (2023) Issue 1, pp.3-6. doi:10.1080/08940886.2023.2186117
- [2] C. Meng *et al.*, “Progress of the HEPS Accelerator Construction and Linac Commissioning”, in *Proc. 67th*

- ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources (FLS2023), Luzern, Switzerland, August 2023, pp.131-134. doi:10.18429/JACoW-FLS2023-TU4P27
- [3] A. Streun *et al.*, “SLS 2.0, The Upgrade of the Swiss Light Source”, in *Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22)*, Bangkok, Thailand, June 2022, pp.925-928. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOST032
- [4] A. Loulergue *et al.*, “CDR Baseline Lattice for the Upgrade of SOLEIL”, in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp.1485-1488. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB054
- [5] P. F. Tavares *et al.*, “Commissioning and First-Year Operational Results of the MAX IV 3 GeV Ring”, *J. Synchrotron Rad.*, 2018, 25, pp.1291-1316. doi:10.1107/S1600577518008111
- [6] J-L. Revol *et al.*, “First Year of Operation of the ESRF-EBS Light Source”, in *Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22)*, Bangkok, Thailand, June 2022, pp.1413-1416. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS009
- [7] L. Liu *et al.*, “Status of SIRIUS Operation with Users”, in *Proc. 14th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'23)*, Venice, Italy, May 2023, pp.2586-2589. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-WEOGA2
- [8] N. Nishimori, “Recent Development and Future Direction of Ring-type Synchrotron Light Source in Japan”, in *Proc. 15th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'24)*, Nashville, USA, May 2024, pp.3939-3943. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-FRYD2
- [9] R. Hettel *et al.*, “Status of the APS-U Project”, in *Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21)*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp.7-12. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOXA02
- [10] K. Fukami *et al.*, “Performance Verification of a Precise Vibrating-Wire Magnet Alignment Technique for Next-Generation Light Sources”, *Rev. Sci. Instrum.* 90, 054703(2019). doi:10.1063/1.5086505
- [11] T. Watanabe *et al.*, “Permanent Magnet Based Dipole Magnets for Next Generation Light Sources”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 20, 072401(2017). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072401
- [12] T. Taniuchi *et al.*, “Dc Septum Magnet Based on Permanent Magnet for Next-Generation Light Sources”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 23, 012401(2020). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.012401
- [13] N. Nishimori *et al.*, “Commissioning of NanoTerasu Accelerator System”, in *Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Funabashi, Japan, August 2023, pp.6-11.
- [14] K. Ueshima *et al.*, “Status of Beam Commissioning at NanoTerasu”, in *Proc. 15th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'24)*, Nashville, USA, May 2024, pp.1320-1323. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUPG40
- [15] S. Obara *et al.*, “A Commissioning of Compact Multi-Bend Achromat Lattice in a new 3-GeV Synchrotron Radiation Facility NanoTerasu”, in preparation for submission.