

SPring-8-II 蓄積リング磁石システム

MAGNET SYSTEM FOR THE SPring-8-II STORAGE RING

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

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

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

Abstract

The SPring-8 upgrade, SPring-8-II, is officially budgeted and is in progress. The SPring-8-II storage ring is composed of a five-bend achromat lattice. We apply permanent magnets to the five bending magnets to reduce power consumption and avoid downtime due to power supply system failure. All quadrupole, sextupole, and octupole magnets, including dipole-quadrupole combined function magnets, are electromagnets but with rather small bore diameters and high excitation currents. The permanent magnets and electromagnets, as well as girders that are also key components, have been designed to meet requirements from the new lattice. We have fabricated prototype magnets and girders, and verified each component design. In addition to the appropriate design of each component, a procedure for the whole assembly, especially precise alignment of the magnets, needs to be carefully developed and verified. Otherwise, the dynamic aperture readily becomes smaller. For that, we developed a vibrating wire method and other assembly procedures for the alignment of the multipole magnets on the micrometer order. This paper reports each magnet and assembly design as well as the current status of the mass production process.

はじめに

回折限界を目指した第4世代光源と呼ばれる低エミッタンスリングの設計、建設が世界的に盛んに行われており、既に放射光の利用がスタートした施設もある[1-8]。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、アップグレード計画、SPring-8-II が進行中である[9]。2027 年度後半～2028 年度前半にシャットダウン期間を設け、この間に蓄積リング内の加速器用機器を一新する。新規蓄積リングは Five-bend achromat で構成される。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した[10]。偏向部の一部と多極磁石は電磁石とした。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した。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。直線区間の多極電磁石は 1 台の共通架台上に搭載し、共通架台上の精密設置には Vibrating Wire Method(VWM)を用いることでマイクロメートルオーダーの設置精度を目指す。多極電磁石の狭いボア径に対応するため、磁場測定には Single Stretched Wire(SSW)を用いる。

全ての磁石、及び共通架台の設計が完了し、ノーマ

ルセル半セル分の主要な磁石と 1 セル分の共通架台を先行製作した。永久磁石先行機を用いて、整磁合金[10]による温度依存性の補償効果、Movable Tuning Plate[10]による磁場調整範囲の確認を行った。多極電磁石先行機を用いて、SSW により主成分、多極成分を測定し、磁場均一度を評価した。今後の量産機の製作工程、磁場測定方法、アライメント手順について示す。

2. 磁石設計

SPring-8-II 蓄積リングのノーマルセル上流側半分の磁石配置図を Fig. 1 に示す[10]。下流側磁石はセル中心で折り返し対称配置になっている。蓄積リングはノーマルセル 34 セルの他、入射部セル 2 セル、長直線部セル 4 セル、長直線部セル上下流のマッチングセル 8 セルの合計 48 セルで構成される。長直線部セルを除き、磁石配置はノーマルセルとほぼ同一である[9]。

5 か所の偏向部のうち 4 か所は、ビーム軸方向に磁場勾配を持つ Longitudinal Gradient Bending magnet(LGB)と横方向に磁場勾配を持つ偏向一四極機能複合磁石(Dipole-Quadrupole combined function magnet, DQ)で構成される。残り 1 か所には通常タイプの偏向磁石(Normal Bending magnet, NB)を設置する。LGB、NB は全て永久磁石、DQ を含めた残りの磁石は電磁石とした。後で示すよう、一部の磁石はステアリング機能も複合させる。ステアリング磁場の高速設定に対応するため、電磁石の鉄芯は、0.5 mm 厚のケイ素鋼板を積層して形成する。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。高次多極成分補正用八極電磁石

[#] fukami@spring8.or.jp

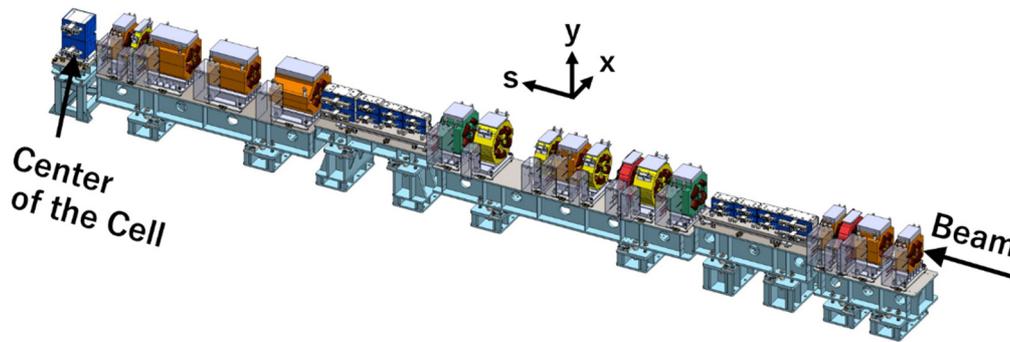


Figure 1: Half of a normal cell of the storage ring. Blue, green, orange, yellow, and red, respectively, indicate permanent dipole, DQ-combined function, quadrupole, sextupole, and octupole magnets.

(OC)をセルあたり 4 台設置する。各磁石の上面にはアライメント用の基準面を用意し、レーザトラッカ用 Spherical Measurement Reflector(SMR)ターゲットの台座を取り付ける。磁石の底部には、磁石位置の調整を行うための調整台を取り付ける。

各セルで線対称位置に配置される電磁石は直列に接続し、さらに全てのノーマルセルで直列に接続して 1 台の電源で励磁する[11]。直線区間の多極電磁石群は同一の共通架台上に載せる。DQ も直線区間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。共通架台の安定した設置、及び振動抑制のため、トンネル床面にセルフレベルング性を有する樹脂床を施工し、架台脚部を樹脂床上に密着させて固定する。樹脂床の平面度は、寸法 1m あたり 0.05 mm 以内である。

ノーマルセルのうち 1 セル分について、LGB2 台、DQ1 台、Q7 台、SX2 台、及び共通架台全数を先行製作し、寸法精度、磁場性能の確認、永久磁石の温度依存性の補償、磁場調整範囲の確認を行った。また、トンネル外の実験室に樹脂床施工をしたうえ、1 セル分の実態配置を行った。実態配置を用いて他機器との干渉、作業性について確認した。量産機の製作を今年度開始し、2028 年度前半までにはすべての磁石、架台が納入される予定である。

2.1 LGB 磁石

ギャップ内磁束密度の異なる 4 セグメントをビーム軸方向に並べて 1 台の LGB を形成し、ギャップ内磁束密度をビーム軸方向に 4 段の階段状に変化させる。各セグメントのギャップ寸法は 25 mm で統一し、永久磁石の体積を変えることでギャップ内磁束密度を変えた[10, 12, 13]。4 セグメントトータルの磁場有効長は 1.55 m とした。最大磁束密度は 0.80 T とした。先行機を用いて、ギャップ内磁束密度をホールプローブで測定した。ビーム軸方向分布の測定例を Fig. 2 に示す[13]。磁極先端に設けたノーズ構造[10]により、磁束密度変化部をスムーズに接続する理想的な階段状磁場を発生させることができた。鉄芯内に設けた Movable Tuning Plate によりギャップ内磁束密度の調整を行った結果、設計値に対し -10% ~ +6% の範囲で変化し、目論見通りの調整範囲を確保できた。永久磁石材として、耐放射線性に優れる $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を選択した。永久磁石材の温度係数は

$-4 \times 10^{-4} / \text{K}$ であるが、鉄芯内に設置した整磁合金により、温度係数を $\pm 5 \times 10^{-5} / \text{K}$ 以内に抑制できた。

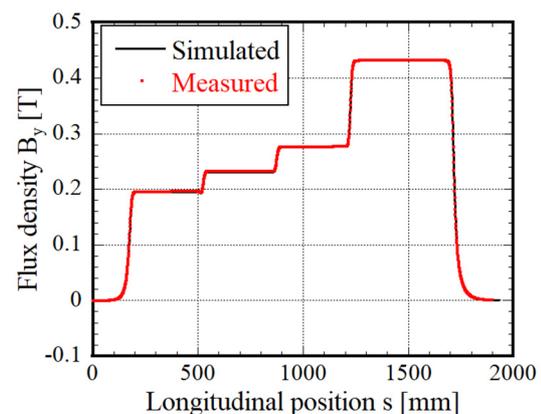


Figure 2: Longitudinal flux density distribution in the gap of LGB. The stepped magnetic field is formed with four segments. Black line and red dot indicate simulated and measured flux densities, respectively.

2.2 偏向一四極機能複合磁石

ビーム軸方向中心での断面形状を Fig. 3 に示す。二極成分に対し、四極成分の割合が比較的高いため[10]、四極状の磁極形状を採用した。四極成分の磁場中心から水平方向にオフセットした位置にビームを通すことにより、ビームに二極成分を与える。ビーム軌道上の四極成分平坦度を確保するため、左右非対称の磁極形状とした。磁場測定、アライメントのしやすさを考慮し、ビーム軸方向は軌道に沿った形状ではなく直線形状とした。

2.3 四極、六極、八極磁石

多極電磁石には、従来の放射光リングに比べて高い磁場勾配が要求されるため、ボア直径寸法を制限した。Q のボア直径は 34 mm、最大磁場勾配は 55 T/m とした。磁場有効長は 0.2~0.65 m とした。SX のボア直径は 42 mm、最大磁場勾配は 3 kT/m² とした。磁場有効長は 0.1~0.3 m とした。OC のボア直径は 50 mm、最大磁場勾配は 100 kT/m³ とした。磁場有効長は 0.15 m とした。

過度なパッキングを避けるため、単独のステアリング磁石は設置しない。代わりに SX、OC にステアリング磁場も同時に発生させる機能を持たせるため、主成分磁場発

生用のコイルとは別に補助コイルを設置した。さらに OC は補助コイルの接続を変更することにより、スキュー四極成分を発生させることを可能にした。

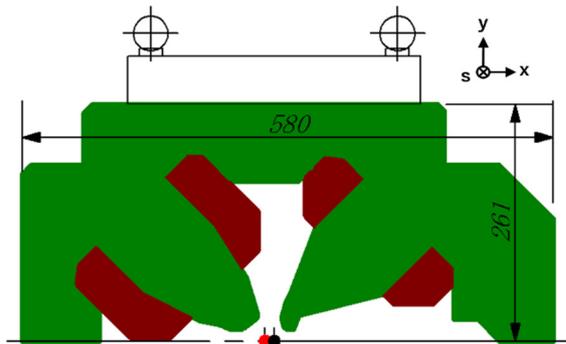


Figure 3: Typical cross-section of the upper half of the dipole-quadrupole combined function magnet. Green and brown indicate yoke and coil, respectively. Red and black dots indicate beam orbit and magnetic center positions, respectively. Two open circles indicate SMR targets for a laser tracker system.

2.4 積分磁場勾配の個体差、多極成分の測定

Q、SX、OC、及び DQ の狭いボア内の磁場分布は SSW を用いて測定する[14]。SSW 装置の写真を Fig. 4 に示す。磁場測定対象の電磁石のボア内に、ビーム軸に沿って張力をかけたワイヤを設置する。電磁石を励磁し磁場中でワイヤを移動させることにより、軸方向に沿った積分磁束密度に比例した誘導起電力をワイヤ両端に発生させる。積分磁束密度のトランスバース平面内分布を測定し、積分磁場勾配、励磁特性、多極成分を評価する。今後、量産機全数について測定を行い、同一ファミリ中の積分磁場勾配の個体差が $\pm 0.4\%$ 以内であることを確認する。Q については、必要に応じて補助電源により個体差を補償する[11]。多極成分の測定結果をもとに、Good Field Region 内の磁場均一度が $\pm 0.1\%$ 以内であることを確認する。

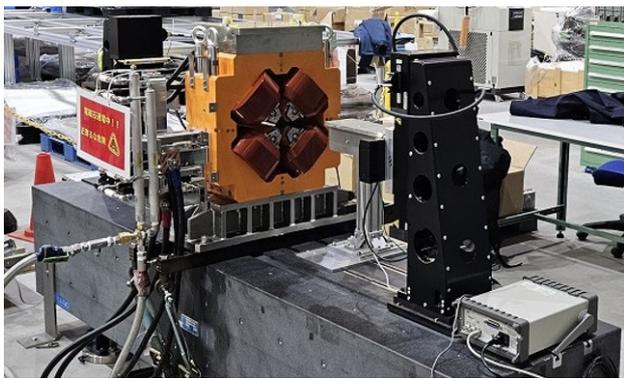


Figure 4: Photograph of SSW. A Ti-Al wire with a diameter of 0.2 mm is stretched along the longitudinal axis with a tension of 2 kgf. The wire is moved with stepper motors placed on the pillars at both ends. These pillars and the magnet are fixed on a granite table.

3. アライメント

直線区間の多極電磁石は同じ共通架台上に載せる。このため直線区間のアライメントを”On-girder alignment”と呼ぶ。これに対し、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。トランスバース平面内でのアライメントトレランスは、On-girder alignment で ± 0.05 mm、Girder-to-girder alignment で ± 0.09 mm である[10]。ダイナミックアパーチャを極力広げるため、On-girder alignment の設置誤差の目標値を ± 0.01 mm 以内とした。尚、八極電磁石は On-girder alignment の対象外とし、Girder-to-girder alignment の精度で設置する。

On-girder alignment は、蓄積リングトンネル外の実験室に設けた空調ブース内で VWM を用いて行う[10, 15]。共通架台、電磁石の熱変形を抑制するため、精密空調機を用いてブース内温度を $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御する。典型的直線区間をアライメント対象とした場合について、VWM の概略図、および測定回路ブロック図を Fig. 5 に示す。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位置を基準線上に一致させるよう中間電磁石の位置を調整する。

DQ のアライメントにも VWM を適用する。DQ は、隣接する直線部多極電磁石と同じ共通架台上に設置される。DQ の磁場中心軸は、隣接する直線部多極電磁石で定義させる基準線に対し水平方向にオフセットさせ、かつ偏向角の 1/2 だけ傾ける。DQ の磁場仕様は 2 種類あり、磁石中心におけるオフセットは、それぞれ 9.55 mm、11.10 mm である。傾きは、それぞれ 2.03 mrad、2.26 mrad である。直線部多極電磁石のアライメント終了後、ワイヤをオフセット位置に移動させたいえ、ワイヤ位置と DQ の磁場中心位置が一致するよう磁石位置を調整する。

On-girder alignment の対象となるのは、ノーマルセル、マッチングセル、入射部セルではセル当たり 6 架台、長直線部セルではセル当たり 4 架台の合計 280 架台である。空調ブース、および VWM 機器を 4 セット用意し、並行してアライメントを行う。1 週間に 2 セルのペースで 2026/7~2028/6 の 2 年間で完了させる。

VWM による On-girder alignment は、既に NanoTerasu の磁石列において実績があり、中間電磁石の磁場中心と基準線との変位は、全て ± 0.005 mm 以内に調整することができた[10]。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。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、輸送前後にレーザトラックで各磁石の SMR ターゲットの三次元座標を測定する。NanoTerasu でも同じ測定を行い、輸送前後の磁石位置の変化は概ね ± 0.02 mm 以内であった[10]。設置後、トンネル内にてレーザトラックを用いて、偏向部とともに Girder-to-girder alignment を行う。

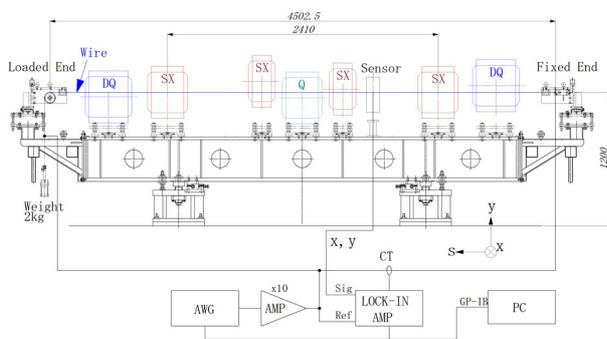


Figure 5: Typical layout of VWM. A Be-Cu wire with a diameter of 0.2 mm is stretched along the longitudinal axis with a tension of 2 kgf. Both wire ends are placed on x-y stages to scan the wire position. The bottom of the figure shows a block diagram of the wire vibration measurement.

まとめ

SPring-8-IIの蓄積リング用磁石の仕様を決定し、先行セルを構築した。今後量産機の製作を進め、精密設置を含めて加速器建設は2028年末まで行い、2029年初頭からビームコミッションを開始する予定である。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] K. Fukami *et al.*, “Magnets for SPring-8-II Storage Ring”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), July 31-August 3, Yamagata, Japan, 2024, pp. 975-978.
- [11] C. Kondo *et al.*, “Magnet Power Supply System for SPring-8-II”, The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, August 6-8, this meeting.
- [12] 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
- [13] T. Taniuchi *et al.*, “Fabrication of Permanent-Magnet-Based Longitudinal Gradient Bending Magnets for SPring-8-II”, The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, August 6-8, this meeting.
- [14] G. Le Bec *et al.*, “Stretched Wire Measurement of Multipole Accelerator Magnets”, Phys. Rev. Accel. Beams, 15, 022401(2012). doi:10.1103/PhysRevSTAB.15.022401
- [15] 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