

## SPring-8-II 縦勾配型偏向永久磁石の製作

### FABRICATION OF PERMANENT-MAGNET-BASED LONGITUDINAL GRADIENT BEND FOR SPring-8-II

谷内努<sup>#, A)</sup>, 青木毅<sup>A)</sup>, 安積則義<sup>A)</sup>, 川瀬守弘<sup>A)</sup>, 近藤力<sup>A, B)</sup>, 高野史郎<sup>A, B)</sup>, 田島美典<sup>A)</sup>, 藤田貴弘<sup>A)</sup>,  
増田剛正<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>A)</sup>, 山口博史<sup>A)</sup>, 深見健司<sup>A, B)</sup>, 渡部貴宏<sup>A, B)</sup>

Tsutomu Taniuchi<sup>#, A)</sup>, Tsuyoshi Aoki<sup>A)</sup>, Noriyoshi Azumi<sup>A)</sup>, Morihiko Kawase<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>A, B)</sup>,  
Shiro Takano<sup>A, B)</sup>, Minori Tajima<sup>A)</sup>, Takahiro, Fujita<sup>A)</sup>, Takemasa Masuda<sup>A)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>A)</sup>,  
Hiroshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Kenji Fukami<sup>A, B)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>B)</sup> RIKEN SPring-8 Center (RSC)

#### Abstract

SPring-8-II is an ultra-low emittance ring featuring a five-bend achromat lattice, with user operation scheduled to commence in 2029. Each normal cell contains five permanent bending magnets: four longitudinal gradient bends (LGBs) and one central standard bend. A total of 218 of these magnets are to be installed in the 1.4 km-circumference ring. Prior to mass production of the accelerator components, a prototype representing approximately half a cell has been fabricated to validate the design specifications, component integration, and performance. This prototype, which comprises magnets, vacuum components, beam monitors, and girders, serves as a crucial step in evaluating the overall system. This paper reports on the design, fabrication, and magnetic field adjustment of the LGBs for the prototype cell.

#### 1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 のアップグレードである SPring-8-II[1] (ビームエネルギー 6 GeV) は、5 bend achromat ラティス[2] (Fig. 1) によりエミッタンス 100 pmrad 以下を目指す光源性能の向上に加え、偏向永久磁石の採用や既に実現されている SACLA との入射器の共通化[3]などによる施設の省エネルギー化をコンセプトとしたプロジェクトである。2029 年からのユーザー運転を目指して 2025 年度から本格的に各種加速器コンポーネントの量産がスタートしている。

め、2024 年度に先行セルが製作された。本報告では、先行セルの一部として製作され量産第 1 号となる偏向永久磁石の設計・製作および今後の量産や設置の方針について述べる。

#### 2. SPring-8-II 偏向永久磁石の概要

1 セル内に配置される偏向永久磁石は、ビーム方向に階段状の磁場勾配を有する Longitudinal Gradient Bend (LGB) 4 台とセル中心に設置される Normal Bend (NB) 1 台である。Table 1 に偏向永久磁石のパラメータを、Fig. 2 に LGB の形状を示す。

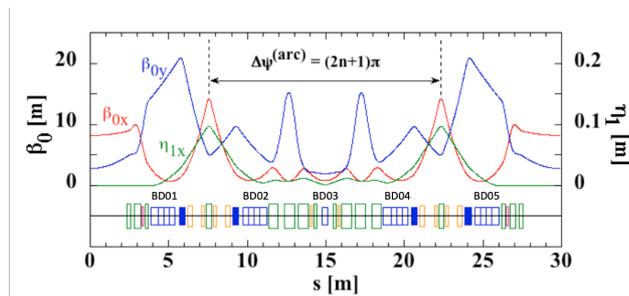


Figure 1: The optics and magnet arrangement of a unit cell. The open squares represent bending (blue), quadrupole (green), sextupole (orange) and octupole (red) magnets, respectively. Blue filled squares indicate combined-function dipole quadrupole magnets.

量産に先行して、磁石[4]・真空チェンバー・モニタ・架台等の主要機器について基本性能の確認や製造工程の確立、設置状態での周辺機器との干渉確認を行うた

Table 1: Parameters of Bending Permanent Magnet

	BD01a,b,c,d	0.431/0.275/0.231/0.195
Magnetic flux density at pole gap [T]	(BD05d,c,b,a)	(0.195/0.231/0.275/0.431)
	BD02d,c,b,a	0.237/0.280/0.360/0.615
	(BD04a,b,c,d)	(0.615/0.360/0.280/0.237)
	BD03	0.953
Effective length [m]	BD01a,b,c,d	0.500/0.350/0.350/0.350
	(BD05d,c,b,a)	(0.350/0.350/0.350/0.500)
	BD02d,c,b,a	0.350/0.350/0.350/0.500
	(BD04a,b,c,d)	(0.500/0.350/0.350/0.350)
	BD03	0.380
Pole gap height [mm]		25
Pole width [mm]		35
Permanent magnet		Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>

# ihcuinat@spring8.or.jp

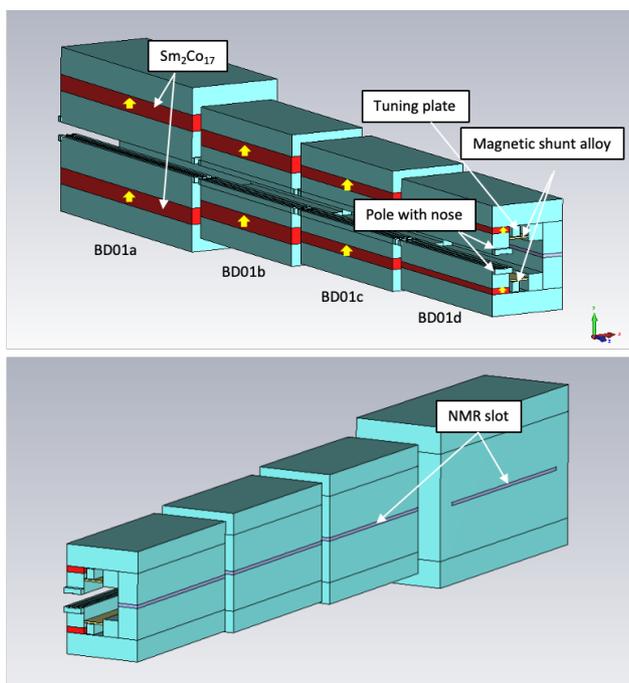


Figure 2: Schematic view of LGB. Yellow arrows show magnetization direction of permanent magnet.

LGBは磁束密度の異なる4つのセグメントで構成されており、磁束密度が大きい順にセグメントa, b, c, dとしており、磁極ギャップ間隔と磁極幅は真空チェンバーとのクリアランス(1.5 mm)および磁場平坦度が $\pm 10^{-3}$ 以下の良磁場領域(水平 $\pm 6$  mm)を確保しつつ、使用する永久磁石量が少なくなるよう設計した。磁石設計に使用した電磁場解析コードはCST Studio Suite [5]である。

永久磁石材はネオジム磁石(NdFeB)よりも耐放射線性能の高いサマリウムコバルト磁石( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ )を採用した。永久磁石の寸法設計においては、放射線減磁に対する耐性を考慮し、磁化方向の厚みを薄く(パーミアンス係数を小さく)し過ぎないように留意した。さらに、初期減磁を低減するため、熱枯らし処理(-1%程度の熱減磁処理)を行なっている。

偏向磁石の磁気回路には、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ の温度係数を打ち消すため、整磁合金による温度補償回路が組み込まれている。また、製造時の磁場調整および放射線減磁が起きた場合に磁場強度を回復できる磁場調整機構を備えている。

永久磁石はその種類によって差はあるが、製造直後の減磁や放射線環境下での減磁が起こる。放射線減磁等によるギャップ磁場の経時変化を精密に測定するためにはNMR磁場測定器を使用する必要があるが、真空チェンバーと磁極の隙間は小さく、NMRプローブを挿入するスペースはない。そこで、リターンヨーク側にNMRプローブを挿入するためのNMRスロットを設け、あらかじめギャップとスロット磁場の関係を測定しておくことで、ギャップ磁場の変化を追跡できるようにしている。

LGBのセグメント間距離が大きすぎると、セグメント間隙に磁場の落ち込みが発生する一方、距離が小さすぎるとクロストークにより両者の磁場強度差が小さくなり、

必要な磁場勾配が得られなくなる。そこで、クロストークを最小限に抑えつつ、セグメント間で磁場の落ち込みが来ないように、磁極端部を部分的に突き出す構造(ノーズ構造)を設けている。なお、ノーズ先端は各セグメントの偏向角の1/2にカットされており、準セクター型偏向磁石となっている。

### 3. 先行セル LGB 設計・製作

先行セルの偏向磁石として、1セル内5台の偏向永久磁石のうち2台のLGB(BD04, BD05)が製作された。

設計においては、ギャップ磁場(良磁場領域、高次磁場成分)、整磁合金による温度特性補償、可動プレートによる磁場調整範囲、磁場強度モニター用NMRスロットなどの磁気回路設計に加えて、ノーズ先端角度、ビーム軌道に沿ったセグメント配置、架台との取り合いなどの構造設計、磁性工具の吸着を防ぐ安全対策などを行なった。

#### 3.1 温度補償回路温度係数調整

採用した $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁石(トーキン社LM-32SH)の残留磁束密度温度係数は $-4 \times 10^{-4} / \text{K}$ であるが、加速器運転中の収納部内温度差、加速器立ち上げ時の過渡的な温度変化、運転停止中の大きな室温変動がNMRスロット磁場測定に与える影響などを最小限にするため、整磁合金を用いた温度補償回路[6]を組み込み、 $\pm 5 \times 10^{-5} / \text{K}$ 以内に調整した。先行セル用LGBで使用した整磁合金は、すでに入手済みであったプロテリアル社MS-2であるが、量産偏向磁石では比較的入手性の良いVacuumschmelze社Thermoflux 65/100Gを採用している。

温度係数の調整は、磁気回路に挿入する1 mm厚の整磁合金をシミュレーションにより予測された最適枚数の周辺で変えながら温度係数を測定し、係数が最小となる枚数を決定した。温度係数はLGBのセグメント毎に調整する必要があるため、セグメント単体を温調ブース内に設置し、加速器収納部の室温 $28 \pm 3$  °Cである25, 28, 31 °Cにおけるギャップ磁場強度をNMRにて測定して温度係数を算出した。Figure 3にLGB-BD05の温度係数調整結果を示す。

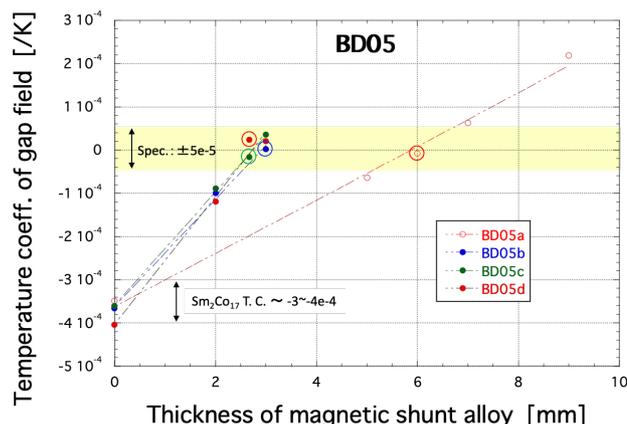


Figure 3: Temperature coefficient tuning of BD05. Large open circles show the optimum thickness of magnetic shunt alloy MS-2. Yellow band shows the range of specification.

セグメント a~d とともに、整磁合金 0 枚(未導入)では  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  の温度係数に近い  $-4 \times 10^{-4} / \text{K}$  となっており、整磁合金枚数を増やすと係数は正方向へ変化する。この方法で 4 セグメントすべて  $\pm 5 \times 10^{-5} / \text{K}$  以内に調整することができた。なお、セグメント a, c で最適枚数が整数となっていないのは、1/3 幅の整磁合金を 2 枚導入したためである。

### 3.2 磁場調整機構

磁気回路内部に組み込まれた磁場調整機構は、LGB 製作の最終段階で行われるギャップ磁場調整や、長期運用後に放射線による減磁等が生じた場合にギャップ磁場を回復させるため使用される。リターンヨーク側(リング内周通路側)に取り付けられた送りネジを手動で回転させると、可動軸に取り付けられた厚さ 15~20 mm の鉄(SS400)製シャントプレートと永久磁石ブロックとの距離が変化する。これにより鉄プレートへのシャント磁束量を変化させることで、ギャップ磁場強度を調整することができる。磁場調整可能範囲は、製造時の個体差調整および放射線減磁を考慮して、運転磁場強度から  $\pm 5\%$  以上になるよう設計した。Figure 4 に磁場調整機構の調整可能範囲測定の実例を示す。

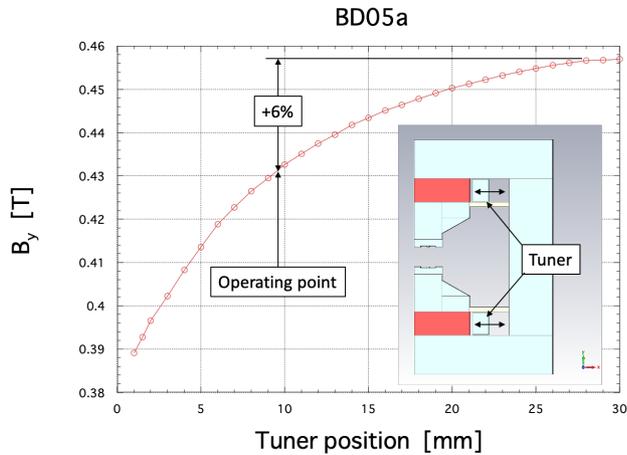


Figure 4: Response curve of magnetic field with respect to the position of tuning plate for LGB-BD05a segment.

### 3.3 磁場モニター用 NMR スロット

第 2 章で述べたように、SPring-8-II 蓄積リング運用開始後に永久磁石の放射線減磁の有無を測定精度の高い NMR 磁場測定器で定期的に測定するため、リターンヨーク側に磁場モニター用のスロット(高さ 6 mm)を設け、ここに厚み 5 mm の NMR プローブを挿入して磁場測定できるようにした。スロット内の磁場強度は NMR で測定可能な 0.1 T 以上になるよう設計した。ギャップ磁場とスロット磁場の関係をあらかじめ測定しておくことにより、スロット磁場をギャップ磁場に換算することができる。Figure 5 にギャップ磁場とスロット磁場の関係データの例を示す。

NMR プローブはスロット内の均一磁場領域 ( $10^4$  以下) に設置する必要があるが、均一(最大)磁場領域は隣接セグメントとのクロストークによりセグメント中心からオフセットした場所となるため、計算で求められた均一(最大)磁場位置にプローブを挿入するための位置決め治具を取り付けている。

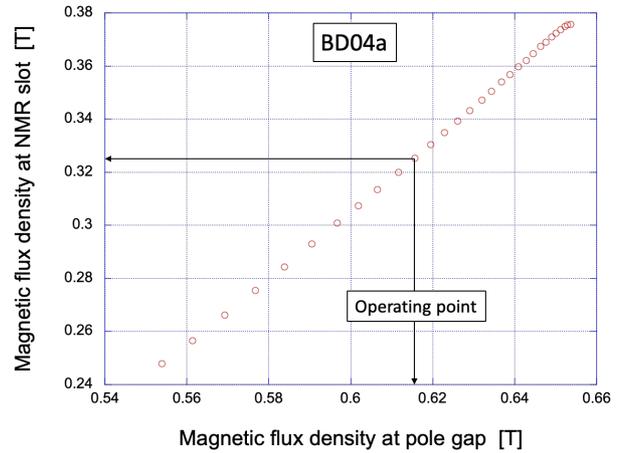


Figure 5: Relationship between magnetic flux densities at pole gap and NMR slot for BD04a.

### 3.4 BL 積調整

磁気回路の温度係数調整が完了してギャップ磁場が運転磁場付近に設定された各セグメントを共通プレート上に搭載した(Fig. 6)。



Figure 6: LGB-BD05 mounted on girder. Gap side view (top) and return yoke side view with magnetic field tuner and slide mechanism for vacuum chamber installation (bottom).

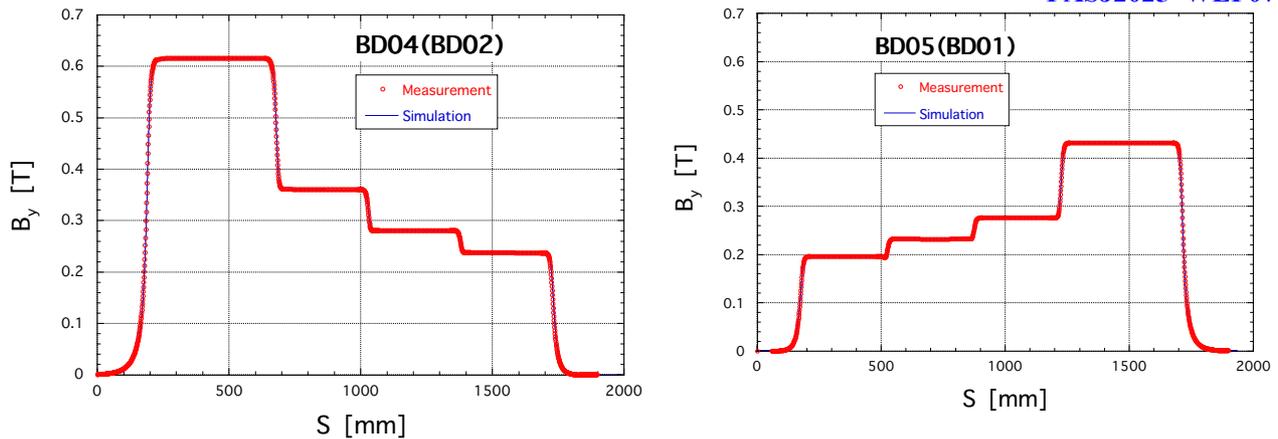


Figure 7: Longitudinal distribution of magnetic flux density  $B_y$ . Left: BD04 (reverse of BD02). Right: BD05 (reverse of BD01).

各セグメントをクレーンで共通プレートに搭載する際はセグメントの位置関係によって吸引、反発力が生じるので、セグメント間に樹脂板などを入れてセグメント同士が近づきすぎないように注意した。

共通プレート搭載後はセグメント間のクロストークによりセグメント単体時とはギャップ磁場が変化するため、この段階で各セグメントのギャップ磁場を精密に運転磁場に調整し、ビーム軌道に沿った磁場分布をホールプローブ (Lakeshore F710) により測定した。測定データから積分磁場 (BL 積) を算出し、BL 積仕様値 $\pm 0.1\%$ 以内になるよう測定と磁場調整を数回行った。なお、ホール素子の測定精度は BL 積調整に必要な精度 $\pm 0.1\%$ 以内を満たさないため、同一電磁石で NMR と共に同時に磁場測定して校正した。2 台の LGB (BD04, BD05) について、BL 積調整後のビーム軌道上磁場分布を Fig. 7 に示す。

### 3.5 偏向永久磁石退避機構

真空チャンバーを磁石内に設置する時、電磁石の場合は上下半割して設置することができるが、偏向永久磁石の場合は半割面に働く吸引磁力が常に存在するため、半割することは容易ではない。形状を H 型ではなく C 型とすることで、水平方向から真空チャンバーを入れることも可能であるが、放射光アブソーバなどが組み込まれた複雑な形状の真空チャンバーを水平方向から設置することは困難である。そこで、真空チャンバー設置時には偏向永久磁石 (LGB の場合は 4 セグメントが搭載された共通プレート) を水平方向 (内周通路側) へ 200 mm 移動できるような位置調整機構 (Fig. 6) を磁気回路と架台の間に追加した。真空チャンバー設置後に退避位置から正規位置 (ビーム位置) へ戻したときの位置再現性は  $\pm 0.03$  mm 以内であった。

## 4. 量産

### 4.1 設計

先行セルの 2 台の LGB で確認された性能、確立された生産工程に基づき、2025 年度から先行セルと同型機 (鏡対称構造 LGB を含む) のノーマルセル LGB の製作と、新規製作となる NB および入射部用 LGB の設計・製作が開始されている。

ノーマルセル用 LGB は先行セルで製作した BD04,

BD05 及びそれらと鏡対称構造となる BD01, BD02 である。NB はギャップ磁場が 0.953 T と偏向磁石中で磁束密度が最も大きな磁石であるので、磁極端部 (ノーズ部) での磁気飽和を低減するためにノーズ部の厚みを LGB の 10 mm から 50 mm に増やしている。

入射部の偏向磁石は入射点の上流・下流セルにそれぞれ LGB が 3 台、NB が 1 台設置される。NB はノーマルセルと同じであるが、LGB の磁場分布はノーマルセルと異なる設計となっている。NB 形状を Fig. 8 に、入射部用 LGB のパラメータを Table 2 に示す。

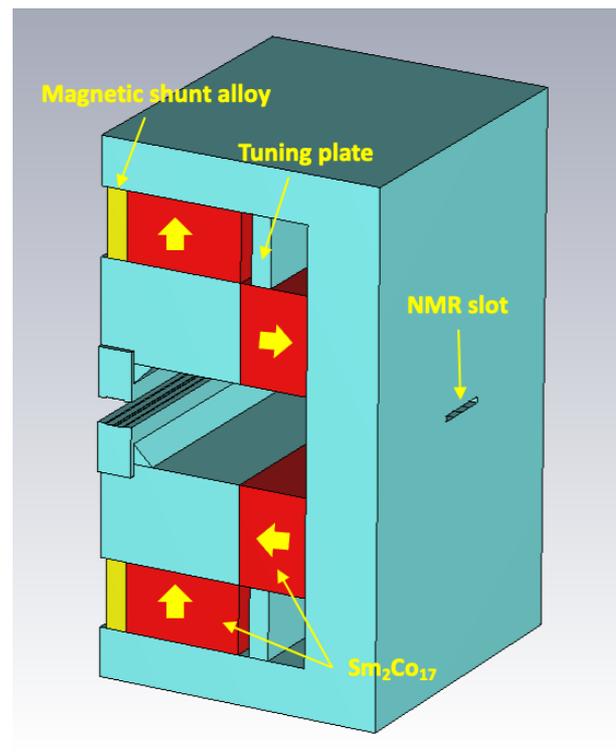


Figure 8: Schematic view of Normal Bend (NB).

BDINJ04 の磁場は最大 0.803 T から最小 0.146 T となっており、全 LGB 中で最も磁場勾配が大きい。なお、SPring-8-II で設置される偏向永久磁石としては、これら蓄積リング用の他、入射部に設置される DC セパタ磁石 [7] も永久磁石となる。

Table 2: Parameters of Bending Permanent Magnet at Injection Section

Magnetic flux density at pole gap [T]	BDINJ01a,b,c,d	0.378/0.283/0.251/0.227
	BDINJ02d,c,b,a	0.192/0.250/0.338/0.623
	BDINJ04a,b,c,d	0.803/0.414/0.306/0.146
Effective length [m]	BDINJ01a,b,c,d	0.500/0.350/0.350/0.350
	BDINJ02d,c,b,a	0.350/0.350/0.350/0.500
	BDINJ04a,b,c,d	0.500/0.350/0.350/0.350
Pole gap height [mm]		25
Pole width [mm]		35
Permanent magnet		Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>

偏向永久磁石周辺にはコールドカソードゲージやイオンポンプなど磁性体を含む真空機器が設置される。また、真空チェンバーの溶接部も透磁率がやや大きくなる。それらの影響についてもシミュレーションによる評価を行い、BL 積の変化が磁石 BL 積仕様(±0.1 %以下)であることを確認している。

#### 4.2 製作

総数 281 台の偏向永久磁石は約 2 年半をかけて製作される。メーカーでの組み立て、検査および磁場測定完了後、逐次 SPring-8 サイトへ輸送される。旧 1 GeV 線型加速器棟に納入された偏向永久磁石は架台天板上に搭載され、2027 年からの設置に向けて保管される。

#### 4.3 設置

2027 年夏より現蓄積リングの機器搬出が開始され、引き続き新加速器設置が行われる予定である。磁石システムは共通架台上に設置された状態で加速器収納部に搬入・設置される。磁石設置後には偏向永久磁石周辺で真空機器設置や配線・配管作業などが行われるため、磁性工具等の吸着事故を防止することが重要である。前述した退避機構により偏向永久磁石を正規位置から 200 mm 程度退避させて真空チェンバーの設置作業を行うが、磁石端面に 25 mm 厚程度の緩衝材を取り付けて、強磁場が発生している磁極に磁性工具等が接近し

ないように対策する予定である。

## 5. まとめ

SPring-8-II 蓄積リングに導入される偏向永久磁石は開発段階から量産段階へと入っている。先行セル製作によって基本性能や周辺機器との取り合いが確認されており、そこで得られた知見をもとに 2027 年からの設置を目指して量産を進めていく。また、製作台数の少ない入射部磁石等についても順次設計・製作を行なっていく。

## 謝辞

先行セル偏向永久磁石の製作にあたり、(株)トーキンの皆様には多大なご協力をいただきました。ここに感謝いたします。

## 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] K. Soutome *et al.*, “Update of lattice design of the SPring-8-II storage ring towards 50 pmrad”, Proc. IPAC’22, Bangkok, Thailand, pp. 477-480. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOTK017
- [3] T. Hara *et al.*, “Low-emittance beam injection for a synchrotron radiation source using an X-ray free-electron laser linear accelerator”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 24, 110702 (2021). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.24.110702
- [4] K. Fukami *et al.*, “Magnet system for the SPring-8-II storage ring”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRO605, this meeting.
- [5] Dassault Systèmes., CST Studio Suite®; <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [6] 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
- [7] 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