

永久磁石ベース偏向磁石の SPring-8 入射輸送ラインでの実ビーム性能検証

PERFORMANCE VERIFICATION OF PERMANENT DIPOLE MAGNET IN BEAM OPERATION OF SPRING-8 BEAM INJECTION TRANSPORT

青木毅^{#, A)}, 谷内努^{A)}, 柳田謙一^{A)}, 松原伸一^{A)}, 高野史郎^{A, B)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)}

Tsuyoshi Aoki^{#, A)}, Tsutomu Taniuchi^{A)}, Kenichi Yanagida^{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

Permanent magnet based dipole magnet is one of promising developments for future accelerators, which would not require power supply and cooling system and have other advantages. On the other hand, there are concerns peculiar to permanent magnet such as deviations in magnetic field due to ambient temperature change and demagnetization with radiation. We have been developing the permanent magnet based dipole magnets for the SPring-8 future plan and other future accelerators. After several-year proof-of-principle tests, we fabricated a 2-meter-long permanent dipole magnet and installed it to the beam transport of SPring-8 for verifying the performance using the actual beam. In this paper, we report on our experiences with the designing, fabrications, and the beam test of the permanent dipole magnet.

1. はじめに

低エミッタンスを追求しマルチベンド化が進む高輝度リング型光源をはじめ次世代加速器の開発において、偏向磁石の永久磁石化は、電源や冷却系設備を不要とし電力消費削減、故障頻度低減、振動抑制によるビーム安定化等多くのメリットを生む重要な要素技術となる。我々は SPring-8 次期計画をはじめとする次世代加速器に向けた永久磁石ベース偏向磁石の開発[1, 2]として Normal Bend、Longitudinal Gradient Bend (LGB)、さらに次世代リング型光源のビーム入射に用いるための永久磁石型 DC セプトの試作を行ってきた[3-6]。これらの開発の成果の集大成となる実使用環境下での性能実証機として、SPring-8 のブースターシンクロトロンから蓄積リングへのビーム輸送ライン(SSBT)に用いる偏向磁石を開発し、蓄積リングへのビーム入射部に設置して実ビーム運用を開始した。永久磁石に特有の課題である、環境温度変化による磁場変動、近接する機器の漏洩磁場との干渉、経時的あるいは放射線照射による減磁等に関して、これまで行ってきた原理実証試験を踏まえ、本偏向磁石を蓄積リング本体と同一の環境下で実運用することで性能を実証する。本論文では、SPring-8 蓄積リングの入射ビーム輸送ラインで実運用を開始した永久磁石ベースの偏向磁石について、設計・製作、磁場測定による性能評価、実ビーム運転からの経験について報告する。

2. 開発仕様

2.1 交換する偏向磁石の選択

本偏向磁石の設置場所は、実験ユーザーが存在する

蓄積リングの偏向磁石として設置した場合に発生する可能性のある光軸のドリフトというリスクを避けるために、蓄積リングと同一のトンネル内にある SSBT の蓄積リング入射部とした。SSBT では 13 台の偏向電磁石を用いており、その最下流に位置する偏向電磁石 BM5 (以下 BM5 と略す) は磁場強度 1.12T、磁場有効長 2060mm、偏向角は約 5 度、H 型断面 Rectangular 形状であり、出力電力は約 4.6kW である。この BM5 は蓄積リングのビーム周回軌道から約 2000mm しか離れていないビーム入射軌道に設置されているため蓄積リングと同一の環境下にあると見なすことができる。

BM5 下流では蓄積リングへのビーム入射軌道をフィードバック補正するステアリング電磁石が水平、垂直共に 2 台ずつ稼働しているため、もし万一 BM5 に減磁等によるゆるやかなドリフトが生じた場合でも蓄積リングへの正常なビーム入射が継続可能である。さらに BM5 はトンネル入口に近く通路側の作業スペースが広いので交換作業が容易であり、磁場、環境温度などのデータ伝送用ケーブルの敷設も容易であるという利点がある。以上の理由により BM5 を交換対象として選択した。

2.2 主な仕様

新規偏向磁石を製作するための仕様を Table 1 に示す。旧 BM5 と区別するため、以降は新規磁石を Permanent magnet BM5 (PM-BM5) と表記する。BL 積の設計値は実運用してきた旧 BM5 と同一の偏向角度を与える値とした。永久磁石ベースとするメリットを評価する上では製作費用も重要な評価項目であり、コスト削減のために BM5 からの仕様変更を行った。これまでのビーム運転の経験より BM5 を通過するビームサイズ (水平: 9mm、垂直: 0.9mm、何れも 6σ) とビーム位置は年間を通じてほとんど変動しないため、現状より狭い磁石の開口

[#] aoki@spring8.or.jp

部としても問題は無いと判断した。ギャップ間隔と Good Field Region (GFR) を狭くし、さらに磁極部を Sector 型とすることでヨークの鉄材と永久磁石使用量を抑えるようにした。磁場調整機構については、故障によるユーザー運転中断のリスクを避けるため、我々が提案・実証してきた Outer plate 等 [1-6]の採用は見送った。初期磁場調整は磁石内部に設けたシャントバーを用い、in-situ の磁場調整は磁石下流側にステアリング電磁石を増設して旧電磁石との偏向角のずれを補償する方針とした。磁場の温度係数はこれまでに開発した偏向磁石試作機で達成している値とした。

Table 1: Specifications of Permanent Dipole Magnet for PM-BM5

BL Product [Tm]	2.31
Gap [mm]	17 (old: 26)
Good Field Region [mm]	± 12 (old: ± 38)
Field error	$< 1 \times 10^{-3}$
Temp. coefficient [1/K]	$< \pm 5 \times 10^{-5}$

3. 磁石の特徴

3.1 4 セグメントの分割構造

SPring-8 の次期計画である SPring-8-II では 6GeV のエネルギーでの運転を想定しているため、現状の 8GeV 運転から迅速に切り替えられるよう 4 つに分割したセグメントを連結する構造とした。1 つのセグメントを取り外し、3 つのセグメントを再配置することにより 6GeV 運転に対応する。磁石断面が C 型であるため、真空ダクトを取り外すことなく 3 セグメントへの移行が可能である。3 セグメント化によるビーム軌道の変化については、その前後の偏向角を調整して補償する。

3.2 2 種類の永久磁石を採用

本偏向磁石を実運用する目的の一つは放射線照射による永久磁石の減磁の評価である。以下の 2 種類の永久磁石を使用し、それぞれの特性を比較可能とした。

- ネオジム系: NMX-33UH
- サマコバ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 系: LM-32SH

一般的にサマコバ系が温度特性に優れており磁力の温度低下率がネオジム系の 4 分の 1 程度である。さらにブースターシンクロトロン of ビームダンプ部での 8GeV 電子ビーム照射試験により放射線減磁はサマコバ系の方が少ないことを確認している。各種類 2 セグメントずつ製作を行い、セグメントの配列は放射線による減磁が少ないサマコバを最上流とし、以下ネオジム、サマコバ、ネオジムの順とした。

Figure 1 に PM-BM5 の 1 セグメントの磁気回路を示す。極力少ない磁石量で所望の磁場を得ることができるよう留意した磁石配列とし、温度係数補償用整磁合金 (日立金属ネオマテリアル製 MS-2) と磁場調整用シャ

ントバー (材質 SPCC) を配置する。磁極は飽和磁束密度が高い純鉄 (材質 SUY) とし、その他のヨーク部は材質 SS400 とした。各部の詳細寸法の検討においては、CST STUDIO SUITE[7]による 3 次元シミュレーションの結果を参考とした。

ビーム運転中はギャップ間に NMR を挿入して磁場測定が行えないため、リターンヨーク中央に磁場計測用スロットを設け、磁極の磁場変動に応じた磁場をモニターすることとした。シミュレーションでは磁極部の磁場変化率よりもスロット部の方が約 2.5 倍大きく、磁極磁場の相対変化を高感度で観測可能である。

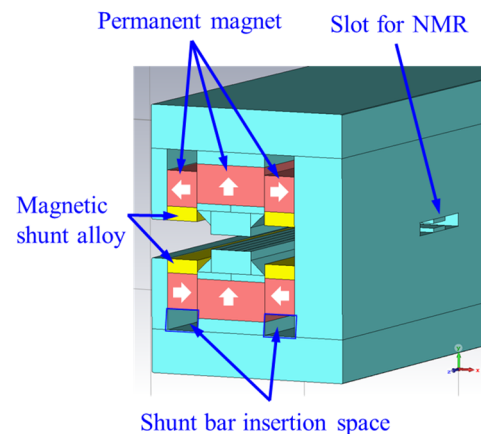


Figure 1: Magnet circuit of one segment of PM-BM5.

3.3 セグメント端部のノーズ構造

各セグメント接続部の磁場分布の補正については SPring-8-II 用 LGB の検証モデルとして製作した Mini LGB で開発したノーズ構造の技術を採用した。各セグメントの磁極端部を長手方向に延長して隣との隙間が最小となるようなノーズ構造を形成することで、セグメント間の磁場のディップ (低下) を抑えて滑らかな磁場勾配が実現できる。また隣り合うセグメント間の磁場のクロストークが小さくなるため、磁石の組立時におけるセグメント間の磁気干渉を抑制出来、且つセグメント単体の減磁を観測することが可能となる。各セグメントは Rectangular 型で製作し、ノーズに角度をつけて各セグメントをビーム軌道に沿った円弧状に配置することで、結合状態の磁石は Sector 型となるようにした。

4. 磁場性能

4.1 メーカーにおける磁場調整

製作工場では 4 セグメントを結合した状態 (全長 2100mm) で BL 積を測定することができないため、磁場測定 (BL 積、x 方向の磁場平坦度) は各セグメント単体で実施した。また、温度係数測定のための温度調整可能なブースが無い場合、磁場計測室の空調温度を変えることにより整磁合金の厚さを決定した。

磁場調整は各セグメントの BL 積が 0.2% 高くなるよう

調整を行った。セグメント単体の BL 積の合計値に対し、全セグメントを結合した BL 積は約-0.2%低下するシミュレーション結果が得られたためである。磁場調整方法は厚さ1mmのシャントバーを Fig. 1 に示した上下左右の4か所の空間に挿入し磁場を下げながら実施した。最終的に4セグメントの BL 積の合計は設計値 2.31Tm に対し+0.26%増の 2.316Tm(連結時の予想値は 2.311Tm)として SPring-8 サイトへ納入された。

4.2 SPring-8 サイトにおける磁場測定

SPring-8 に納入後、PM-BM5 の磁場の温度係数測定を実施した。温調ブース内の温度を 18~32℃の間で 0.5℃/時の速度で上昇・下降させながら、各セグメントのギャップ中央の磁場を NMR で測定して温度係数を評価した。Table 2 に各セグメントの測定結果と平均値を示す。蓄積リング収納部の設定温度が 27±1℃より 26~28℃でフィッティングした温度係数を記載している。何れのセグメントも仕様値の $\pm 5 \times 10^{-5}$ [K] 以下で、全体の温度係数も -3.7×10^{-6} [K]となり、実運転に使用可能な値を達成した。

Table 2: Result of Temperature Coefficient Measurement of PM-BM5

Segment	Temperature coefficient [K] (at 26-28℃)
#1 (SmCo)	$+1.5 \times 10^{-5}$
#2 (Nd)	-2.8×10^{-5}
#3 (SmCo)	$+7.0 \times 10^{-6}$
#4 (Nd)	-8.9×10^{-6}
Average	-3.7×10^{-6}

3次元磁場測定装置によるマッピング測定では磁場測定装置のビーム軸方向の駆動距離が 2000mm と磁極長 2100mm よりも短いため、磁石の上下流半分ずつを約 1500mm の範囲で測定した。ホール素子の移動はビーム軌道に沿った円弧状(曲率半径 24m)とした。Figure 2 に磁極中心におけるビーム軸方向の磁場分布測定結果を示す。BL 積の測定値は 2.341Tm と仕様値よりも 1.34%高い値であった。

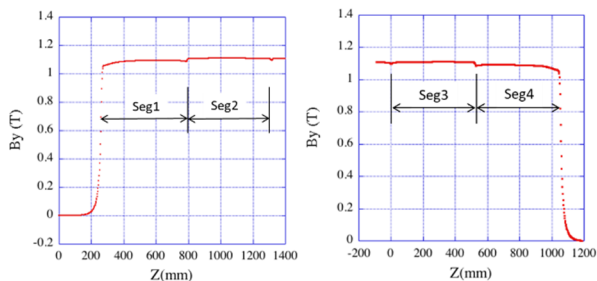


Figure 2: Longitudinal field distribution of PM-BM5.

Figure 3 に BL 積で評価した磁場平坦度を示す。GFR±12mmの範囲における平坦度は 1×10^{-3} 程度と仕様値内ではあるが、端部での磁場が大きく、シムの効果が予想よりも大き過ぎる傾向にあることがわかった。原因は現在調査中である。

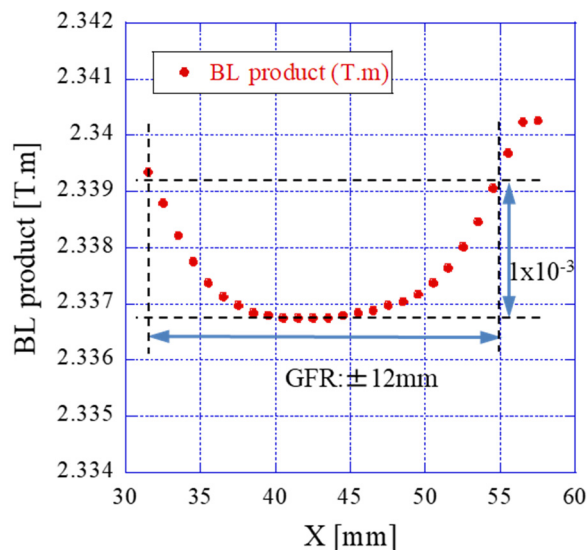


Figure 3: Uniformity of BL product of PM-BM5.

5. ビーム輸送ラインへの設置

5.1 設置前の準備

PM-BM5 には磁場調整機構を取付けていないため、下流に2台のステアリング電磁石を増設して BM5 の偏向角のずれによる軌道変化を補償することとした。1台のステアリング電磁石の最大偏向角は BM5 の偏向角 5°の $\pm 1.18\%$ に相当する。これら2台の増設したステアリングと既存の入射軌道フィードバック用ステアリング2台の組み合わせで蓄積リングへの入射軌道を再現させる。ただし、PM-BM5 の BL 積測定値が設計値よりも 1.34%大きいという結果を踏まえて、これらのステアリングによるビーム軌道調整範囲を超える可能性も想定して、事前のマシン・スタディにて調整可能な偏向角の範囲を調査した。

スタディでは BM5 の励磁電流を増加させ、どの程度 BL 積が増加してもビーム入射が可能かを確認した。正常な入射軌道の判定は入射軌道フィードバックに使用している2台の位置モニタの位置と角度、及び蓄積リングへのビーム入射効率に変化がないことを条件とした。結果は現状の励磁電流の+1.75%まで正常なビーム入射が可能であり、さらに BM5 上流のステアリングの調整により+2.1%までは入射可能であることがわかった。以上より、PM-BM5 は BL 積増加分を調整せずに交換することとし、+2.1%までの偏向角度の変動に対応可能な入射軌道設定パラメータを作成した。

5.2 BM5 との交換作業

トンネル内には BM5(重量4.5t)、PM-BM5(重量1.7t)

を吊り上げ可能なクレーンが無い場合、自立式門型クレーンを設置して交換作業を実施した。Figure 4 に交換後の PM-BM5 を示す。PM-BM5 は既設架台へのインストールが可能な台座上で 4 セグメントの連結、固定が行われており、交換後に何らかの異常が生じてみてもすぐに元の電磁石へ復旧が可能である。作業中の安全対策として磁極部の安全カバー、ヨーク部の非磁性カバー、非磁性水準器、非磁性工具を準備した。磁石近傍で使用する工具には防爆式のベリリウム銅製、チタン製の非磁性のものを使用した。

PM-BM5 のアライメントはレーザートラッカーと非磁性の水準器(SUS製、精度 0.02mm/m)を使用して実施した。現状の入出射ラインが交差する偏向点を磁石中心とし、PM-BM5 の入・出射基準点を各ライン上に $\pm 0.05\text{mm}$ 以内の位置精度で設置した。

PM-BM5 設置後、長期磁場監視用 NMR、磁石本体と環境温度測定用熱電対を取り付け、データベースに記録するようにした。NMR 以外の磁場観測方法として、音叉式電子天秤を用いてヨーク漏れ磁場が磁性体にかかる引力を測定することで磁場強度の変化を測定できる機構を試作した。現状の測定分解能は NMR に及ばないが、今後は実用可能なレベルまで改善を試みる予定である。

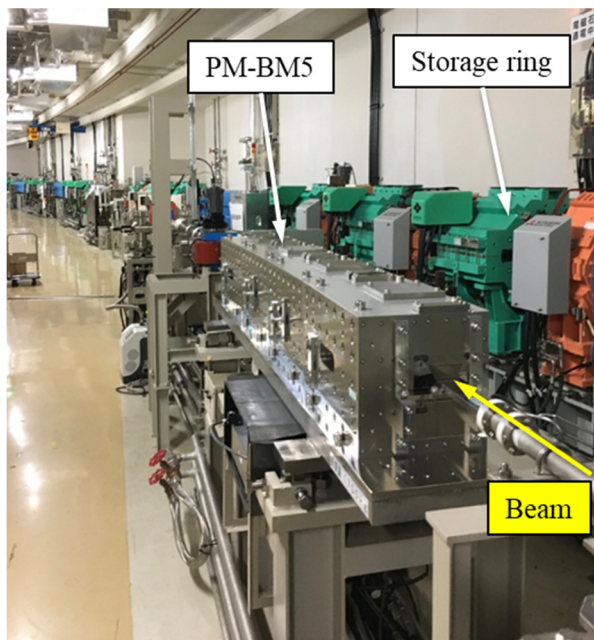


Figure 4: Permanent dipole magnet PM-BM5 at beam injection transport line.

6. 設置後の運転状況

6.1 運転状況

PM-BM5 設置後の蓄積リングへのビーム入射調整は 2018 年 4 月 2 日に実施した。事前のスタディで調査した入射軌道作成用ステアリング電磁石のパラメータを用い、

旧 BM5 の偏向角に対し+0.7%の設定とすることで蓄積リングへの正常な入射が可能であった。PM-BM5 から蓄積リング周回軌道までの距離 1800mm における漏れ磁場は地磁気以下であるとの計算結果が得られており、入射後の周回ビームへの影響は確認されなかった。

Figure 5 に蓄積リング入射軌道補正用水平ステアリング電磁石(CH10, CH11)の 2016 年 4 月からの電流値の履歴を示す。これらのステアリング電磁石は PM-BM5 と増設されたステアリング電磁石の下流側に位置し、蓄積リングへのビーム入射位置と角度を一定にするフィードバックに用いられており、電流値の変動は SSBT 入射ビーム軌道の変動に相当する。青線で囲った箇所が各年 4 月～8 月の変動であり、現在のところ PM-BM5 への交換による悪影響は確認されていない。

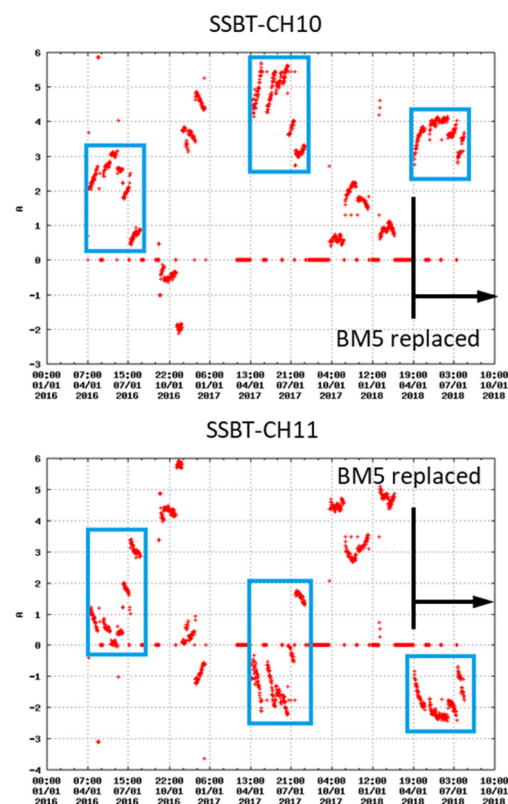


Figure 5: Current history of the steering magnets for injection beam trajectory feedback.

Figure 6 にギャップ磁場モニタ用としてセグメント#1 の磁場計測スロットに設置した NMR の計測結果の一例を示す。赤のドットが磁束密度、緑のドットがヨーク温度を示す。7 月 18 日は六極電磁石電源トラブルにより全電磁石への通電と RF キャビティへのクライストロン出力が停止しており、トンネル内温度の低下によりヨーク温度も低下している。観測磁場とヨーク温度の推移に相関が見られているが、その変化量は入射効率等に影響を与えるほど大きくはなく、詳細については今後調査も評価を継続する。磁場測定値の変動が大きいのは NMR センサ位

置の磁場均一度の問題であると考えられるため、今後改善する予定である。

スロット部の測定結果には周辺の電磁石からの漏れ磁場の影響が含まれていることがわかっている。Figure 7 にセグメント#1 で観測された近傍の電磁石からの漏れ磁場の干渉の様子を示す。マシン停止状態から SR と SSBT 電磁石の通電開始毎にスロット部の NMR 測定値が増加していることがわかる。ビーム運転中はこれら周辺の電磁石の漏れ磁場の影響を受け続けるが、そのほとんどは NMR が設置されているリターンヨーク部を流れるだけでギャップ磁場には影響を与えないと考えられる。

永久磁石の磁場変動によるギャップ磁場の変動を正確に評価するためには、周りの電磁石が全て非励磁の状態等、計測環境を統一した上で観測を行うことが最も確実な計測法となる。より正確にギャップ磁場の減磁量を評価するためには、定期的に真空ダクトを取り外して直接的なギャップ磁場の測定を行う必要がある。

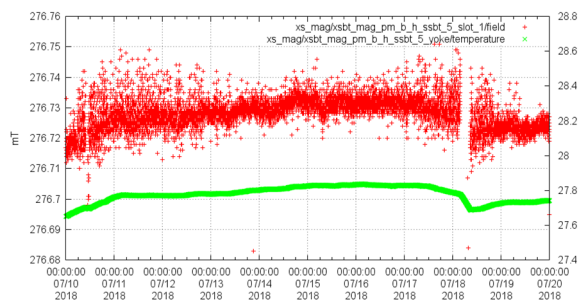


Figure 6: Measured magnetic field at the NMR monitor slot of segment #1 of PM-BM5. Red: Magnetic field, Green: Yoke temperature.

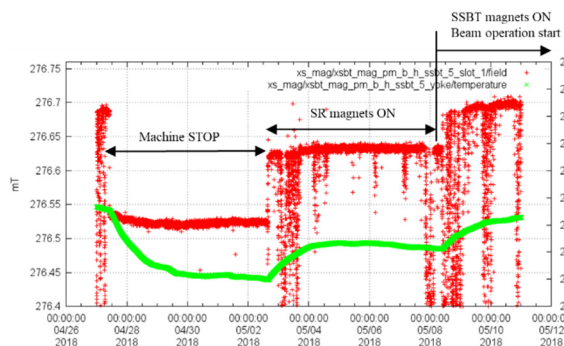


Figure 7: Interference of leakage field from surrounding magnets to the segment #1 of PM-BM5. Red: Magnetic field measured at the NMR monitor slot, Green: Yoke temperature.

6.2 放射線減磁の調査

PM-BM5 の放射線による永久磁石の減磁を評価するため、4 月の運転開始時からガフクロミックフィルムにて照射線量の計測を行っている。短期間では減磁が放射

線によるものか経時的なものかを切り分ける事は困難であるが、セグメント毎の減磁を詳細に比較することで評価を試みる予定である。ガフクロミックフィルムの他に RadFET を用いたリアルタイムでの放射線吸収線量の測定も準備中である。夏期停止期間(8 月～9 月)に設置して測定を開始する予定である。

7. まとめと今後の予定

永久磁石ベース偏向磁石の性能実証機を設計、製作し、SPRING-8 蓄積リングと同一の実使用環境下にある入射輸送ラインの偏向電磁石 BM5 と交換した。新規偏向磁石 PM-BM5 の詳細な BL 積測定では設計値よりも +1.34% 高い値であったが、下流に増設した 2 台のステアリング電磁石と既存の入射軌道フィードバック用ステアリング 2 台により正常なビーム入射を可能とした。2018 年 4 月から PM-BM5 の実運用を開始し、その後の約 4 ヶ月間は問題無くトップアップ入射を継続中である。ギャップ磁場モニタ用としてリターンヨークに設けたスロット部で NMR による長期磁場計測を行っており、マシン運転中は周囲の電磁石の漏れ磁場の干渉を受ける問題点があるものの、現在のところ減磁による磁場の低下は観測されていない。今後は長期磁場安定度の計測精度を高め、経時的あるいは放射線による減磁の詳細な評価を実施する予定である。

謝辞

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] T. Watanabe *et al.*, “Magnet Development for SPRING-8 Upgrade”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.1093.
- [2] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 072401 (2017).
- [3] S. Takano *et al.*, “Development of Permanent Magnet based DC septum”, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP070, Hokkaido, Japan, 1-3, Aug, 2017, p.515;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP070.pdf
- [4] 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
- [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, TUOM04, Hokkaido, Japan, 1-3, Aug, 2017, p.60;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUOM/TUOM04.pdf
- [6] T. Taniuchi *et al.*, “Development of Permanent Magnet Based Longitudinal Gradient Bend”, THP068 in these proceedings.
- [7] <https://www.cst.com>