

SPring-8-II に向けた永久磁石型偏向磁石の開発 R&D OF PERMANENT DIPOLE MAGNET FOR SPring-8-II

谷内 努^{#,A)}, 青木 毅^{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)}, Shiro Takano^{A),B)}, Kenji Fukami^{A),B)}, Takahiro Watanabe^{A),B)}

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

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

Abstract

Permanent magnets are promising for lattice magnets of future light sources in point of small electric power consumption, compactness and so on. We have been investigating field-variable permanent dipole magnets for the SPring-8 upgrade, SPring-8-II. A prototype magnet with a longitudinal field gradient for emittance reduction and a magnetic shunt circuit for temperature compensation was designed, manufactured and tested. In this paper, we report simulation design and measurement results of dipole magnets for SPring-8-II, and long-term magnetic field monitors for permanent magnets are also discussed.

1. はじめに

供用開始から 18 年が経過した大型放射光施設 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となる SPring-8-II[1, 2]が検討されており、そこで使用される偏向磁石として、永久磁石を用いた偏向磁石の開発[3]が進められている。永久磁石型偏向磁石は電磁石と比べてコイルのはみ出しが無いので、低エミッタンス蓄積リングにおける偏向磁石の分割数増に伴う加速器コンポーネントの高充填化に対応しやすい上、メガワットクラスの消費電力の大幅な削減や冷却水に起因する振動の低減、空調・冷却水などのユーティリティ設備の規模縮小など多くのメリットが得られると考えられる。永久磁石型偏向磁石は 20 年ほど前からビーム輸送系などで採用されており、現在進行中の Sirius[4]、ESRF-EBS[5]などの次世代放射光源の主リング用としても採用される予定であるが、その安定性や信頼性に関して十分に検証されているとは言い難い。我々は永久磁石を用いた偏向磁石を次世代放射光源に適用するための検討を進めており、解決すべき各課題について検証結果を積み上げている。温度変動に対する安定性や長期運用における減磁は特に重要な課題であると捉えており、各種試験を積み重ねて十分検証していく必要があると考えている。

本論文では、現在検討されている SPring-8-II のラティス設計に基づく偏向磁石の設計・検討、試作機の製作・測定結果について、現時点までの検討・検証結果を報告するとともに、実機運用時に導入を検討している長期磁場モニタについて述べる。

2. SPring-8-II 用永久磁石型偏向磁石

現在提案されている SPring-8-II のラティス (Figure 1) では、1セルあたり5つの偏向磁石が配置される。セル中心に設置される Normal Bend (NB)とそれに対して対称に設置される 2 種類×2 台の Longitudinal Gradient Bend (LGB)である。これらの偏向磁石の主なパラメータを Table 1 に示す。

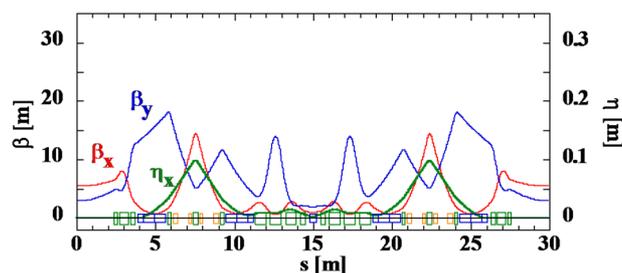


Figure 1: A unit cell of the 5-bend achromat optics for SPring-8-II (tentative).

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

Magnetic field [T]	
NB	0.953
LGB type 1	0.193, 0.274, 0.544
LGB type 2	0.259, 0.362, 0.791
Effective length [m]	
NB / LGB	0.42 / 0.7, 0.7, 0.35
Gap [mm]	25
Good Field Region [mm]	±6
Field error	5×10^{-4}

LGB は磁束密度の異なる3つのセグメントから構成され、階段状の磁場分布を形成する。階段状磁場分布を実現するには磁極ギャップを階段上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、我々は磁極ギャップ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。現時点における SPring-8-II 用 LGB の磁気回路構造を Figure 2 に示す。真空チャンバーのメンテナンス等を考慮した C 型磁気回路としており、磁場調整のための Outer Plate 機構を有している。

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

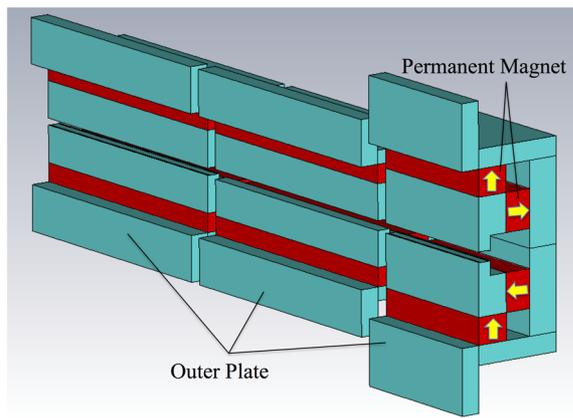


Figure 2: Longitudinal gradient bend with outer plates.

我々は SPring-8-II に向けた永久磁石型偏向磁石を 2012 年に提案し、引き続きセクター型永久偏向磁石の試作[6]を行った。そこでは、永久磁石を用いた偏向磁石に関する下記の項目について評価を行い、SPring-8-II の偏向磁石として、十分機能する可能性を示した。

- ・ 永久磁石(ネオジウム系 NMX-44CH)を用いた偏向磁石の組み立て
- ・ ギャップ内磁束密度のシミュレーション (CST STUDIO SUITE®[7]) 結果と実測値の比較
- ・ Outer Plate (上下配置) による磁場調整機構の原理実証 (可変範囲、ヒステリシス等)
- ・ 磁場分布の均一性 (磁化の不均一性緩和)
- ・ 磁気回路全体における温度係数
- ・ 永久磁石組み入れによるギャップの製作精度

ギャップの製作精度については、磁石及びヨークの寸法管理だけでは十分な精度が出なかったため、次回の改良項目とした。

また、LGB の検証モデル機である Mini LGB (ネオジウム系 NMX-33UH を使用) を製作し、残された下記の課題について検証を行った。

- ・ 磁気回路セグメント間の間隙に発生する磁場ディップをノーズ構造により補正[8]
- ・ 整磁合金を用いた温度補償回路
- ・ 3 セグメントの一体化、アライメント

本機では各セグメントの両端を非磁性サイドフレームに固定することにより、磁極ギャップ部の寸法精度を向上させた。

3. 磁場調整機構

永久磁石を用いて組み上げられた磁気回路においては永久磁石の個体差などがあるため、最終的にギャップ内に発生する磁束密度を要求精度 (5×10^{-4}) 内に収めることは難しい。そのため、磁性体シム板の追加やリターンヨーク側に間隔を調整可能なギャップ (コントロール・ギャップと呼ばれる) を設けるなどの方法により初期のばらつきを調整することが行われるが、我々は製造初期のばらつき調整にとどまらず、万が一の減磁にも対応可能な、より大幅な磁場調整量を実現できる Outer Plate 方式を提案した。これは永久磁石の磁場の一部を敢えて外部に漏らし、漏れ磁場中に設置した Outer Plate と磁気回路の距離を変える (磁気抵抗を変える) こ

とによって、ビーム・ギャップの磁束密度を調整可能とするものである。Outer Plate 方式の最大の利点は、初期値からの微小調整においては Outer Plate の移動量に対する磁束密度の変化の割合が小さく高精度な調整が可能であること及び Outer Plate の移動に必要な力が小さいことが挙げられる。一方、前述したコントロール・ギャップ方式ではギャップに加わる磁力が大きくギャップ駆動にも大きな力が必要となる。Outer Plate 方式はこのように優れた磁場調整方式であるが、SPring-8-II の蓄積リングにおける機器配置条件、特に架台下通路の確保などの制約から、Outer Plate を偏向磁石の上下に配置することが難しいため、代替案としていくつかの方式を検討した。

短絡板ローター方式

磁極が永久磁石に接する幅広の部分磁性体で短絡させることにより、ギャップ内の磁束密度を 50% 近くまで低下させることが可能であるが、この短絡板を回転体 (ローター) の一部とし、回転により磁場調整ができるようにした構造 (Figure 3) である。磁気回路自体はコンパクトであるが、ローターにかかる非常に大きなトルク (~800Nm) に打ち勝つための駆動機構が必要となる。

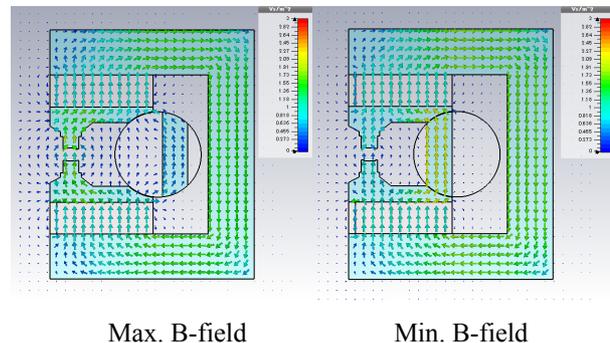


Figure 3: Magnetic field tuning with shorting palte rotor.

側面配置 Outer Plate 方式

Figure 4 に示すように、永久磁石を磁極の上に配置して磁気回路の側面に磁束を漏らし、Outer Plate を磁気回路側面で垂直に移動させる方式である。

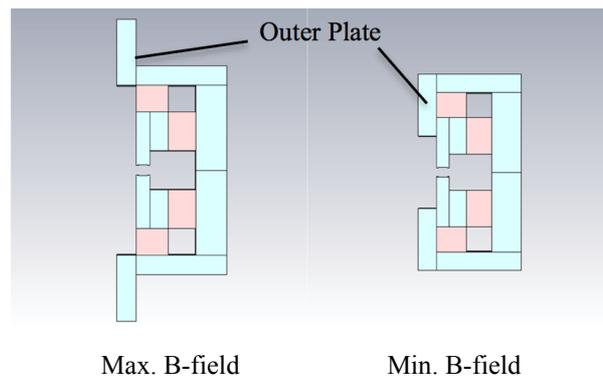


Figure 4: Magnetic field tuning with vertical outer plate.

永久磁石に近接するため Outer Plate に加わる磁気吸引力は大きいですが、直交する方向に移動するので移動に必要な力は比較的小さい。また、磁石直上に Outer Plate 構造が無く、磁石アライメントの障害にならない。さらに、磁場調整量は半分になるが、下側の Outer Plate

を取り外すことで架台との干渉が避けられる。

4. 漏れ磁場

マルチベンドの低エミッタンスリングでは隣接する磁石間の距離が小さくなる。SPring-8-II では検討当初から、機器の物理的干渉や磁気干渉を低減すべく検討を重ねてきた。その結果、現時点で最も近接する偏向磁石と4極電磁石の距離は120mmとしている。

偏向磁石からビーム軸方向への漏れ磁場には、磁極ギャップからの漏れ磁場と組み込まれる永久磁石からの漏れ磁場がある。ギャップからの漏れ磁場では4極に2極成分とその高次成分が励起され、永久磁石からの漏れ磁場により励起される成分は永久磁石の配置によるが、それらによるオブティクスへの影響を小さくするような対策が必要である。我々はこれまで、漏れ磁場を低減させる方法として磁気遮蔽板、永久磁石配置など様々な方法を検討した結果、現時点での設計では、磁極の上下に永久磁石を配置して、永久磁石端に発生する漏れ磁場とギャップの漏れ磁場が逆方向になるようにするとともに、磁極端面にビーム軸方向の磁化を持つ漏れ磁場打ち消し用磁石を付けてギャップからの漏れ磁場を低減させている。Figure 5 に漏れ磁場打ち消し用磁石の有無による漏れ磁場分布の違いを示す。

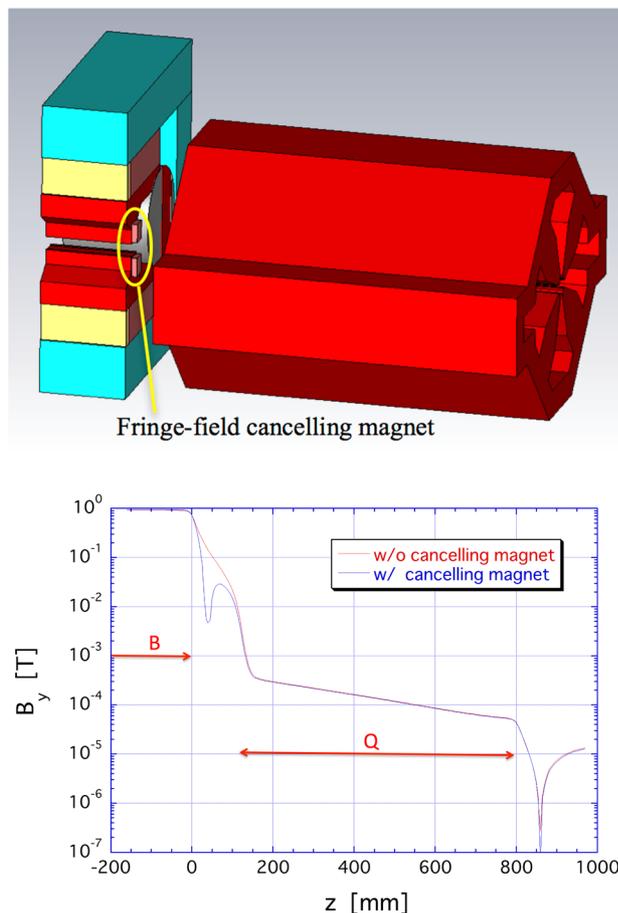


Figure 5: (above) Fringe field cancellation between dipole and quadrupole magnet. (below) Fringe field distribution with/without cancelling magnet.

さらに、永久磁石の漏れ磁場が4極電磁石に吸い込まれることで、4極に励磁される各高次成分を算出し、ビームオブティクスへの影響が小さいことを確認している。

5. 温度補償磁気回路

5.1 整磁合金

永久磁石の残留磁束密度は一般に温度が上昇するにしたがい減少する。代表的な温度係数は、Nd-Fe-B磁石で $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 、SmCo磁石で $-0.04\%/^{\circ}\text{C}$ 程度である。蓄積リングの偏向磁石に要求される安定度は 1×10^{-5} 以下であるので、環境温度の安定化だけではこの安定度を得ることはできない。そこでわれわれは、整磁合金による温度補償回路を採用することにした。整磁合金(温度補償合金)は磁気変曲点が常温よりやや高温側にあるため温度の上昇とともに磁束密度が減少する鉄・ニッケル合金で、 $-1 \sim -3\%/^{\circ}\text{C}$ 程度の大きな温度係数を有する。この整磁合金を磁気回路内の磁束の一部をシャントするように配置すると、温度変化 ΔT によりギャップの磁束 Φ_{gap} は次式のように変化する。

$$\Phi_{gap} = \Phi_{PM} - \Phi_{shunt} \\ = (1 + k_{PM} \Delta T) \Phi_{PM}^0 - (1 + k_{shunt} \Delta T) \Phi_{shunt}^0 \quad (1)$$

ここで Φ_{PM} 、 Φ_{shunt} は永久磁石の作る磁束、整磁合金でシャントされる磁束、 k_{PM} 、 k_{shunt} は永久磁石及び整磁合金の温度係数である。したがって、磁極間の磁束密度が温度に依らず一定となるような磁気回路を構成するには、初期の磁束 Φ_{shunt}^0 と Φ_{PM}^0 の比を次式のように設定すればよい。

$$\frac{\Phi_{shunt}^0}{\Phi_{PM}^0} = \frac{k_{PM}}{k_{shunt}} \quad (2)$$

整磁合金は温度補償された磁気回路が必要な積算電力計やスピードメータなどで使用されている。加速器用永久磁石の温度補償回路としてはFNALでの使用例[9]などがある。

現在、整磁合金を製品として供給しているメーカーは少なく、国内では(株)日立金属ネオマテリアル、海外ではVACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG、Carpenter Technology Corporationなどがある。我々は、低温用から高温用まで数種類ある(株)日立金属ネオマテリアルの整磁合金[10]のうち、常温領域で線形に近い温度特性を持ち、かつ飽和磁束密度の大きなMS-2(Ni 31%、Br温度係数 $-1.3\%/^{\circ}\text{C}$ 、 700°C で軟化処理済み)を採用した。

5.2 温度補償シミュレーション

整磁合金の量や配置をシミュレーションにより決定するためには整磁合金のB-H特性が必要であるが、偏向磁石で使用される整磁合金の動作点は 10^5 A/m 以上の磁場領域であるため、一般に行われるリング状試験片にコイルを巻く方法ではこのような高磁場領域のB-H測定ができなかった。そこで、軟磁性材料用高磁場装置[11]による測定と、一般には硬磁性体の測定に用いられるB-Hトレーサー法によって得られた $8 \times 10^4 \text{ A/m}$ ま

での測定データを用いてシミュレーションを行った。ただし、2つの測定データが十分一致しなかったことや、磁場強度が十分高く完全飽和していると思われる領域においても透磁率が μ_0 にならないなどの誤差要因があったため、最終的には製作された Mini LGB に整磁合金を加えた時の温度係数を実測し、それを再現するとともに飽和領域における透磁率が μ_0 となる B-H データを構築してシミュレーションに使用した。

5.3 温度特性測定

永久磁石を用いた LGB の特性評価及び製作上の問題点洗い出し等を目的として、断面形状は実機と同じで各セグメントのビーム軸方向の長さを 100mm としたプロトタイプ機 (Mini LGB) を製作した。使用した永久磁石は Nd-Fe-B の NMX-33UH (カタログ値: 残留磁束密度 B_r 1.10~1.18 T, 保持力 H_{CB} 835~915 kA/m)、磁極及びヨークは SS400 である。

Mini LGB は3つの磁気回路セグメントで構成されており、ビーム軸上の磁束密度分布は階段状となる。各セグメント間の間隔が近すぎるとクロストークにより磁場強度差が小さくなり所望の磁場勾配が実現できなくなる一方、間隔を広げすぎるとセグメント間に磁束密度の谷間ができてしまう。セグメント間隔と磁石量の調整により滑らかな磁場勾配を実現する条件を見出すことは容易ではないため、我々はセグメント間の磁極端にノーズ部を設けてクロストークを減らすとともに滑らかな磁場勾配を実現した。Figure 6 に Mini LGB におけるビーム軸方向磁束密度分布の実測値とシミュレーション結果を示す。

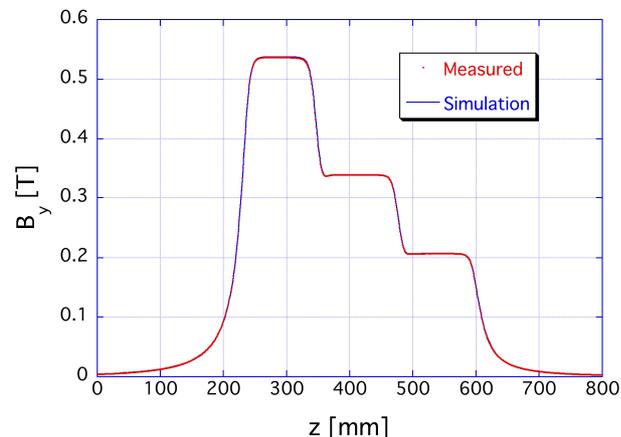


Figure 6: Longitudinal magnetic field distribution of Mini LGB.

なお、本測定およびシミュレーションではセグメント3のみに整磁合金が挿入されている。また、磁極長が 100mm と短く BL 積における端部の割合が大きいので、磁束密度は低くなる。さらに、実機では磁極長が 1:2:2 であるが Mini LGB では 1:1:1 であるため、階段状の磁場勾配比も異なっている。

5.4 温度特性測定

各セグメントについてシミュレーションによる予測を元に整磁合金の厚みを変えながら軸上磁束密度の温度特性を測定した。磁気回路の温度調整は、温調水ホー

スを密着させ全体を断熱材で覆う方法と磁気回路の載った架台全体をブースに入れて局所空調機により温調する方法で行った。Figure 7 はセグメント 2 の測定結果、Table 2 は各セグメントの整磁合金厚み調整後の温度係数である。

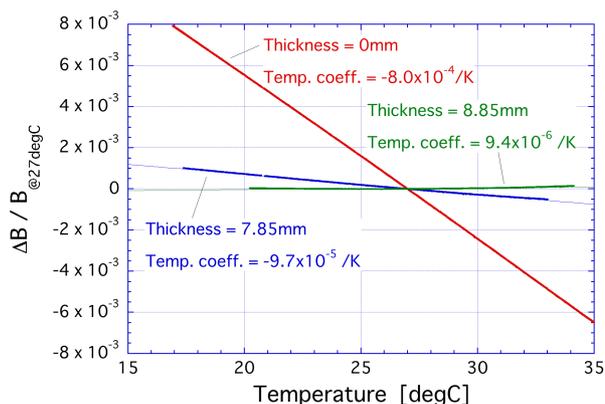


Figure 7: Optimization of magnetic shunt alloy for segment 2 of Mini LGB.

Table 2: Temperature Coefficients Measured for Each Segments of Mini LGB with/without Magnetic Shunt Alloy (MS).

	Temperature coefficient [1/K]	
	without MS	Optimized MS (thickness)
Seg. 1	-8.1×10^{-4}	-1.2×10^{-5} (5.2mm)
Seg. 2	-8.0×10^{-4}	$+9.4 \times 10^{-6}$ (8.85mm)
Seg. 3	-7.0×10^{-4}	$+5.0 \times 10^{-6}$ (18.0mm)

加工歪み等による寸法誤差を抑えるため整磁合金の厚みは 1mm までとし、それ以下の調整が必要となる場合は 1mm 厚整磁合金のビーム軸方向長さを短くすることにより、実効的な厚みを 1mm 以下にしている。入れない場合はネオジム磁石の B_r 温度係数 $-1 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ に近かった温度係数が、整磁合金厚調整後は、概ね $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 以下と 2 桁小さくなっている。この値は、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下に温度安定化された加速器収納部では従来の電磁石と同程度の安定度であると言えるが、偏向磁石下流部のクロッチ・アブソーバ付近など局所的な温度上昇の可能性もあるため、より小さな温度係数が望ましい。また、 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 以下に調整された後は温度特性に非線形性が見られるので、今後精度を上げた測定を行い、非線形性の補正方法を検討する。さらに、セグメント一体化時にはセグメント間のクロストークにより整磁合金の動作点がわずかに変わるため、その影響を考慮した調整方法を確立する必要がある。

6. 長期磁場モニタ

6.1 目的

永久磁石を用いた偏向磁石は消費電力や省スペースなどメリットがある一方、減磁については十分に検討・

検証することが必要であることは前にも述べたが、加速器における運用実績が乏しく、安定性が十分に確認されているわけではないので、10年以上の長期にわたり磁場の安定度を監視していく必要があると考えられる。さらに、経時的変化の他、ビーム損失による局所的な減磁の可能性を考えると、偏向磁石全数(LGBにおいては全セグメント)について磁場強度モニタを設置して、減磁が観測された際には磁場調整できるような体制を準備すべきである。SPRING-8-IIでは、偏向磁石のBL積を 5×10^4 以下の精度で調整することになるので、磁場モニタとしては温度ドリフト、放射線環境下で10年以上の長期にわたり 1×10^4 以下の観測精度を維持する必要がある。

6.2 測定方式

前述したような条件下で磁場を観測できる装置として、現在2つの方式を検討している。

NMR 磁場測定器は温度係数が非常に小さく、かつ測定精度も高いので本測定に適しているが、SPRING-8-IIでは偏向磁石のセグメント数が合計572点と測定箇所が非常に多いため、従来のNMR測定器をそのまま全点数分設置することはコスト面から現実的ではない。そこで、1セル分13点のデータを1台のデータ処理ユニットに集約して1点あたりのコストを下げる方式を検討している。また、NMRのプロープは比較的大きな体積(およそ $10 \times 5 \times 5 \text{mm}$)と 10^4 以下の磁場均一性を必要とするが、SPRING-8-IIの偏向磁石では磁極と真空チャンバーの隙間にプロープを挿入するスペースは無い。そこで、リターンヨークに 10^4 以下の一様磁場領域を持つようなプロープ挿入用スリットを設け、そこでの磁束密度の相対的な変化を観測することを検討している。リターンヨーク内にプロープを入れることで、放射線の遮蔽効果も期待できる。

一方、別の磁場測定方式として、漏れ磁場中に設置した磁性体に加わる磁力を電子天秤により測定することを検討している。電子天秤は秤量(定格荷重)の 10^{-5} 以下の精度で測定できるものが安価で市販されており、これを磁力測定に応用することでコストダウンを図る。電子天秤はフォースバランス式が比較的高精度で広く普及しているが、内部に永久磁石を使用しているため経時的減磁の恐れがあることや電子回路がやや複雑などの点から、そのまま採用することはできない。別の方式として国内メーカーにより開発された音叉式電子天秤[12]がある。これは金属音叉の両端に加わる荷重に応じて共振周波数が変化することを利用したもので、比較的簡単な構造で長期の安定性にも優れており、すばる望遠鏡の主鏡アクチュエータにも使用されている。現在、長期測定に向け基本的な特性を調査するとともに、磁石の温度変化に伴う磁力変化測定を検証中である。音叉の共振周波数は周囲の大気密度にも依存する。上位機種では大気圧補正機能が付いたものもあるが、汎用機種で 10^4 以下の精度で観測すると大気圧変動の影響が見える。長期的な平均を取るとこの影響は小さくなるが、サイト内の大気圧観測データがあれば補正することができ、短期的な変動も観測できると考えられる。

7. まとめ

SPRING-8-IIの省電力化・高安定化を目指して永久磁石を用いた偏向磁石の検討・開発を進めている。これまで、シミュレーションによる設計検討やプロトタイプ機による実証試験を行い、検討をスタートしたときに想定されていた課題の多くについては実機で要求される仕様をほぼ達成できる目処がしたが、永久磁石の放射線減磁や局所的な温度分布がある場合の安定性など、長期運用に耐えられるか否かを十分見極める必要がある課題も残されている。今後は、実機仕様の設計・検討を進めるとともに、加速器実環境での長期試験などを行っていく予定である。さらに、強磁場を常時発生している永久磁石周りの作業における安全対策など、実運用に向けた課題についても検討していく。

謝辞

NMR磁場測定器に関して(株)エコー電子の中島司氏に、音叉式電子天秤に関して(株)新光電子の宇田元彦氏、岡本光平氏に助言、協力いただきました。ここに感謝いたします。

本研究の一部は、科研費26600150の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] SPRING-8-II Conceptual Design Report, Nov. 2014; <http://rsc.riken.jp/pdf/SPRING-8-II.pdf>
- [2] H. Tanaka *et al.*, "SPRING-8 Upgrade Project", Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.2867.
- [3] T. Watanabe *et al.*, "Magnet Development for SPRING-8 Upgrade", Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.1093.
- [4] A.R.D. Rodrigues *et al.*, "Sirius Status Report", Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.2811.
- [5] C. Benabderrahmane *et al.*, "Magnets for the ESRF-EBS project", Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.1096.
- [6] T. Watanabe *et al.*, "Magnetic-field Variable Permanent Dipole Magnet for Future Light Sources", Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, p.1253.
- [7] CST STUDIO SUITE®; <https://www.cst.com/products/csts2>
- [8] T. Taniuchi *et al.*, "Permanent Dipole Magnet R&D for SPRING-8-II", Proc. of IPAC2015, Richmond, USA, p.2883.
- [9] K. Bertsche *et al.*, "Temperature Considerations in the Design of a Permanent Magnet Storage Ring", PAC '95.
- [10] (株)日立金属ネオマテリアル, "整磁合金カタログ"; <http://www.hitachi-metals-neomaterial.co.jp/technology/catalog/pdf/cat10.pdf>
- [11] JFE テクノリサーチ(株), "軟磁性材料・非磁性材料の高磁場直流磁気測定"; <http://www.jfe-tec.co.jp/download/pdf/3S4J-057-00.pdf>
- [12] 新光電子(株), "音叉センサーについて"; http://www.vibra.co.jp/product/about_tf/