

SPring-8-II に向けた ID 光軸調整用ステアリング電磁石の開発

STEERING MAGNET FOR ID PHOTON BEAM AXIS TUNING AT SPring-8-II

谷内努^{#, A)}, 青木毅^{A)}, 安積則義^{A)}, 川瀬守弘^{A)}, 田島美典^{A)}, 増田剛正^{A)}, 松原伸一^{A)}, 山口博史^{A)},
小路正純^{A, B)}, 田村和宏^{A, B)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部 貴宏^{A, B)}

Tsutomu Taniuchi^{#, A)}, Tsuyoshi Aoki^{A)}, Noriyoshi Azumi^{A)}, Morihiko Kawase^{A)}, Minoru Tajima^{A)},
Takemasa Masuda^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Hiroshi Yamaguchi^{A)},

Masazumi Shoji^{A, B)}, Kazuhiro Tamura^{A, B)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}

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

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

Abstract

A steering magnet for photon-beam axis tuning in the insertion devices at SPring-8-II has been developed. The magnets are supposed to be placed at both ends of each insertion device for SPring-8-II so that a photon-beam axis can precisely be adjusted against perturbations including a slow ground deformation in the accelerator tunnel. Since it will be installed surrounding a bellows duct of which mechanical center is 23 mm off the beam axis, the field center of the magnet is designed to shift from the center of the magnet core. Cooling efficiency has also been improved by inserting copper plates in the intermediate layers of coils. We fabricated and tested a prototype and verified that our design meets the requirement for SPring-8-II.

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]は Multi-bend achromat ラティスにより放射光輝度を従来の約 100 倍に上げる光源性能の向上に加えて、永久磁石型偏向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などによる施設の省エネルギー化をコンセプトとした計画である。

ラティス変更に伴って電子ビーム軌道が変わるが、実験ホール側では既存の放射光ビームラインが使用されるため、挿入光源(ID)からの放射光の光軸を再現する必要がある。さらに、長期的な床面変動で蓄積リングと放射光ビームラインの位置関係が変化した場合も光軸を維持し続けなければならない。ID 直上下流には ID ギャップ駆動に伴う誤差磁場を補償するための高速フィードフォワード用ステアリング(ST)電磁石が設置されるが、それとは機能を分離させるため、セル最上流部および最下流部にも光軸調整用 ST 電磁石(Photon-beam axis steering: PBA-ST)を設置し、ST 機能付き 8 極電磁石と合わせて ID 内にローカルバンブを作ることで光軸調整を行う事とした。

PBA-ST 電磁石周辺の機器配置を Fig. 1 に示す。PBA-ST 電磁石は BPM とゲートバルブ間の真空ベローズを覆うように設置されるため設置スペースが限られている上、隣接する 4 極電磁石との磁気干渉を最小限にするためにもコンパクトでフリンジ磁場の小さな形状が望ましい。内側に設置される真空ベローズは、現時点の設計案ではベローズの機械中心とビーム軸の間に 23 mm のオフセットがあるため、磁場中心を機械中心からシフトさせる設計や、磁場分布に影響を与えるベローズ溶接部の透磁率への配慮が必要である。PBA-ST 電磁石に要求される 6 GeV 電子ビームのキック角は、SPring-8 の過去の床面変動の履歴を検討した結果、60 μrad となった。隣

接する 4 極電磁石(QM)との磁気干渉による積分磁場減やキック角にある程度の余力を持たせることを考慮し、製作仕様を定格コイル電流 5 A(コイル電流密度 1.6 A/mm²)、キック角 90 μrad (BL 積 1.8 $\times 10^{-3}$ Tm)に設定した。さらに、コイル中層部に外部へ伸びる銅板を挟み込み、放熱効率を上げてコイル温度上昇を抑制することで、最大コイル電流 7 A(電流密度 2.2 A/mm²)を目指した。

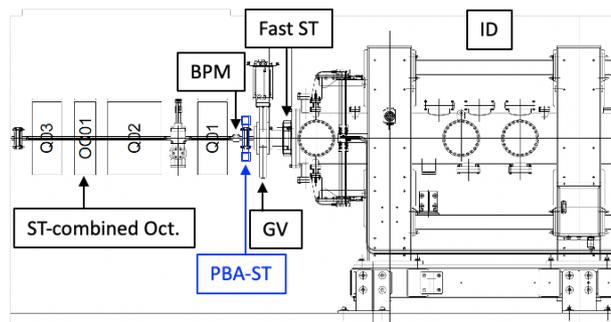


Figure 1: Configuration around PBA-ST. PBA-ST is installed surrounding ICF152 bellows duct.

2. 電磁石設計

2.1 磁極鉄芯および励磁コイル

PBA-ST 電磁石の磁極構造は、内側にベローズダクトが設置されることや周辺の空間的な制約から、水平偏向用と垂直偏向用の磁極が一体となるフレーム型鉄芯を採用した。鉄心の内寸は 200 mm、鉄芯幅、厚みはともに 40 mm で、ICF 152 のベローズダクト(固定用タイロッド付き)を取り囲むように設置される。

Figure 2 に鉄芯、励磁コイルおよびベローズダクトの断面形状を示す。一般的なフレーム型鉄芯 ST 電磁石では、一様断面の鉄芯の各辺に同一サイズの励磁コイルが配

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

置されるが、本ケースでは鉄芯中心に対して磁場中心の水平位置を 23 mm オフセットさせる必要があるため、水平偏向磁場(垂直方向磁場)用の磁極となる鉄芯をテーパ状にカットして磁場中心を移動させる設計とした。カットしたテーパ部には、コイルを取り付け易くするため非磁性部材(アルミ)を取り付け、カット前の外形に復元した。一方、垂直偏向用磁場(水平方向磁場)に対しては励磁コイルを非対称に配置することによって磁場中心を移動させた。励磁コイルについては、ベローズダクトとの干渉を避けながら必要なターン数を実現するように形状を決定した。

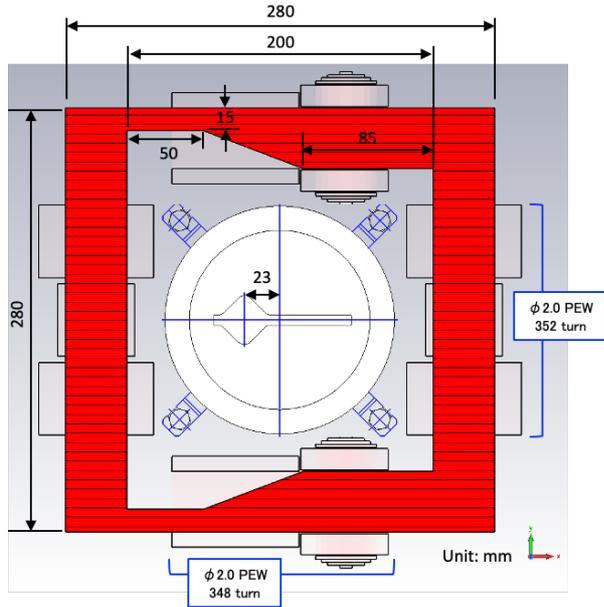


Figure 2: Cross-section of steering magnets. Beam axis locates 23 mm apart from magnet core center.

Figure 3 に CST Studio Suite[2] MS ソルバー(CST-MS) を用いて計算された水平偏向磁場(B_y)の水平方向(x)分布を、Fig. 4 に垂直偏向磁場(B_x)の水平方向(x)分布を示す。磁場の極小点はビーム軸となる $x = 23$ mm 付近となっており、ビーム軸±6 mm の範囲における磁場平坦度 ($\Delta B/B$) は B_y が 1×10^{-3} 、 B_x が 3×10^{-3} である。

水平、垂直偏向用コイルをともに定格電流 5 A で励磁した時の磁束密度分布を Fig. 5 に示す。鉄芯内磁束密度は狭幅部で最大となるが、その値は 1.15 T で磁気飽和には達しておらず、さらなる起磁力増強に対して余裕を持たせており、コイル電流の目標値である 7 A の場合は 1.54 T となる。

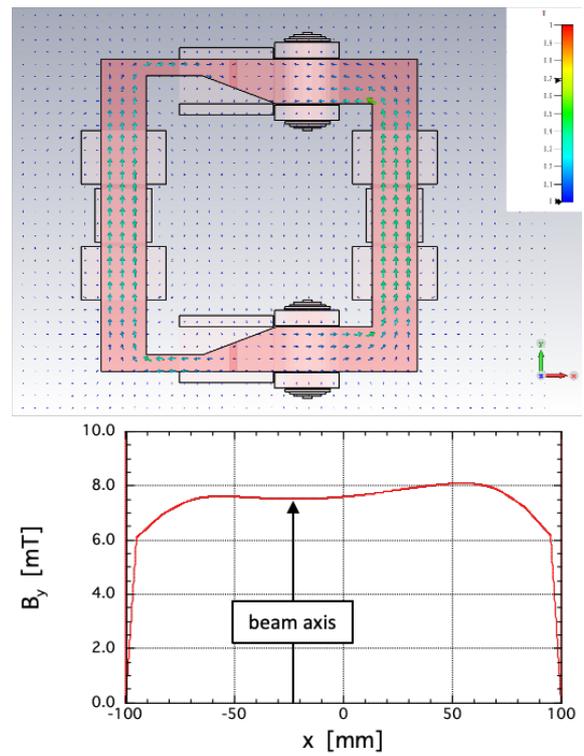


Figure 3: (Upper): Magnetic field in core. (Lower): Horizontal distribution of B_y . Origin of X-axis is the core center.

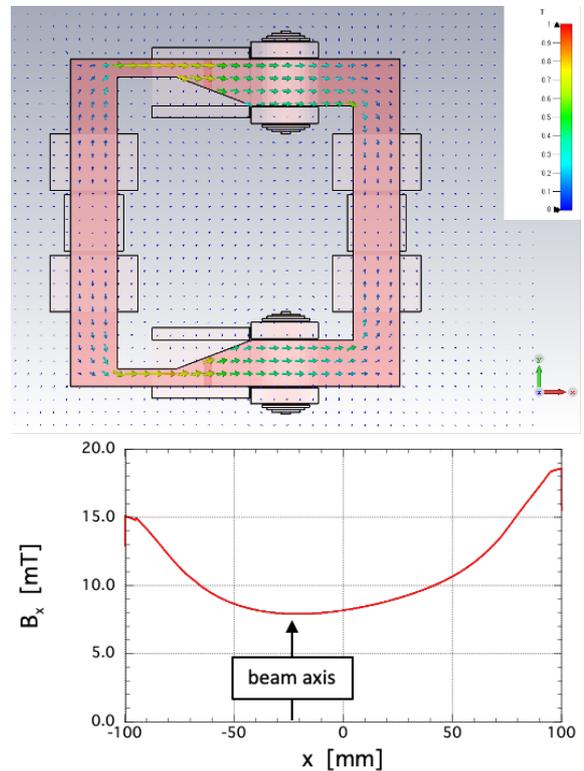


Figure 4: (Upper): Magnetic field in core. (Lower): Horizontal distribution of B_x .

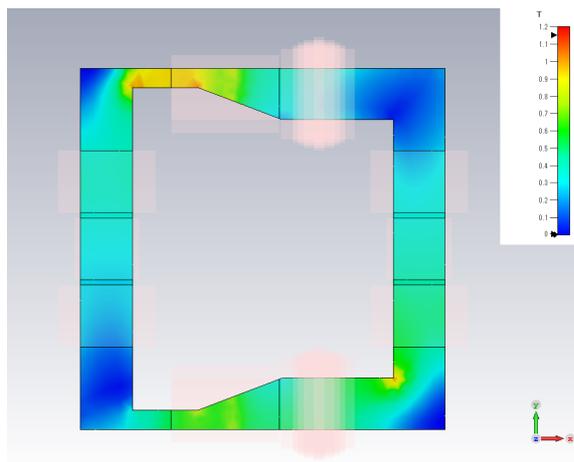


Figure 5: Magnetic flux density in core where horizontal and vertical coil currents are 5 A, respectively.

2.2 隣接 4 極電磁石との磁気干渉

PBA-ST 電磁石の下流には QM が設置されており、両者の磁極間距離は 150 mm である。PBA-ST 電磁石の鉄芯内寸は 200 mm であるため QM 位置でも PBA-ST 電磁石のフリッジ磁場は十分大きく、QM のリターンヨークに磁束が吸われてしまい、その分 PBA-ST 電磁石の積分磁場は減少する。鉄芯中心をベローズ中心に配置しながら磁場中心をオフセットさせる方式は鉄芯内寸を小さくできるため、対称形状の鉄芯中心をビーム軸に設置する方式に比べて積分磁場の減少を抑えることができる上、コイルのアンペアターン値も小さくできる。

Figure 6 に隣接 QM が存在する時の B_y 磁場分布 (コイル電流 5 A) を示す。QM 内部では ST 磁場がクランプされるため BL 積は -24 % 減少するが、その時の BL 積は $1.82 \times 10^{-3} \text{ Tm}$ でキック角 $90 \mu\text{rad}$ は確保されている。一方、Q01 のリターンヨークに吸い込まれた磁束により Q01 に発生する磁場は、2 極、4 極、6 極成分ともに十分小さいことが確認された。

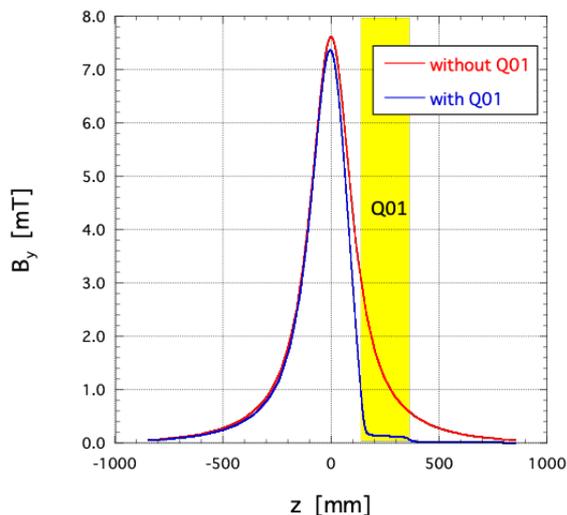


Figure 6: Longitudinal field distribution with and without neighboring Quadrupole magnet Q01.

2.3 ベローズ比透磁率の影響

PBA-ST 電磁石の内側に設置されるベローズダクトにおいて比透磁率 (μ_r) が 1 でない部分があると磁場分布に影響を与える。溶接ベローズの材質は非磁性の SUS316L であるが、溶接により μ_r が上昇する場合がある。溶接後に磁気焼鈍を施して μ_r を下げることが可能 [3] であるが、ベローズの場合は磁気焼鈍することができないため、部品加工段階でも比透磁率に留意し、TIG 溶接棒を適切に選択することによって完成品の μ_r の上昇を抑える方針である。

ベローズの μ_r を変えた時の磁場中心位置シフトを CST-MS で計算した結果を Fig. 7 に示す。 μ_r が大きくなるに従って磁場中心はベローズ中心に向かって移動し、その量は μ_r が 1.5 の時に約 2 mm である。これまでの溶接実績では比透磁率は 1.1 以下が達成されているため、磁場中心の移動量は 0.5 mm 以下にできる見込みである。

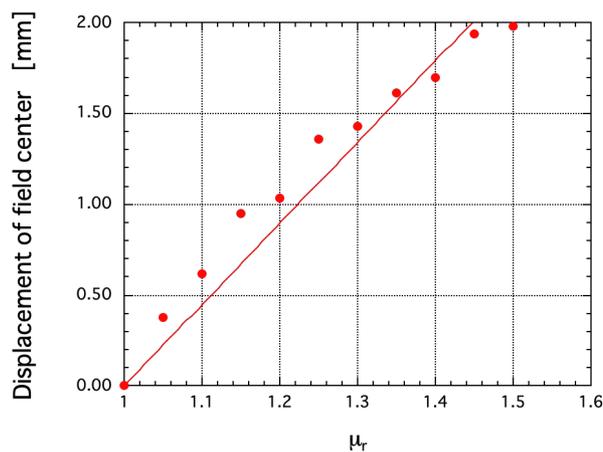


Figure 7: Field center shift due to permeability of bellows.

2.4 コイル冷却

コイル冷却は自然対流による空冷方式としたが、冷却効率を上げるためにコイル中間層に放熱板を挿入する構造を考案した。CST STUDIO SUITE 定常熱解析ソルバー (CST-THs) による熱解析を行った結果を Fig. 8 に示す。コイル及び放熱板の熱伝達係数は $14 \text{ W/m}^2/\text{K}$ とした。放熱板無しの場合、定格電流 5 A 時にコイル温度上昇は $21.8 \text{ }^\circ\text{C}$ であるのに対して、放熱板を追加することでコイル電流 7 A でも温度上昇を同程度に抑えることができる。

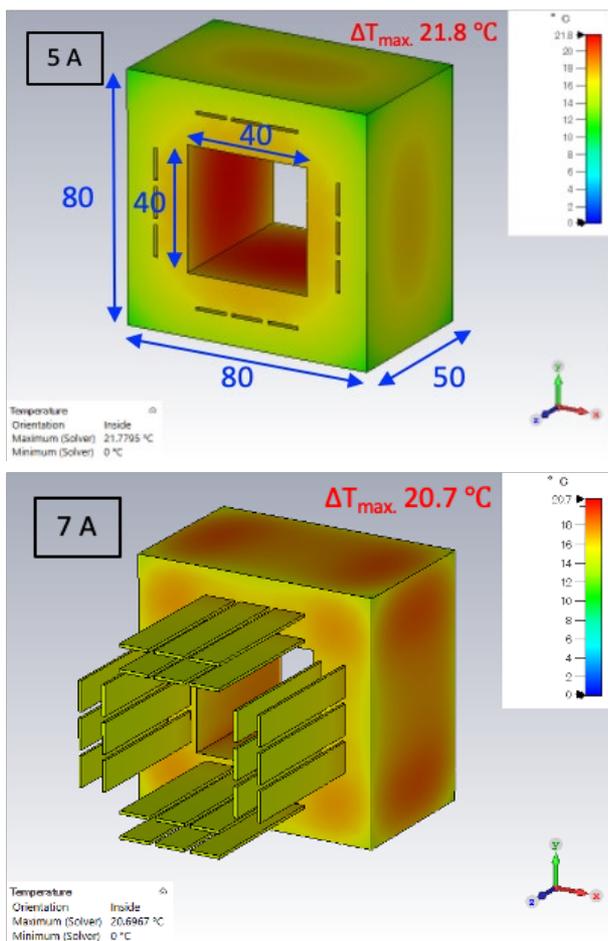


Figure 8: Coil temperature without (upper) and with (lower) heat sink.

3. 製作及び磁場・温度測定

3.1 製作

できるだけコンパクトな鉄芯とするため、入手性が良く飽和磁束密度の高い電磁純鉄 (BMR-2) を素材として使用した。コイル線材は $\phi 2$ mm のポリエステル導線 (PEW、絶縁 F 種、耐熱温度 155 °C) とした。コイルに挿入される銅板は厚み 0.5 mm で、各コイル内側の放熱板は鉄芯にボルト留めして鉄芯へも伝熱し、外側の放熱板はコイル外部で幅広となる T 字型にして表面積を増やし、放熱効率を上げている。コイル温度高によるインタロック信号を出力するため、80 °C で動作するサーミスタセンサーをコイル表面に取り付けている。鉄芯の上部左右にはレーザートラッカー用のターゲット球を取り付けて電磁石のアライメントができるようにした。SPring-8-II 建設においては、真空ペローズ、BPM などの周辺機器が設置された後に本 ST 電磁石が設置されるので、組み立て手順についても配慮した。

3.2 磁場測定

完成後の ST 電磁石の磁場測定は、3 次元ステージに搭載されたホールプローブ (LakeShore 社 460 型) を用いて行われた (Fig. 9)。

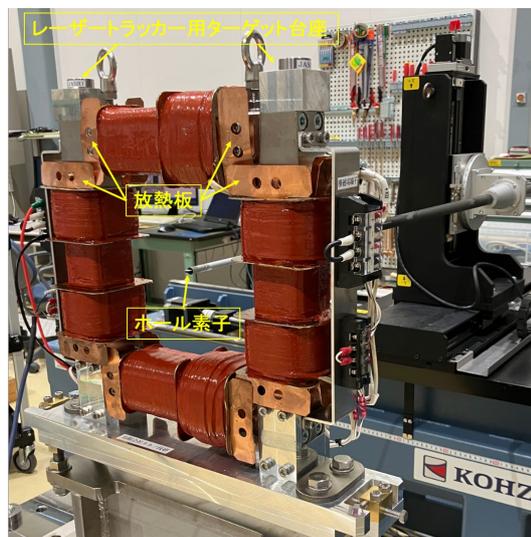


Figure 9: PBA-ST magnet under magnetic field measurement.

Figure 10-12 に各測定データと CST-MS によるシミュレーション結果を比較した。各データともほぼシミュレーション結果と一致しているが、 B_y の x 方向分布 (Fig. 10 upper) で磁場中心位置の差がやや大きい。コイルの製作、設置精度やシミュレーションモデルとの相違などの原因が考えられるため引き続き検討を進めるが、製作再現性が確保できる場合は、設置アライメント時にシフト分を補正することでビーム軸に合わせ込むこともできる。

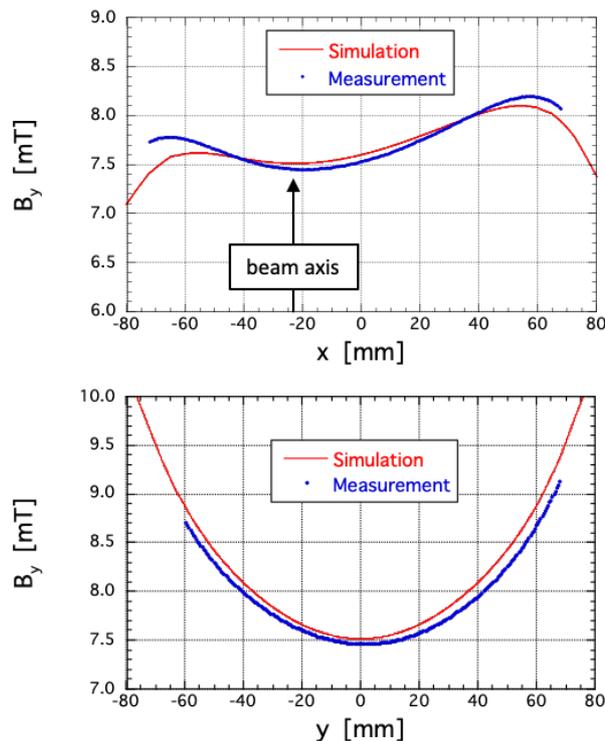


Figure 10: Horizontal steering field (B_y) distribution in

horizontal (upper) and vertical (lower) directions.

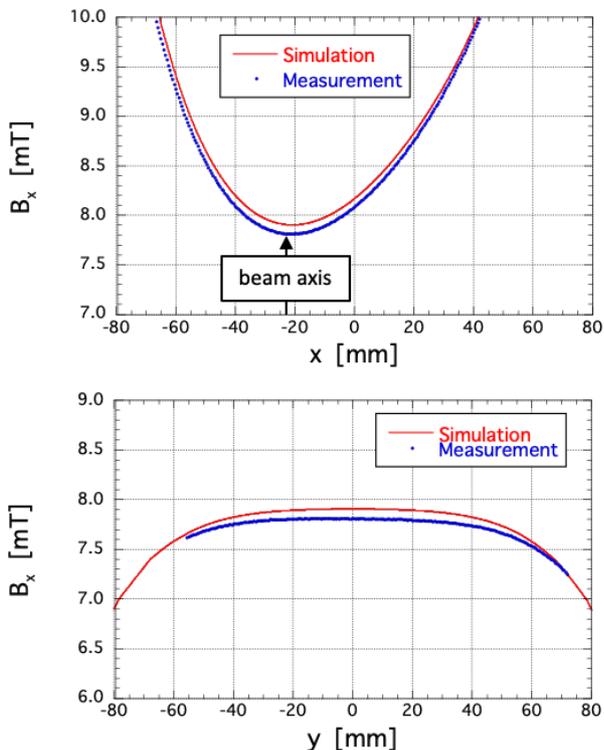


Figure 11: Vertical steering field (B_x) distribution in horizontal (upper) and vertical (lower) directions.

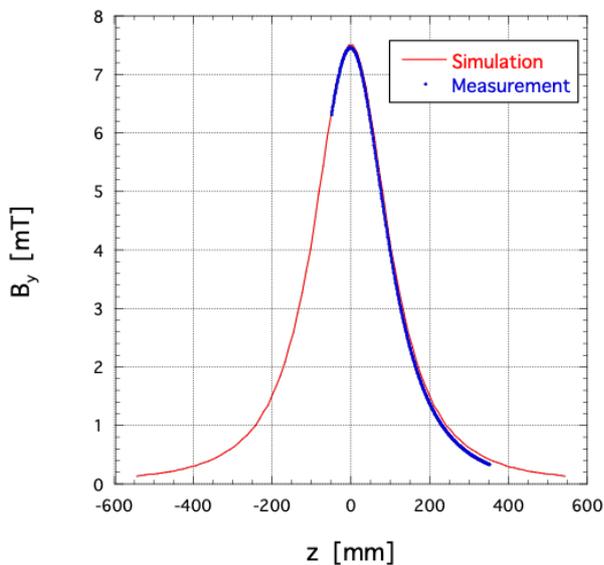


Figure 12: Horizontal steering field (B_y) distribution in longitudinal direction (z).

3.3 温度測定

コイル励磁時の温度をサーモグラフィにより計測した結果を Fig. 13 に示す。設計定格のコイル電流 5 A では水平、垂直とも室温からの表面の温度上昇 ΔT は 10°C 程度であった。また、コイル電流 7 A 時の ΔT は 22°C と

なり、熱解析シミュレーション結果 (Fig. 8) と同程度であった。さらに電流を 10 A に上げると ΔT は 48°C となり、サーモスタット動作温度に近くなったため、電源の出力電流リミットを 10 A 以下に設定する必要があることが分かった。

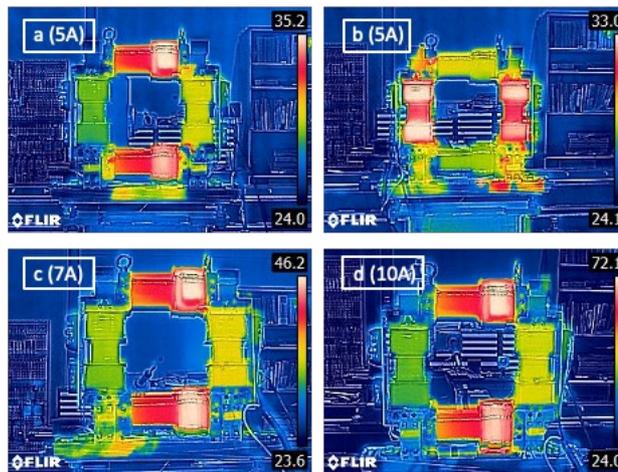


Figure 13: Coil temperature. Coil currents are 5 A at (a) and (b), 7 A at (c) and 10 A at (d), respectively.

4. まとめ

SPring-8-II の ID 光軸調整用 ST 電磁石を試作した。磁場中心を水平方向に 23 mm シフトさせるための磁気回路構造やコイル中間層に銅板を挿入してヒートシンクとする構造を考案し、空間的な制限や隣接電磁石との磁気干渉をクリアしつつ、要求値の 2 倍の磁場強度を達成した。今後は真空機器の最終設計を反映させた ST 実機を設計し、量産に臨む予定である。

謝辞

本ステアリング電磁石の製作にあたり、(有)タカノ技研の高野氏夫妻にはコイル内への放熱板の巻き込み試験やコイル温度測定、ベローズダクトとの干渉を避けたコイル設計などをご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。磁場測定においてはスプリングエイトサービス(株)の竹村、森本両氏にお世話になりました。ここに感謝いたします。

本開発研究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] Dassault Systèmes, CST Studio Suite®, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [3] K. Tamura *et al.*, in Proc. of IPAC'19, Melbourne, Australia, pp. 1272-1275, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP018