

次世代放射光源のための DC セプトム電磁石開発 DEVELOPMENTS OF DC SEPTUM ELECTROMAGNET FOR NEXT-GENERATION LIGHT SOURCES

山口博史^{*A)}, 谷内努^{A)}, 深見健司^{A,B,C)}, 渡部貴宏^{A,B,C)}, 高野史郎^{A,B,C)}, 青木毅^{A)}, 竹村育浩^{D)}

Hiroshi Yamaguchi^{*A)}, Tsutomu Taniuchi^{A)}, Tsuyoshi Aoki^{A)}, Kenji Fukami^{A,B,C)},

Takahiro Watanabe^{A,B,C)}, Shiro Takano^{A,B,C)}, Yasuhiro Takemura^{D)}

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

^{B)}RIKEN SPring-8 Center

^{C)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{D)}SPring-8 Service Co., Ltd. (SES)

Abstract

We developed a DC septum electromagnet for next generation light sources. A high current density in the coils is the common key issue for DC septum magnets, as it results in high power consumption as well as a source of device trouble in long accelerator operation. We designed the DC septum magnet so that the coils are placed away from the median plane, yet the leakage fields are sharply reduced by introducing an iron septum shield. We fabricated the magnet and confirmed that the measured magnetic fields distribution well agree with our numerical simulations.

1. はじめに

次世代の放射光源リングのビーム入射部に設置する DC セプトム磁石の開発を行なった。次世代放射光源のビーム入射部の概念図を Fig. 1 に示す。入射部では、線形加速器で加速した入射ビームを、蓄積リングを周回している蓄積ビームに近づける必要がある。この際、入射ビームの軌道のみ偏向し、蓄積ビームの軌道には影響を与えないことが要求される。この要求を満たすために、入射部の磁石にセプトムと呼ばれる磁気シールドを取り付け、蓄積ビーム軌道上への漏洩磁場を遮蔽する。

次世代放射光源を含む放射光施設には、さらなる利用率の向上が求められている。このためには、電磁石及び磁石電源から故障になり得る要因を取り除き、メンテナ

ンスや部品交換を簡易に行える構造にしなくてはならない。DC 電源はパルス電源よりも熱サイクル等による電磁石及び電源への負荷が小さく、故障が少ないことから、今回の入射部設計では DC 電源のセプトム電磁石を 2 台設置し、入射ビームを蓄積ビームに近づけた上で、最終段のみパルス セプトム電磁石を用いて蓄積ビームに入射する。

現在、SPring-8 や多くの放射光施設の DC セプトム電磁石には、Direct-drive と呼ばれるタイプのものが使用されている [1]。この Direct-drive タイプは、C 型のコア形状をしており、コイルを磁極間ギャップに実装する。このようにコイルを実装すると、ギャップ開口側のコイルがセプトムの役目も担うことになる。コイル内側で生じた磁束は全て磁極に入るために漏れ磁場が抑えられ、同時にギャップ領域に高い平坦度の磁場が得られる。その一方で、DC セプトム電磁石の配置を蓄積ビームに近づけるためにコイルを薄くしたり、磁場を強くするために磁極間ギャップ距離を狭くしようとすると、コイルの断面積が小さくなり電流密度が極端に高くなる。コイル内が高い電流密度の状態では電磁石を運転すると、電磁石電源や冷却水装置に多大な負荷がかかり、故障も頻発することになる。例として、SPring-8 の DC セプトム電磁石では、コイル電流、コイル電流密度がそれぞれ 2740 A、70 A/mm² になる [2, 3]。このような高電流密度で運転すると、電磁石電源の入切時にコイルが熱膨張と熱収縮を起こし、コイルを覆っている絶縁層が磁極と擦れて摩耗する。実際に SPring-8 の DC セプトム電磁石では、この熱サイクルが繰り返されることによってコイル絶縁層が破れ、コイルが磁極に接触して地絡する事象が過去 2 回発生している [4]。この経験から、今回の DC セプトム電磁石の設計では、コイル電流密度を一般的な電磁石と同じ程度の 5 A/mm² 以下にすることを目標に設定した。

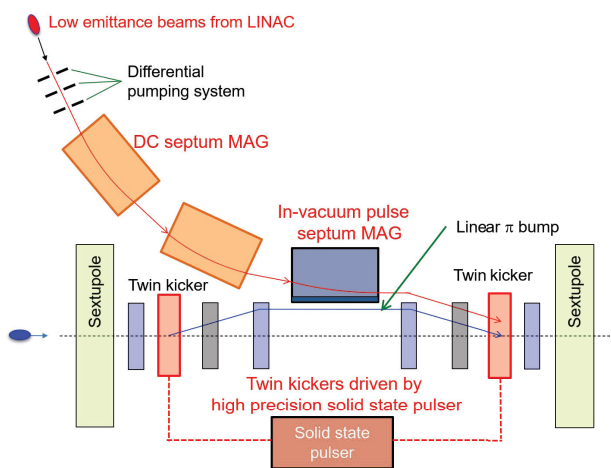


Figure 1: A design of injector section of next-generation synchrotron light source facility.

* hiroshi.yamaguchi@spring8.or.jp

Table 1: Requirement Specifications for DC Septum Magnet in Next-generation Synchrotron Radiation Facility

Magnetic flux density at pole gap	1.2 T
Effective magnet length	400 mm
Gap height	10 mm
Flatness of magnetic field	0.1%
B · L (Injection Beam)	0.48 T · m
B · L (Storage Beam)	$\lesssim 2 \times 10^{-5}$ T · m
Bending radius	8.333 m
Kick angle	48 mrad at 3 GeV
Sagitta	2.4 mm
Distance between injected and stored beam	57 mm
Current density in coils	≤ 5 A/mm ²

2. 設計

本 DC セプトム電磁石の開発に際して、要求される性能及び目標とした仕様を Table 1 に示す。入射ビーム領域の磁束密度は 1.2 T、有効磁場長は 0.4 m となっている。また、入射ビームの真空チェンバー外殻の高さを 8 mm と想定しているため、磁極間ギャップの高さは 10 mm とした。磁石形状は、製作やアライメントの簡易性を考慮し、レクタングュラー型で設計する。磁束密度、有効磁場長から、磁石内の入射ビーム軌道のサジッターは 2.4 mm になる。

DC セプトム電磁石の磁場平坦度の許容量を評価するために、ビーム入射点での軌道変位と角度偏差を見積った。想定される Dynamic aperture に十分に収めるため、入射ビーム領域内の磁場平坦度 $\Delta B/B$ の目標を 0.1% 以下と設定した。磁石断面の設計では、DC セプトム電磁石への入射点からサジッターの幅 2.4 mm の領域に対して磁場平坦度 0.1% を満たすように設計する。

入射ビーム軌道と蓄積ビーム軌道は、DC セプトム電磁石最下流の地点で最も接近するが、その距離は 57 mm を想定した。磁石及び磁気シールドの形状は、入射ビーム及び蓄積ビームの真空チェンバーや、蓄積ビームに設置されるフォトンアップソーパー等の周辺機器と位置が重ならないように設計する。

2.1 電磁石形状

磁石の設計にあたって、始めに Table 1 のコイル電流密度以外の項目を満たす Direct-drive タイプの DC セプトム電磁石を設計した。Direct-drive タイプで本 DC セプトムを設計した場合、コイル電流は 4780 A、コイル電流密度は 80 A/mm² になる。コイル電流密度が目標の 5 A/mm² に対して 16 倍になったことから、Direct-drive タイプでの設計を断念した。また、Massless タイプ [5] や Lambertson タイプ [6] の電磁石も検討したが、磁極表面を高精密な湾曲面にする必要がある等の理由で断念している。

このため、既存の DC セプトム電磁石のトポロジーや、永久磁石で製作したセプトム磁石 [7] を参考に磁石設計を行った。Direct-drive タイプでは、コイルがセプトムも兼ねているためにコイル断面積に制限が掛かり

電流密度が高くなってしまいうことから、本 DC セプトム電磁石ではコイルと別にセプトムを設けることにした。これによって、コイル断面積に制限が掛からなくなったため、Direct-drive タイプでは 120 mm² だった断面積を 2200 mm² に増やし、コイル電流を 232 A まで下げた。

磁石及びセプトムの形状の設計は、入射ビームを蓄積ビームに近づけられるように、漏れ磁場を抑えた上でセプトムの厚みを可能な限り薄くすることを主眼を置き、磁気回路を調整して行った。この設計した磁石のギャップ領域付近の磁力線分布を Fig. 2 に示す。まず、蓄積ビームパイプを入射ビームに近づけられるように、磁気シールドを磁極間ギャップ付近で“<”の形に折り曲げた形状にする。このセプトムを磁石側面に取り付けると、上下磁極間からの漏れ磁場は、一旦磁気シールドに吸い込まれる(以下、“Absorbed flux”と表記、Fig. 2 内の①の磁力線を示す)。一方で、上側磁極に入った磁力線は、磁石鉄芯の上部でヨーク方向とセプトム方向の2つの方向に分岐する。このうち、セプトム側に分岐した磁力線は、セプトムを通して磁極間ギャップ領域に戻ってくる(以下、“Returned flux”と表記、Fig. 2 内の②の磁力線を示す)。この Returned flux は Absorbed flux と方向が反

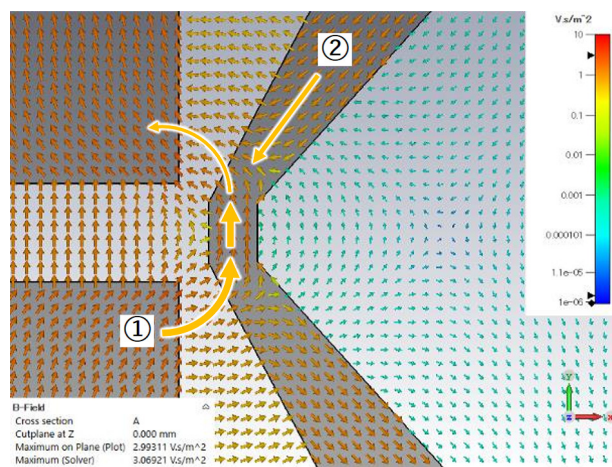


Figure 2: Magnet flux distribution in the DC septum magnet. Fluxes of ① and ② show absolute flux and returned flux, respectively.

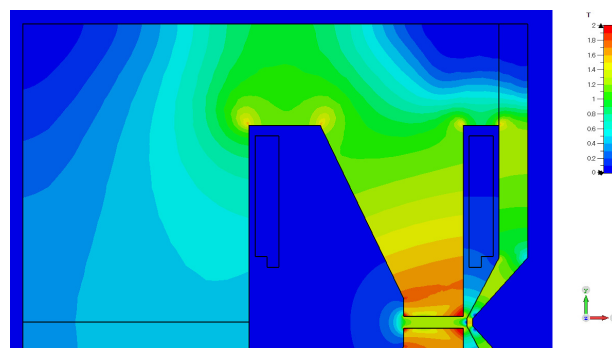


Figure 3: Magnetic flux density distribution in core of DC septum magnet.

対であるため、セプタム内で相殺することになる。セプタムの厚みや位置を調整して、Returned flux と Absorbed flux を同程度の量にすると、セプタム外側の蓄積ビーム軌道上への漏れ磁場が最小になる。磁石及びセプタムの形状の最適化は、シミュレーションコード CST Studio

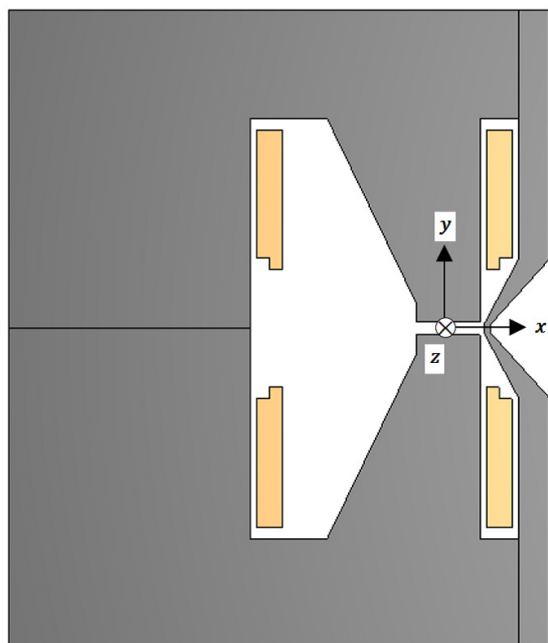


Figure 4: Schematic of cross section view of DC septum magnet.

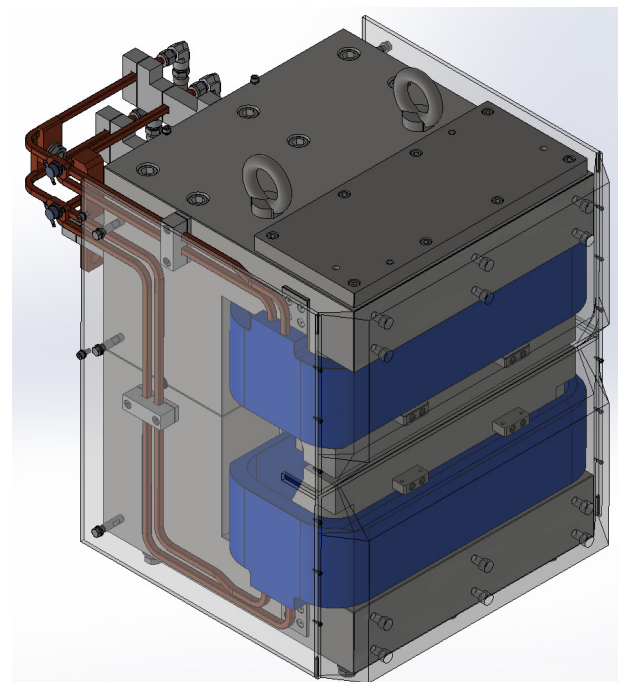


Figure 5: Schematic of DC septum magnet on CAD drawing.

Suite を用いて、磁石の二次元断面上で行った。この最適化の結果、セプタムの磁極ギャップ領域の厚みを 5 mm、磁極とセプタムの距離を 3 mm に設定した。

最後に、磁石内部で磁束密度が飽和しないように、セプタム、磁極、磁石鉄芯の形状を設計する。磁石内の磁束密度を計算すると、特に磁束密度が高い箇所は、磁極、鉄芯とセプタムの締結箇所、セプタムが“<”の形状をしているギャップ領域である。磁極付近は、磁極の幅が狭いため磁力線が集中して飽和が生じている。一方、鉄芯とセプタムの締結箇所とセプタムの屈曲部では、その形状から磁力線の湾曲が鋭角になりがちであり、鋭く曲がった領域に磁力線が集中する傾向がある。この対処として、磁極に関しては、磁極にテーパを設けて、先端以外は可能な限り幅を広くとるように設計した。セプタムは、湾曲している構造の角度を可能な限り緩くしたり、鉄芯締結部の厚みを十分厚くして、磁力線が集中しないようにした。これらの設計によって、磁極先端及び磁気シールドのギャップ領域以外では磁石内で磁束密度が 1.8 T を超えない設計になった。磁石鉄芯内の磁場分布を Fig. 3 に示す。

磁石鉄芯のサイズは、鉄芯内で磁束密度が飽和しない範囲でコンパクトになるように $X 400 \text{ mm} \times Y 500 \text{ mm} \times Z 382 \text{ mm}$ とした。また、磁石のコンパクト化のために、磁極の角をコイル湾曲部の内径に合わせて面取りし、コイルが磁石側面から張り出さないようにした。

このように設計した DC セプタム電磁石の断面図を Fig. 4、3次元 CAD を Fig. 5 に示す。ただし、Fig. 5 では、磁石内部も表示できるようにするため、磁気シールドを半透明で表示している。座標は、Fig. 4 に示したように、磁極中心、磁極間ギャップの中心、有効磁場長方向の磁石中心を原点として、セプタム側への水平方向を x 方向、鉛直方向を y 方向、ビーム進行方向を z 方向と設定している。入射ビームの DC セプタム電磁石入射点は $x = 1.3 \text{ mm}$ に設定した。蓄積ビームと入射ビームは DC セプタム電磁石の最下流点で $x = 57 \text{ mm}$ となる。製作の際、より磁場均一度を高める目的で、リターンヨーク側の磁極間ギャップをプラス公差 ($10^{+0.020}_{-0.000} \text{ mm}$)、セプタム側の磁極間ギャップ間をマイナス公差 ($10^{+0.000}_{-0.020} \text{ mm}$) に製作公差を設定した。これによって、セプタム側のギャップをより狭めるように製作し、ギャップ外側も磁束密度強度を維持するようにした。

2.2 コイル

コイルで生じるジュール熱を適切に排熱するために、ホローコンダクターの形状を設定する。コイルに用いるホローコンダクターは、断面が $W 8 \text{ mm} \times H 8 \text{ mm}$ 、冷却水経路を直径 4 mm とした。上側コイルと下側コイルは電気回路的に直列に接続する。コイルの断面積は、絶縁層を含めて $W 20 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ にし、絶縁層を含めたコイルの製作誤差を考慮して、コイルと磁石鉄芯及び磁気シールドには 5 mm のクリアランスを確保している。コイル巻数は、電流密度が 5 A/mm^2 以下になるように 23 巻に設定した。冷却水経路を除いた導体のみの断面積で求めた電流密度は 4.5 A/mm^2 になる。

このホローコンダクターを使用した場合の冷却水流量

及びコイル温度上昇値を求める。冷却水の流路は、上側コイルと下側コイルごとに2系統とする。冷却水流量 R [ℓ/min] は、冷却水の圧力損失を P [MPa]、冷却水配管直径を D [mm]、コイル長 L [m] を用いて、

$$R = \frac{3}{40} D^{19/7} \cdot \left(\frac{P/0.0980}{L} \right)^{4/7} \quad (1)$$

で計算した。圧力損失、冷却水配管直径、コイル長をそれぞれ $P = 0.15$ MPa、 $D = 4$ mm、 $L = 25.3$ m とすると、流量は $R = 0.65$ ℓ/min になる。コイルで発生するジュール熱は、コイル長、コイル電流、コイルに使用される銅の電気抵抗率から 1.1 kW と計算できるので、コイルの温度上昇は 12 K になる。この温度上昇であれば、DC セプタム磁石を安定的に運転することができると判断している。

3. 磁場分布

設計した DC セプタム電磁石の磁束密度分布を CST Studio Suite を用いて評価した。また、この設計に基づいて DC セプタム電磁石を製作 (金属技研株式会社、Hanmitech 社) し、実際の磁束密度分布を測定した。製作した DC セプタム電磁石を Fig. 6 に示す。測定には、ガウスメータ (Lake Shore 社製 M460) と、一軸ホールプローブ (Lake Shore 社製 MMT-6J18-VH-06) を使用し

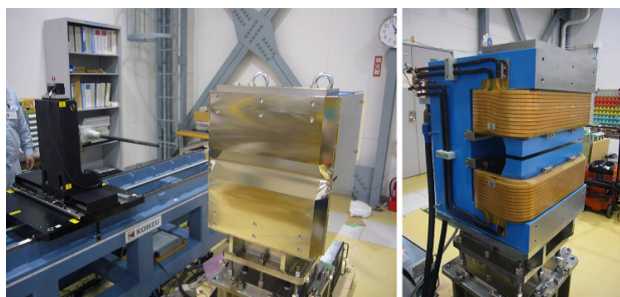


Figure 6: Photographs of the DC septum with septum and magnetic shield (left) and without the shield (right).

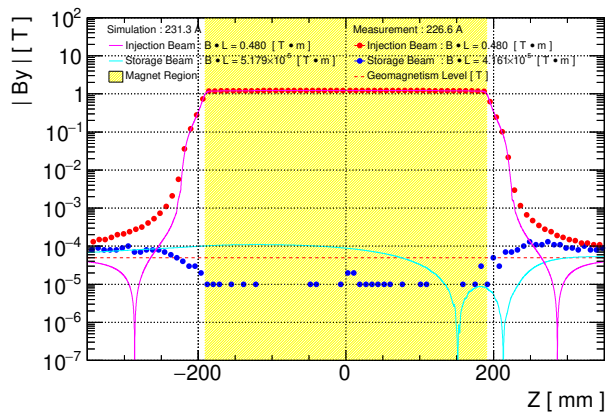


Figure 7: Magnetic flux distributions along injection and storage beam trajectories.

た。入射ビーム軌道は、CST 上で磁石端での入射位置を $x = 1.3$ mm、電磁石に対する入射角を 24 mrad になるように電子を設定して軌道座標を計算し、実際の DC セプタム電磁石におけるその座標上の磁束密度をホールプローブで測定した。

入射ビーム上及び蓄積ビーム軌道上の磁束密度分

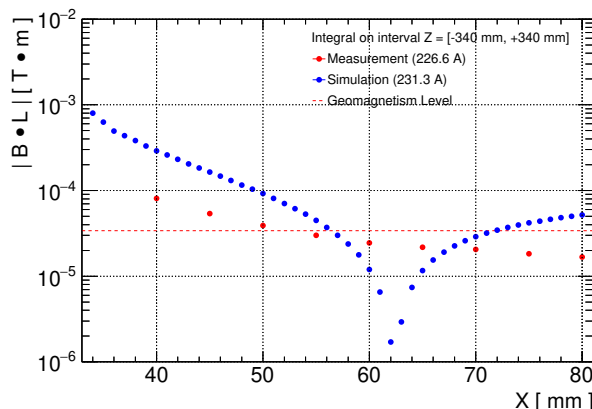


Figure 8: Absolute $B \cdot L$ distributions as a function of x . Integral path is set to be z -axis.

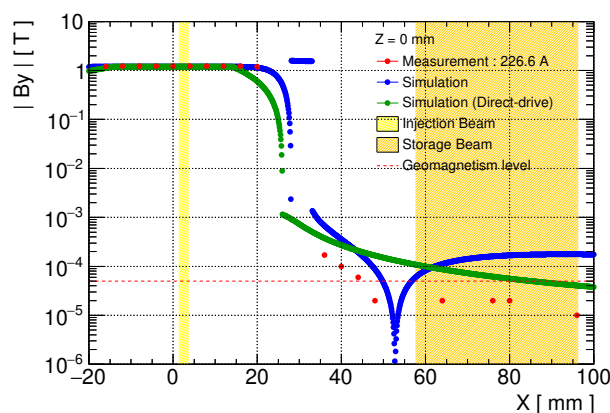


Figure 9: Magnetic flux distributions along x -axis.

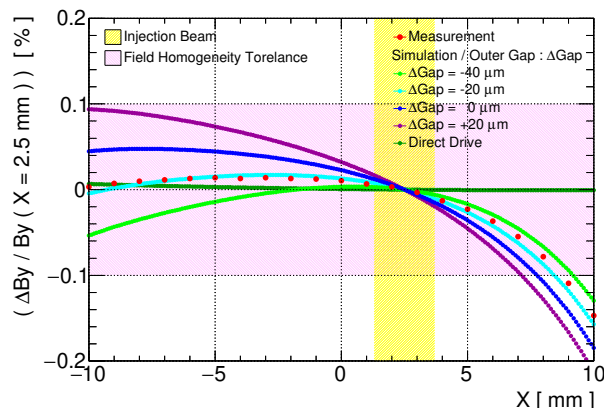


Figure 10: Magnetic flux homogeneity along x -axis.

布を Fig. 7 に示す。入射ビーム軌道上では、起磁力 $5212 \text{ A} \cdot \text{T}/\text{pole}$ の時に $B \cdot L$ 積 $0.48 \text{ T} \cdot \text{m}$ を満たす。この時、コイル電流は 226.6 A 、電流密度は $4.4 \text{ A}/\text{mm}^2$ であり、目標であった $5 \text{ A}/\text{mm}^2$ 以下を達成している。一方、蓄積ビーム軌道上の $B \cdot L$ 積は $4 \times 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m}$ であり、地磁気レベルである $2 \times 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m}$ と同じ桁まで磁場の影響が抑えられている。また、この測定時の冷却水流量は $2 \text{ l}/\text{min}$ に設定した。その際のコイルの温度上昇は 6 K であった。

蓄積ビーム軌道はキッカー磁石の調整によって軌道が変わるため、蓄積ビーム軌道が変化した場合でも DC セプタム電磁石の漏れ磁場が影響しないことを確認するために、セプタム外側領域の磁束密度の z 方向積分を測定した。磁極間ギャップ中心 ($y = 0 \text{ mm}$) での z 方向磁束密度積分 $B \cdot L$ の測定結果及び計算結果を、 x の関数として Fig. 8 に示す。セプタムの最外側は $x = 33 \text{ mm}$ である。測定結果の $B \cdot L$ は $x \geq 40 \text{ mm}$ の領域で $10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}$ まで落ちており、地磁気と同じ桁まで減衰している。従って、蓄積ビーム軌道が多少変動しても、DC セプタム電磁石の漏れ磁場の影響は無視できる。

磁極間ギャップ中心かつ有効磁場長方向中心 ($y = 0 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$) の x 方向の磁束密度分布を Fig. 9 に示す。入射ビーム領域には所定の 1.2 T の磁束密度が印加されている。一方で、蓄積ビーム領域の磁束密度分布は $\sim 10^{-4} \text{ T}$ となり、地磁気レベルの数倍程度まで抑えられている。

磁極ギャップ領域 ($y = 0 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$) の x 方向磁場平坦度を Fig. 10 に示す。 $x = 2.5 \text{ mm}$ の磁束密度を基準として、この地点の磁束密度からの変位を示している。また、磁極が傾いた場合の磁場分布の変位も Fig. 10 に示している。これは、リターンヨーク側の磁極ギャップ幅を 10 mm で固定し、セプタム側のギャップ幅を $10 + \Delta\text{Gap}$ に設定して、上側磁極表面を傾けた状態で計算した場合の磁束密度分布である。測定した入射ビーム領域 (入射点 $x = 1.3 \text{ mm}$ からサジッター 2.4 mm の幅) の磁場平坦度は 0.016% であった。本 DC セプタム電磁石では、磁気シールドが漏れ磁場を積極的に吸収するため、セプタム側の磁束密度が低くなり、逆にヨーク側の磁束密度は高くなる。従って、Direct-drive タイプよりも磁場平坦度が悪化しているが、要求される磁場平坦度 0.1% を満たしており使用には問題ない。測定値の分布と計算値との比較から、今回製作した DC セプタム電磁石の磁極はセプタム側のギャップ間隔が $20 \mu\text{m}$ 狭まっていると考えられる。製作公差は、 $-40 \mu\text{m} \leq \Delta\text{Gap} \leq 0 \mu\text{m}$ に相当するので、この公差内で製作されていることが確認できた。

以上の結果から、本設計の DC セプタム電磁石は Table 1 の要求を全て満たし、次世代放射光源入射部に使用可能であることを示した。さらに蓄積ビームへの影響を抑えるために、蓄積ビームパイプを厚み $100 \mu\text{m}$ 程度の磁気シールドで覆うことを検討している。

4. まとめ

次世代放射光源の加速器入射部に使用する DC セプタム電磁石の設計を行った。磁極ギャップ領域で“<”の形をしたセプタムを磁石の外側に取り付け、磁石及びセプ

タムの形状を最適化することで、漏れ磁場を地磁気レベルまで抑制した。また、このセプタムを取り付けることでコイル断面積を増やすことが可能となり、Direct-drive タイプの DC セプタム電磁石と比較してコイル電流密度を $1/17$ 倍にした。実際に本設計の DC セプタム電磁石を設計し磁場を測定したところ、DC セプタム磁石へ要求される項目を全て満たしており、次世代放射光源入射部に使用可能なことを示した。

謝辞

製作に際して、理化学研究所 放射光科学研究センターの御協力を賜りました。感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] M. J. Barnes, J. Borburgh, B. Goddard, M. Hourican, “Injection and extraction magnets: septa”, arXiv:1103.1062 (2009).
- [2] K. Kumagai, S. Matsui, “The Injection Septum Magnets of the SPring-8 Storage Ring”, IEEE Trans. Mag. 30. 2134. (1994).
- [3] K. Tsumaki, T. Shimada, K. Kajimoto, H. Yonehara, N. Kumagai, “DC Septum Magnets and Their Leakage Field Effects on an Electron Beam in the SPring-8 Storage Ring”, IEEE, Tans Appl. SUP. 14. 2 (2004).
- [4] RIKEN, JASRI, “SPring-8-SACLA Annual Report”; http://www.spring8.or.jp/pdf/ja/ann_rep/15/016.pdf (2015).
- [5] Y. Yonemura, T. Adachi, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, A. Muto, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, T. Uesugi, A. Yamazaki, T. Yokoi, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, M. Matoba, K. Koba, “Beam Extraction of the POP FFAG with a Massless Septum”, Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, 1679 (2003).
- [6] M. Abliz, M. Jaski, A. Xiao, U. Wienands, H. Cease, M. Borland, G. Decker, J. Kerby, “Septum Magnet Design for APS-U”, Proceedings of 2016 North American Particle Accelerator Conference, 1231 (2016).
- [7] T. Taniuchi, T. Watanabe, S. Takano, T. Aoki, K. Fukami, S. Matsubara, K. Yanagida, K. Hamato, J. Kataoka, K. Ogata, Y. Saito, K. Kusano, “dc septum magnet based on permanent magnet for next-generation light source”, Phys. Rev. Accel. Beams., 23, 012401 (2020).