

## 永久磁石による DC セプタムの開発

### DEVELOPMENT OF PERMANENT MAGNET BASED DC SEPTUM

高野史郎<sup>#A)</sup>, 渡部貴宏<sup>A)</sup>, 深見健司<sup>A)</sup>, 谷内努<sup>B)</sup>, 原徹<sup>C)</sup>, 田中均<sup>C)</sup>,  
草野邦宏,<sup>D)</sup> 濱登<sup>]</sup> 広<sup>D)</sup>, 尾形敢<sup>]</sup> 郎<sup>D)</sup>, 齋藤喜之<sup>D)</sup>, 片岡淳<sup>D)</sup>

Shiro Takano<sup>#A)</sup>, Takahiro Watanabe<sup>A)</sup>, Kenji Fukami<sup>A)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>B)</sup>, Toru Hara<sup>C)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>C)</sup>,  
Kunihiro Kusano<sup>D)</sup>, Kazuhiro Hamato<sup>D)</sup>, Kanichiro Ogata<sup>D)</sup>, Yoshiyuki Saito<sup>D)</sup>, Jun Kataoka<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>JASRI/RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup>JASRI

<sup>C)</sup>RIKEN SPring-8 Center

<sup>D)</sup> TOKIN Co.

#### Abstract

Main requirements for beam injection of next-generation storage ring light sources are 1) a smaller injection beam amplitude, 2) smaller perturbations to stored beam, and 3) topping up functionality. For the SPring-8 upgrade, renewal plan to inaugurate a next-generation storage ring light source, we are developing a new beam injection system based on renovation of an off-axis beam injection scheme. A permanent magnet based DC septum is one of the key components for the new beam injection system, which leads to low construction and running costs, and high energy efficiency. A prototype of the DC septum has been designed and produced, and performance verification is in progress.

#### 1. はじめに

次世代のリング型光源では、更なる高輝度を実現する低エミッタンス化に向け克服すべき大きな課題として、リングの狭小な動的安定領域へのビーム入射の問題がある。我々は、次世代光源として検討を進めている SPring-8-II[1]を含む新しいリング型加速器への適用を視野に入れ、1)ビーム入射振幅の低減(小振幅入射)、2)蓄積ビームの基本性能への影響の抑制(入射の透明性)、3)トップアップ運転(積上げ自在な繰り返し入射)を可能とし、4)同時に新しい技術や材料の導入により建設コスト並びに運転コストの圧縮(省エネルギー化)を図るため、従来の off-axis 入射システムを構成要素から徹底的に見直した新しい off-axis 入射スキーム(真空封止無振動 off-axis 入射スキーム)を提案した[2]。

真空封止無振動 off-axis 入射スキームを実現する上で、1)永久磁石による DC セプタム磁石、2)真空封止パルスセプタム磁石、3)高精度固体パルス電源駆動ツインキッカー磁石[3]が、それぞれ、省エネルギー化、小振幅入射、入射の透明性の鍵を握る主要開発項目となる。我々は、昨年より次世代リング型光源実現のための共通の要素技術開発として、これら3項目のプロトタイプ機の開発を開始した。

本稿では、真空封止無振動 off-axis 入射スキームを構成する主要磁石の一つである永久磁石による DC セプタム磁石の開発に関して、SPring-8-II に向けた永久磁石による偏向磁石開発[4,5]の成果に基づき磁気回路を設計し試作機を製作した結果と、今後の課題について報告する。

#### 2. 開発仕様

永久磁石による DC セプタム磁石の開発仕様を Table 1 に示す。次世代のリング型光源のビーム入射のための

Table 1: Specifications of the Permanent Magnet Based DC Septum

Parameters	Specification
B [T]	1.2
Magnet length [m]	0.4
Kick angle [mrad]	24@6GeV
Magnet gap [mm]	10
Beam separation [mm]	30
Injected and bumped beam	
Integrated stray field [T.m]	$1 \times 10^{-5}$
Difference of stored and bumped orbit	

要素技術となる汎用性のある入射用磁石とするため、6GeV で検討が進められている SPring-8-II への適用を視野に入れるとともに、3GeV クラスの中型光源への展開を想定して、目標性能を決定した。積分磁場強度は 6GeV の入射ビームに対して十分な偏向角が得られること、磁場長は中型光源リングのコンパクトなビーム入射部に収まることを考慮した。また、漏れ磁場に関しては、入射の透明性(蓄積ビームの振動抑制)の観点から、目標性能を設定した。

<sup>#</sup> takano@spring8.or.jp

### 3. 磁気回路設計

我々は、これまでに次世代光源を目指す SPring-8-II に向けて永久磁石による偏向磁石の開発を進めて来た [4,5]。この中で、永久磁石を加速器の主磁石として実用化する上で大きな課題であった、磁場調整機構、磁場の温度変化の補償、放射線による減磁への対策等の研究に取組み、課題を解決した。永久磁石による DC セプタム磁石を開発するために、これらの研究で得た知見に基づき基本設計を行い、入射ビームの偏向に必要な磁場強度の実現と蓄積ビーム軌道への漏れ磁場抑制を両立させる磁気回路の設計を行った。

永久磁石による DC セプタム磁石の磁気回路を Figure 1 に示す。赤色の部分が永久磁石、緑色の部分が鉄材、黄色の部分が温度補償に用いられる整磁合金である。

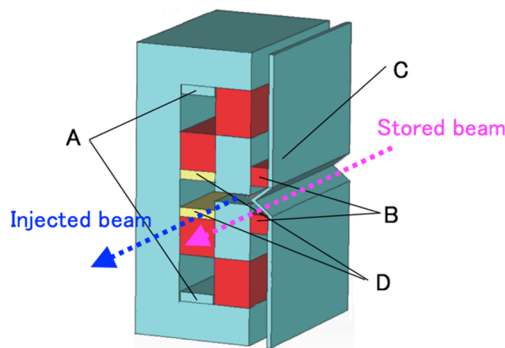


Figure 1: Magnetic circuit of the DC septum. A: field adjustment plates, B: counter magnets for stray field suppression, C: septum plate, D: Fe-Ni shunt alloy.

Figure 1 では、入射ビーム用並びに蓄積ビーム用の真空ダクトが省かれているが、磁極ギャップ内に入射ビームが、セプタム板の右側を蓄積ビームが通る配置となる。Figure 1 の磁気回路において、A は磁場調整用プレートを示す。磁場調整用プレートを上下に動かすことにより、磁極ギャップ中の磁場強度を変えることができる。B は漏れ磁場打消し用の磁石を示す。上下の打消し用磁石による磁気ループが、蓄積ビーム側で漏れ磁場と逆向きの磁場を生じることにより漏れ磁場が抑制される。C はセプタム板を示す。D は、整磁合金と呼ばれる Fe と Ni の合金で、永久磁石による磁束をシャントすることで磁極ギャップ内の磁場の温度変化を補償する。放射線減磁対策の観点から、永久磁石素材としてサマリウムコバルト磁石を選択するとともに、パーミアンス係数を極力高くするよう留意した。磁気回路の各部の詳細寸法は、CST STUDIO SUITE[6]を用いて 3 次元シミュレーションを行い決定した。

### 4. 試作機製作

前章で述べた磁気回路設計を元に、試作機製作のために、機械設計等の詳細設計を行った。永久磁石にはトーキン製サマリウムコバルト ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) 磁石 LM-32SH (Br>1.12T, HcB>795kA/m) [7]を採用した。磁場調整プレートの駆動については、手動操作によることとしたが、モータを取付け自動化するための拡張性に留意した。

永久磁石による DC セプタム磁石の機械設計・詳細設計には、これまでの電磁石製作の経験が生かされたが、磁石製作の上で永久磁石が電磁石と大きく異なる点は、磁力に対する配慮が安全上必要不可欠である点である。組立のための工具は非磁性工具を用いることとした。また、永久磁石の吸引・反発力の対策のため、組立の各工程において必要に応じて専用の治具を準備した。

永久磁石による DC セプタム磁石を次世代リング型光源の入射用磁石として実用化するためには、磁場性能の安定化並びに長期変動に対する磁場モニターが重要である。磁場性能の安定化のために、放射線による減磁並びに経年的な減磁への対策として、着磁後の永久磁石に対し熱枯らしと呼ぶ高温での熱処理を施した。また、磁場変化のモニタリングのために、ヨーク内にスロットを設けて NMR センサ等で磁場の安定度を測定可能な構造とした。

完成した永久磁石による DC セプタム磁石の試作機を Figure 2 に示す。ビームの入射側及び出射側の端面には、非磁性のプレート(端板)を取付けている。上下に取り付けられた黒いハンドルは、磁場調整用プレートの位置を変えるための操作ハンドルである。



Figure 2: Prototype of the DC septum.

完成した DC セプタム磁石試作機の基本性能を確認するため、ホール素子を用いて、磁極ギャップ内の磁場分布並びに磁場調整プレートによるギャップ内磁場の変化を測定した。磁極ギャップ内の入射ビーム軸に沿った磁場分布を Figure 3 に示す。目標とする磁場強度並びに積分磁場が概ね達成されていることが確認された。磁場調整プレートを動かして測定したギャップ内磁場の変化を Figure 4 に示す。調整用プレートを用いることにより、当初の設計のとおり約 3.7%の範囲でギャップ内の磁場強度を調整可能であることが確認された。永久磁石の着磁のパラツキにより生じる設計磁場からの誤差を吸収するための調整を行う上で、十分な調整範囲が達成されたと考えている。より詳細な磁極ギャップ内の磁場分布測定並びに漏れ磁場測定を含む DC セプタム磁石の性能検証は、今後、次節で述べる 3 次元磁場測定システムを用いて実施する予定である。

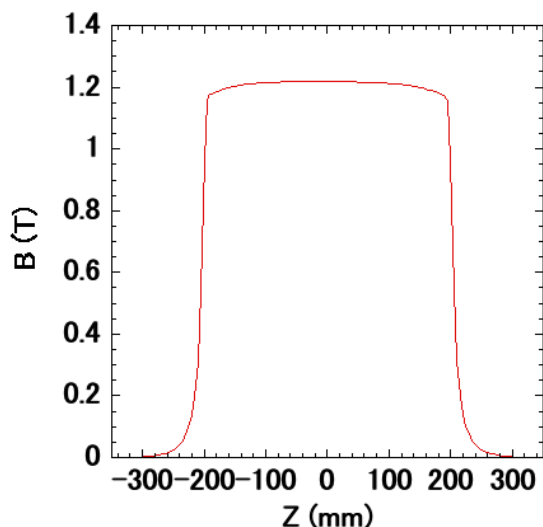


Figure 3: Measured field distribution of the DC septum.

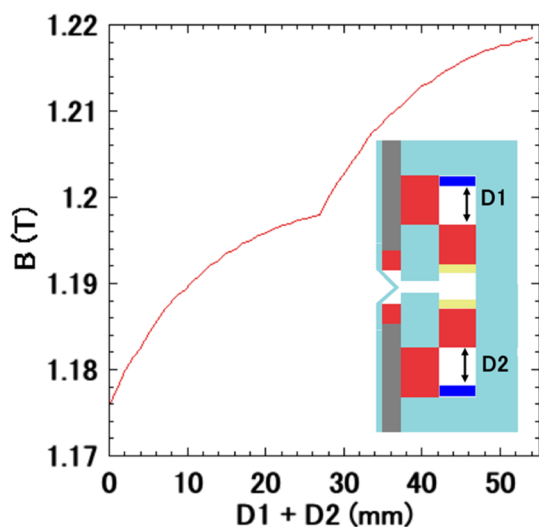


Figure 4: Measured magnet field in the gap by moving the adjustment plates.



Figure 5: Three-dimensional magnetic field measurement system.

Table 2: Specifications of the Three-Dimensional Magnetic Field Measurement System

Parameters	Specification
Stage travel X (Horizontal) [mm]	400
Stage travel Y (Vertical) [mm]	200
Stage travel Z (Longitudinal) [mm]	2000
Position resolution [ $\mu\text{m}$ ]	<10
Repeatability [ $\mu\text{m}$ ]	<1
Straightness (pitch, yaw and roll) [ $\mu\text{rad}$ ]	<100

## 5. 3次元磁場測定システム

今回試作機が完成した永久磁石によるDCセプタム磁石をはじめ、今後開発を進めプロトタイプ機を試作する次世代リング型光源のための入射用磁石(真空封止パルスセプタム磁石、ツインキッカー磁石)[2]について、総合的な磁場性能を測定し入射用磁石としての性能を検証するために、3次元磁場計測システムを製作した。3次元磁場測定システムの仕様を Table 2 に、外観を Figure 5 に示す。この装置は、磁場測定用のプローブを駆動する3軸の精密ステージから構成され、各軸を  $10\mu\text{m}$  以下の分解能及び  $1\mu\text{m}$  以下の繰返し再現性にて駆動することが可能である。DCセプタム磁石の性能評価には、駆動部にホール素子を取付け、パルスセプタム磁石やツインキッカー磁石の性能評価には、サーチコイル等必要な磁場プローブを取り付けて使用する。

既にホール素子を用いる自動測定のためのプログラム整備が完了し、今後は完成した永久磁石によるDCセプタム磁石の試作機について、磁極ギャップ内の磁場分布並びに漏れ磁場分布等を詳細に測定し、次世代光源リングの入射用磁石としての性能検証を行う予定である。

## 6. まとめと今後の課題

次世代リング型光源のビーム入射部に用いるため、永久磁石によるDCセプタム磁石を開発した。SPRING-8-IIに向けた永久磁石による偏向磁石の研究開発から得られた知見を元にした磁気回路設計、電磁石製作の経験を生かした機械設計・詳細設計を行い、試作機を完成させた。試作機の基本性能確認のため、磁極ギャップ内の磁場分布並びに磁場調整プレートによるギャップ内磁場の変化を測定し、設計どおりの性能が達成されていることを概ね確認した。

今後は、温度補償に用いる整磁合金の調整及び温度補償の確認を行うとともに、整備を終えた3次元磁場測定システムを用いて、磁極ギャップ内の磁場分布並びに漏れ磁場分布等を詳細に測定し、次世代リング型光源の入射用磁石としての性能検証を行う。

## 謝辞

本研究は、文部科学省の競争的資金「次世代加速器要素技術開発プログラム」からの委託事業として実施した。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “SPring-8 upgrade project”, WEPOW019 in Proc. of IPAC2016, (2016).
- [2] S. Takano *et al.*, “Novel off-axis beam injection scheme for next-generation storage ring light sources”, WEP011 in these proceedings.
- [3] H. Akikawa *et al.*, “Development of high-precision solid state pulse power supply for the kicker magnet of the next-generation electron storage ring”, WEP069 in these proceedings.
- [4] T. Watanabe *et al.*, “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources”, Phys. Rev. Accel. Beams in press.
- [5] T. Taniuchi *et al.*, “Status of permanent dipole magnet development for SPring-8-II”, TUOM04 in these proceedings.
- [6] <http://www.cst.com/>
- [7] [https://www.tokin.com/product/pdf\\_dl/eikyu\\_jisyaku.pdf](https://www.tokin.com/product/pdf_dl/eikyu_jisyaku.pdf)