

## あいち SR における永久磁石型モデル偏向磁石の開発と精密磁場測定

### DEVELOPMENT AND PRECISE MEASUREMENT OF PERMANENT DIPOLE MODEL MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING

濱田涼<sup>#,A)</sup>, 福江修平<sup>A)</sup>, 保坂将人<sup>B)</sup>, 持箸晃<sup>B,A)</sup>, 高嶋圭史<sup>A,B)</sup>,  
真野篤志<sup>B)</sup>, 林憲志<sup>C)</sup>, 藤本将輝<sup>C)</sup>, 加藤政博<sup>C,B)</sup>

Ryo Hamada<sup>#,A)</sup>, Shuhei Fukue<sup>A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Akira Mochihashi<sup>B,A)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>A,B)</sup>,  
Atsushi Mano<sup>B)</sup>, Kenji Hayashi<sup>C)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>C)</sup>, Masahiro Katoh<sup>C,B)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>B)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

<sup>C)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

#### Abstract

In Aichi-SR, we have designed a permanent dipole magnet to replace the electric dipole magnets in future. In the simulation, we have achieved required performance. To confirm this, we have fabricated 1/5 scale prototype magnet. A field measurement system using a 3D gauss meter has been constructed. A preliminary result from the field measurement is shown.

#### 1. はじめに

省エネルギーは地球規模の課題であり、加速器分野においても、将来に向けて取り組むべき重要な課題となっている。特に次世代加速器においては設計上の重要な要求事項となっている。既存の加速器施設においても、ランニングコストの低減に結びつくことから、老朽化・高度化に向けた改造の際に積極的に検討すべき事項である。あいち SR では、4 台の超伝導偏向電磁石と 8 台の常伝導偏向電磁石を用いており、そのうち常伝導偏向電磁石の冷却システムも含めた消費電力は、あいち SR 加速器システムの消費電力の 3 割程度を占めている。電磁石と比べ、永久磁石は電力が不要なため省エネ効果が期待される。加えて、コンパクト化、メンテナンス減少など多くの利点もあげられる。先行研究として、SPring-8 の将来計画である SPring-8 II 計画においては、永久磁石型偏向磁石の導入が検討されており、試作品の製作とその性能評価が行われている[1]。温度依存性、放射線減磁、製造コストなどが検討課題とされており、加速器の信頼性、安定性の向上にはこれらの課題解決は不可欠である。

そこで、我々はあいち SR において現行の電磁石に取って代わる永久磁石を用いた偏向磁石の開発を行っている。これまでに、Table 1 に示した設計要件をもとに永久磁石材料および磁石形状についての検討を行い、永久磁石型偏向磁石を設計した[2]。この設計をもとに、永久磁石型偏向磁石のプロトタイプを作製し、その性能評価を行なっている。

Table 1: Required Parameters for Permanent Dipole Magnet

Magnetic flux density	1.4 T
Good field region	±30 mm
Gap	50 mm
Effective length	1945.6 mm

#### 2. 永久磁石型偏向磁石の設計

ここでは永久磁石型偏向磁石の概略を述べる。なお、永久磁石型偏向磁石の設計の詳細は参考文献[3]に述べられている。永久磁石としては良好な磁気特性を有するネオジウム磁石を用いた。使用するネオジウム磁石は NEO-MAX<sup>®</sup>: NMX-48BH、ヨーク材は高純度鉄 SSM-250 と仮定した。NMX-48BH の 20°C における残留磁束密度はおよそ 1.39 T である。

設計された偏向磁石の断面図と発生する磁力線の PANDIRA[4]による計算結果を Figure 1 に示す(赤矢印は磁化容易軸)。台形の断面形状を持つネオジウム磁石を隙間なくヨーク内に配置し、3 方向から磁力線を集めることで、磁力線を電子軌道上に集中させる磁気回路を設計した。また、リターンヨーク部分は鉄材が飽和してしまわないよう、必要十分な幅を確保するよう設計された。

Figure 1 で示した磁石モデルについて、電子軌道上の磁束密度とその均一度を定量的に評価した。シミュレーションの結果、電子軌道上の最大磁束密度は 1.497 T であり、その有効範囲は 0.1% の範囲誤差で ±32.4 mm であった。以上の結果、上記モデルはあいち SR 蓄積リング導入のための設計条件を満たしていることを確認した。

# hamada.ryo@i.mbox.nagoya-u.ac.jp

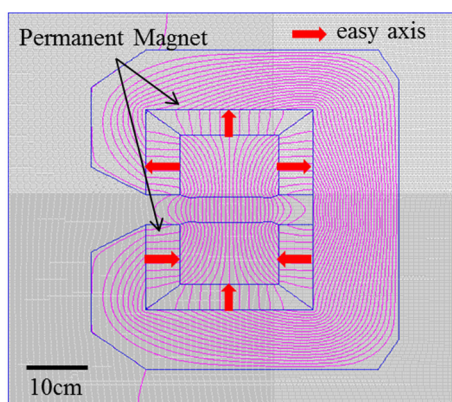


Figure 1: Cross section of the permanent dipole magnet.

### 3. 試作機の作製

試作機の設計、作製についても、その詳細は文献[3]に述べられている。試作機の製作の目的は電子軌道上磁場分布およびその有効範囲のシミュレーション結果との比較、温度依存性とその補償方法の検討である。Table 2 に試作機で必要とされる設計要件を示す。

Table 2: Required Parameters for the Prototype Magnet

Magnetic flux density	1.4 T
Good field region	± 6 mm
Gap	10 mm
Effective length	389 mm

形状は実機が sector 型であるのに対して、試作機は作成しやすい rectangular 型とした。ここで縮尺を変えた永久磁石から成る磁石の磁場分布について説明する。

磁性体の磁氣的性質を司る磁化電流密度  $i$  は、磁化  $M$  を用いて次のように定義できる。

$$i = \nabla \times M \quad (1)$$

縮尺  $1/k$  とした場合の磁化電流密度  $i'$  は、

$$i' = \nabla' \times M = k \nabla \times M = ki \quad (2)$$

と表せる。ビオ・サバルの法則より距離  $r$  における磁場は

$$dH = \frac{Idl}{4\pi r^2} = \frac{idV}{4\pi r^2} \quad (3)$$

となり、縮尺  $1/k$  においては、距離  $r/k$  における磁場は

$$dH' = \frac{i'dV'}{4\pi (r/k)^2} = \frac{ki}{4\pi} \frac{dV}{(r/k)^2} = dH \quad (4)$$

である。したがって、縮尺を変更しても、対応する位置における発生磁場は等しいと分かる[5]。これより、試作機を縮小モデルとしても実機の目標磁場性能評価は可能であると判断した。Figure 2 に試作機の断面図を示す。永久磁石はネオジウム系の磁石である NMX-46CH を使用した。これは入手が比較的容易であることから選んだ。ヨーク材料は実機でシミュレーションを行った SSM250 に比べ透磁率や飽和磁束密度が遜色なく、入手しやすい SS400 とした。詳細設計および製作は(株)NEOMAX エ

ンジニアリングに依頼して行なった。作成した試作機を Figure 3 に示す。

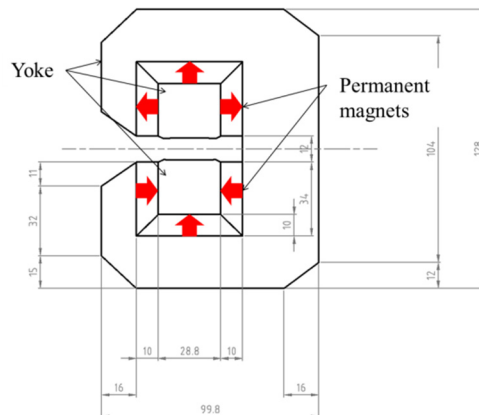


Figure 2: Cross section of prototype magnet.

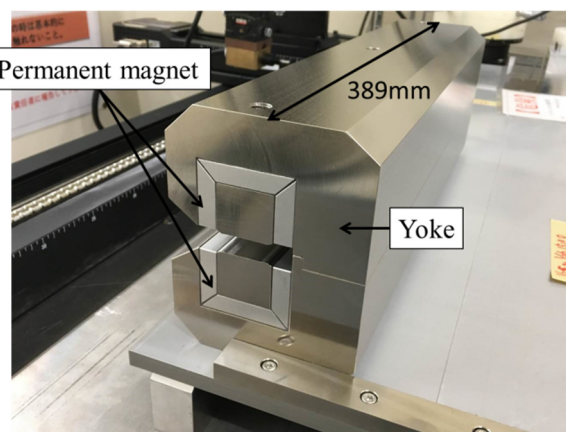


Figure 3: Prototype of permanent magnet.

### 4. 磁場測定

#### 4.1 測定方法

詳細な磁場測定のため、自動駆動式磁場測定系を構築した。自動駆動式磁場測定系は、シグマ光機株式会社製自動ステージ、同社製ステージコントローラ、Lake Shore Cryotronics 社 ハイエンド 3 軸ガウスメータ 460 型、同社製 MMZ-2512-UH 型 3 軸プローブおよび PC で構成されている。自動ステージとステージコントローラ、また、シリアル通信によってステージコントローラと PC を接続し、自動ステージに固定した 3 軸プローブの位置を PC 上で制御することとした。さらに、3 軸プローブと 3 軸ガウスメータ、3 軸ガウスメータと PC を接続することで、3 軸プローブが測定位置で取得したデータを PC 内のファイルに保存するよう制御した。PC 上では LabVIEW(グラフィック型言語によってプログラムするソフトウェア)を用いた。測定は、3 軸プローブを一定距離移動させ、振動の影響を避けるために 5 秒間待機させたのちデータを取得・保存させ、再度プローブを移動させ以降同じことを指定した回数繰り返させるように制御プログラムを構築した。磁場測定中の試作機の温度を測定するため、試作機本体

に3つ、また室温測定に1つの K 型熱電対を使用し、グラフテック社 データロガーGL820 にて温度を記録した。試作機とホールプローブのアライメントは、試作機中のビーム軌道上を水平にホール素子が移動するよう、水平レーザーを用いて試作機並びに移動ステージの設置位置と角度を調節した。

#### 4.2 測定結果

まず、測定装置の測定誤差を調べるために、永久磁石のある電子軌道位置でプローブ位置を変えずに 100 回繰り返して磁場測定を行った。その結果を Figure 4 に示す。Figure 4 から分かるように、測定値は離散的な値を取っており、ノイズなど測定誤差よりもデジタル化されたデータの分解能が影響を与えていることが分かった。

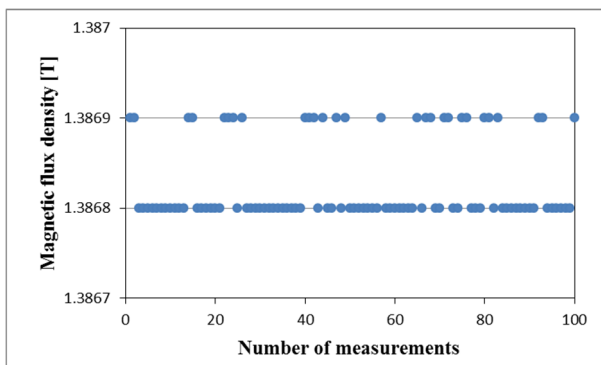


Figure 4: Repeated measurement of magnetic flux density at the same position (5 seconds per a measurement).

今回の磁場測定は永久磁石のビーム方向の中心軸上について行った。永久磁石がある範囲は $-194[\text{mm}] \leq \text{Position} \leq 194[\text{mm}]$ である。今回の測定時の磁石の温度は  $26.5^{\circ}\text{C}$  であった。測定結果を Figure 5 に示す。

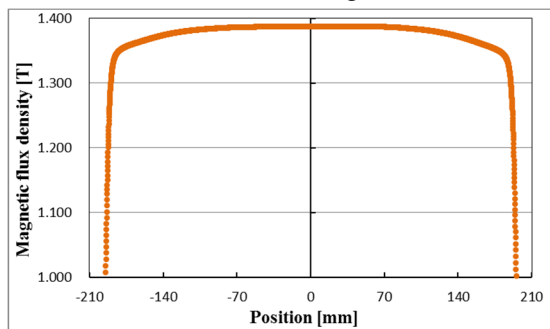


Figure 5: Measured magnetic flux density of the prototype magnet.

磁場強度は中心で値が最も大きく  $1.387[\text{T}]$  であった。磁石端に近い  $\pm 184[\text{mm}]$  付近での磁場強度は  $1.343[\text{T}]$  であり、中心付近と比較すると、3.2%低いことがわかる。また、 $\pm 70[\text{mm}]$  付近での磁場強度は  $1.386[\text{T}]$  であり、中心付近での値から 0.07%程度低いことが分かった。今回の測定では磁場の最大値は  $1.387[\text{T}]$  で、必要とされる値  $1.4[\text{T}]$  よりも 1%ほど小さい結果となった。これは出荷時の磁場測定結果と比べ有意に低い値である。製造から約半年が経過しているが、これがもし減磁によるものとする重大な問題であり、今度、測定環境温度、測定器の校正といった計測上の問題の有無を慎重に検証していく。

#### 5. 今後の展望

今後は、温度を人為的に変化させて磁束密度の変化を測定し、永久磁石の温度依存性について評価し、その補償方法の開発を進めていく。補償コイルによるハイブリッド型偏向磁石のシミュレーションをもとに、試作機にコイルを装着し、その効果を確認する実験を検討している。また、磁場の経年変化の有無についても、測定装置の信頼性を高めながら磁場測定を継続し、解明していく。

#### 参考文献

- [1] T. Taniuchi *et al.*, Proc. of IPAC 2015, Richmond, USA, p. 2883 (2015).
- [2] S. Fukue *et al.*, "DEVELOPMENT OF PERMANENT DIPOLE MAGNET FOR AICHI SR STORAGE RING", Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.1233 (2016).
- [3] 福江修平「あいち SR における永久磁石を用いた偏向磁石の開発」名古屋大学修士論文 (2017).
- [4] Poisson/Superfish Los Alamos National Laboratory ReportNo. LA-UR-96-1834.
- [5] J. Chavanne, G. Le Bec, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, p.968 (2014).