

永久磁石を用いた偏向磁石の精密磁場測定と温度補償システムの開発

PRECISE MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF PERMANENT DIPOLE MODEL MAGNET AND DEVELOPMENT OF TEMPERATURE COMPENSATION SYSTEM

堀遥輝^{#,A)}、真野篤志^{B)}、保坂将人^{B),C)}、石田孝司^{B),C)}、郭磊^{B),A),C)}、高嶋圭史^{B),C),A)}、加藤政博^{D),E),B)}

Haruki Hori^{#,A)}、Atsushi Mano^{B)}、Masahito Hosaka^{B),C)}、Takashi Ishida^{B),C)}、Lei Guo^{B),A),C)}、

Yoshihumi Takashima^{B),C),A)}、Masahiro Katoh^{D),E),B)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{D)} Hiroshima University

^{E)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

We are developing a permanent dipole magnet for a future upgrade of the Aichi SR storage ring. By using permanent magnets, in addition to the reduction of running costs by power saving, power supplies and cooling system can be simplified. In the previous research, we designed a permanent dipole magnet which was compatible with the present electric dipole magnets and manufactured a 1/5 scale model magnet using neodymium magnet. Although the magnet properties of the neodymium magnet are excellent, they have a relatively large temperature dependence on the field strength. In this study, we are developing a field compensation system by using the model magnet. First, precise measurement of magnetic field dependency on temperature was conducted. Then, a feedback control system using a compensation coil was constructed. It was successfully demonstrated that the feedback system stabilized the magnetic flux density of 1.4 T within 0.01% in the temperature range of $\pm 3^\circ\text{C}$.

1. はじめに

省エネルギーは現在社会全体で取り組むべき課題であり、加速器分野においても取り組むべき重要な課題である。特に次世代加速器においては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。

電磁石と比べ永久磁石は電源、コイル、冷却設備などの付帯設備が不要となるため、消費電力減少に加えて、コンパクト化、メンテナンスフリーなどの利点も挙げられる。あいちシンクロtron光センター(あいちSR)は2013年にユーザー供用を開始した産業利用に重点を置いて運用されているシンクロtron光源である[1]。その中核である1.2 GeV 電子蓄積リングでは8台の常伝導偏向電磁石が稼働している。常伝導偏向電磁石のパラメータをTable 1に示す。

Table 1: Parameters of Bending Electromagnets

Magnetic flux density	1.4 T
Good field region	± 30 mm
Gap	50 mm
Magnetomotive force	30132 A \cdot T/coil
Power consumption	24.7 kW
Effective length	1945.6 mm

1.4 Tの磁束密度を発生させるために電磁石中の水冷式コイルに起磁力30132 A \cdot T/coilの電流を流している。冷却システムを含めたその消費電力はあいちSRのおよそ3割を占めており、これを永久磁石に置き換えることができれば大幅なランニングコストの削減が期待できる。

先行研究において我々はネオジウム磁石を用いた実機の1/5スケール永久磁石型偏向磁石試作機を製作した[2]。ネオジウム磁石は非常に良好な磁気特性を有するが、一方温度依存性が大きい。本研究は、この試作機を用いて温度依存性補償システムの開発を行うものである。まず、精密温度調節装置を作製し試作機を多様な温度条件下において精密磁場測定を行う実験環境を整備した。次に磁場強度の温度依存性を調べ、その結果を用いて補償コイルを用いたフィードバック制御システムを設計・製作した。様々な温度条件下でフィードバックシステムの動作確認を行った。以下、その詳細について述べる。

2. 永久磁石試作機

ここでは本研究において使用している永久磁石型偏向磁石の概略について述べる。なお、永久磁石型偏向磁石の設計の詳細は参考文献[2]に述べられている。試作機に必要な設計要件をTable 2に示す。

本試作機の作製において要求される磁束密度が非常に強力なため永久磁石としては最も良好な磁気特性を持つネオジウム磁石を用いた。この試作機には永久磁石にはネオジウム磁石(NEO-MAX 製:NMX-46CH)、ヨークにはSSM250が用いられている。NMX-46CHの20 $^\circ\text{C}$ における残留磁束密度はおおよそ1.39 Tである。

[#] hori.haruki@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

Table 2: Required Parameters for the 1/5 Model Magnet

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

設計された偏向磁石の断面図と発生する磁力線を Fig. 1 に示す(赤矢印方向は磁化容易軸)。

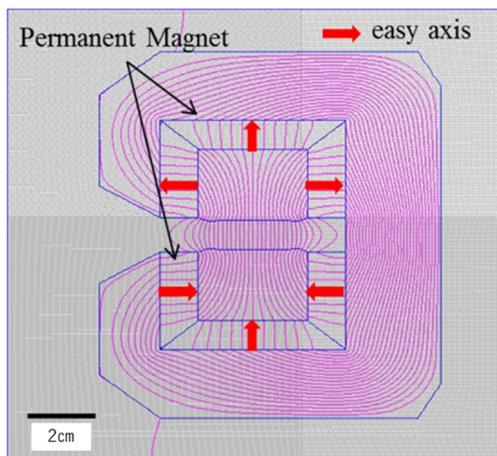


Figure 1: Cross section of the permanent dipole magnet and magnet field distribution.

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形成した。

形状は実機が sector 型であるのに対して、試作機は作製しやすい rectangular 型とした。Figure 2 に作製した試作機を示す。

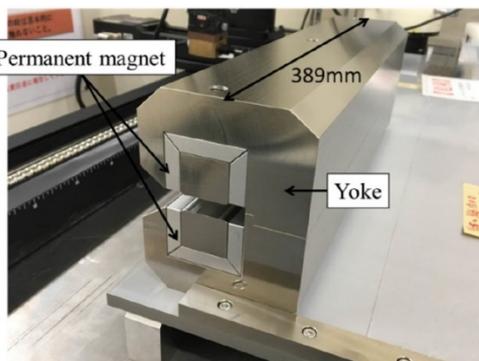


Figure 2: 1/5 Model permanent dipole magnet.

3 精密温度調節・磁場測定装置の開発

広い温度範囲での精密磁場測定を行うため偏向磁石用精密温度調節装置の開発を行った。

3.1 精密温度調節装置

今回、精密温度調節装置の設計を行うにあたり必要となる条件として、外部との断熱がなされていること、温度を変化させる機構が付いていることが求められた。今回

製作した精密温度調節装置実機を Fig. 3 に示し、断熱架台、温度変調機構と温度モニターに構成されている。

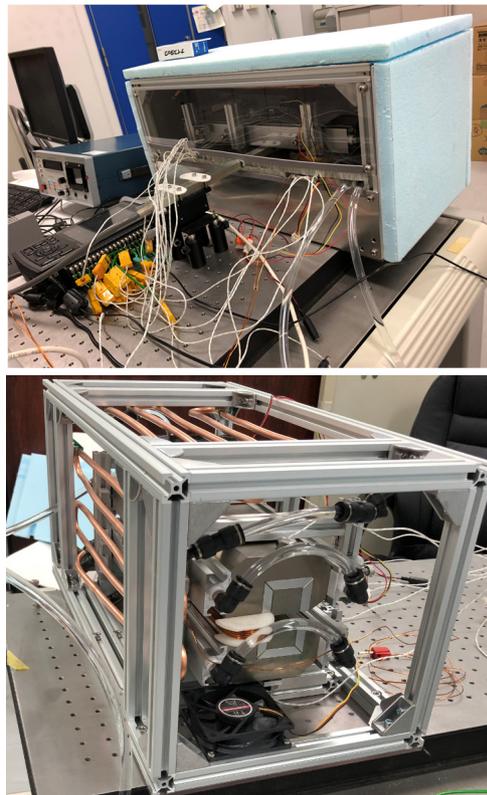


Figure 3: Precision temperature stabilization device and prototype dipole magnet (inside).

3.2 断熱部の製作

外部との断熱を図るため、(1)永久磁石試作機を断熱材で覆い、(2)底面からの熱伝達を防ぐために永久磁石試作機を頭部が球面の受けボルトを用いて三点支持とした。断熱性を高めるため金属板、アクリル板で覆うことで装置の密閉性を高めている。本研究において断熱材にはダウ化工のスタイロフォーム(厚さ 20 mm)を使用した。

3.3 温度変調機構の製作

温度変調機構として(1)熱源にはチラー(ヤマト科学 B U150A)による循環恒温水を用いた。(2)水冷したアルミブロックを密着させることで迅速に加熱冷却を可能とした。(3)箱状断熱材内部に水冷した銅パイプを簡易の熱交換機として設置し、雰囲気温度を安定させ、(4)ファンにより内部の空気を攪拌した。温度変調機構の設置場所を Fig. 4 に模式図で示す。

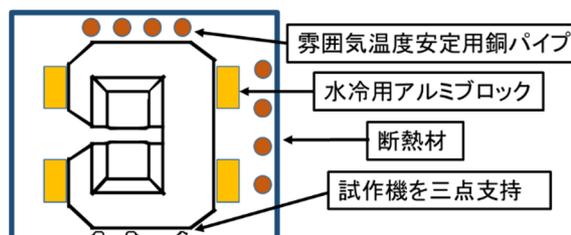


Figure 4: Schematic of Temperature control device.

3.4 温度・磁場モニター

温度測定は K 型熱伝対とデータロガー(GRAPHTEC GL820)を用いた。熱電対の接地場所は試作機磁石部分上下三か所ずつ、ヨーク表面上下三か所ずつ、コイル温度測定場所、パイプ温度、断熱材内部雰囲気温度、外気温、チラー内部水温の 17 か所を測定した。

磁場の測定には、絶対磁場の測定精度に優れた NMR 式磁場測定装置(エコー電子 EFM-2000AZ)を使用した。本装置の分解能は $\pm 1 \mu\text{T}$ である。

3.5 精密温度調節装置の性能評価

製作した装置は後述するフィードバックシステムの改良のため広い温度範囲での温度変調能力が必要とされた。使用しているチラーの温度変化可能範囲は -20°C から 100°C までであるが流体として水を使用しており、また、ホースにウレタンチューブを使用しているため、 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 程度が限界だと考えられる。永久磁石試作機は 40°C 程度で不可逆減磁を起こすため十分な温度変化範囲であると考えられる。また実際に室温一定化において温度変化させその温度変化速度を計測した。温度変化速度は約 $11.3^\circ\text{C}/\text{h}$ の変温速度であった。製作した精密温度調節装置の温度・磁場安定性を確認するために気温を $\pm 2.5^\circ\text{C}$ の範囲で変動する環境下においての精密温度調節装置を用いた磁石温度と磁束密度の安定性を測定した(Fig. 5)。磁石温度変化は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度に抑えられており、磁束密度の変化は $200 \mu\text{T}$ 程度に抑えられた。

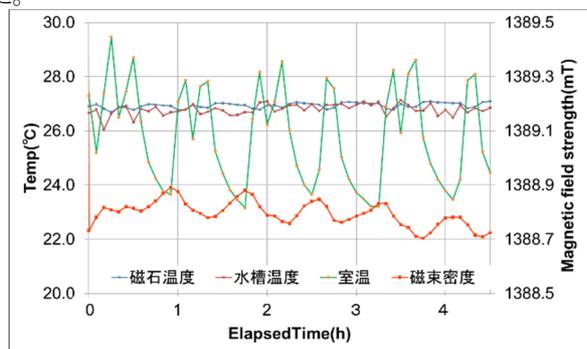


Figure 5: Temperature and magnetic field stability.

4 磁場補償フィードバックシステム

4.1 補償用コイル

本研究においては、永久磁石の温度依存性を補償するために補償用コイルを用いたフィードバックシステムを

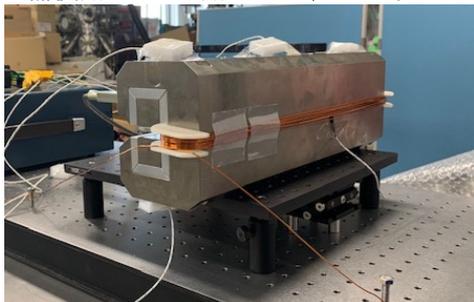


Figure 6: Compensation coil.

構築した。補償用コイルはポリエステル銅線(単線、 1 mm)を 15 回巻とした(Fig. 6)。

4.2 制御系

システムの実用化を考慮すると、加速器内のビーム軌道に NMR のような精密磁場測定機器は設置するのは困難であるため、温度測定などによるフィードフォワード制御が好ましいが、今回は動作原理の検証のため、計測した磁場変化に対するフィードバック制御を行った。本研究では、制御の中でも最も簡単な比例制御で電流量を制御することとした。電流量と磁場変化量の間の比例定数は、事前に測定した起磁力のデータを用いた。ハードウェアとしては磁場測定装置からの BCD 出力のデータを小型 PC (RaspberryPi3) で読み取り RS232 通信により直流電源を制御した(Fig. 7)。

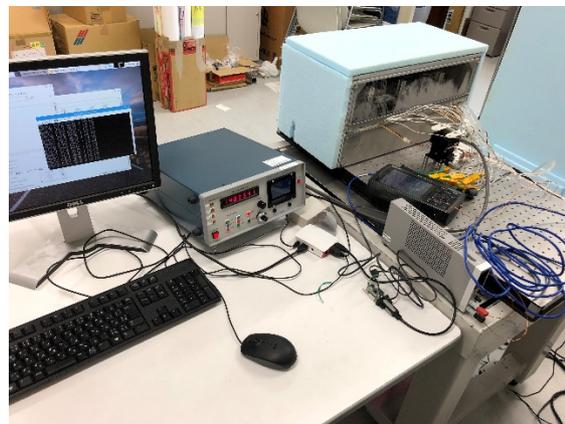


Figure 7: Magnetic field measurement system.

4.3 磁場補償装置の評価

まず、磁石温度を 1°C ずつ上げていき作製した磁場補償システムの補償範囲と補償時の磁束密度安定性を調べた(Fig. 8)。

本システムの磁場補償範囲(1.4 T)は $21 \pm 3^\circ\text{C}$ であった(Fig. 9)。

導入を目的としているあいち SR の施設内の温度変化は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 程度であるため磁場補償可能と考えられる。磁場補償システム作動時の磁束密度の標準偏差は $10 \mu\text{T}$ であり、この磁場変動は十分にあいち SR の偏向磁石の設計要件($100 \mu\text{T}$ 相当)を満たしている。

磁場補償システムを on/off した時の挙動を Fig. 10 に示す。

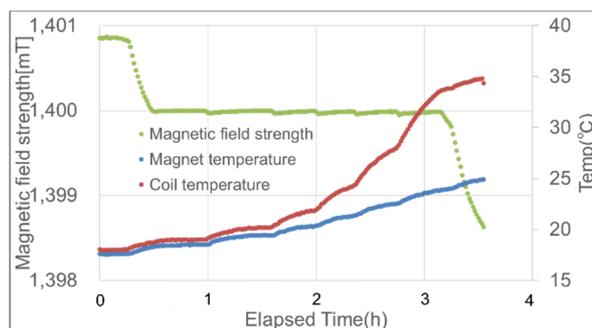


Figure 8: Magnetic field compensation under changing temperature.

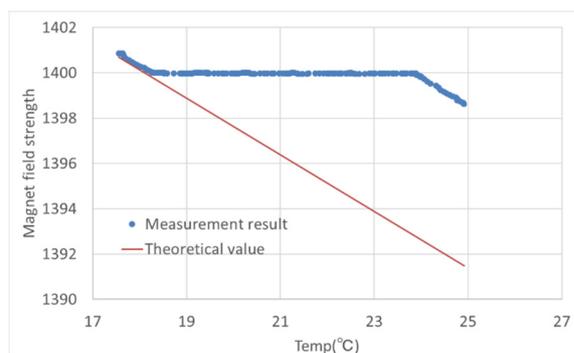


Figure 9: Magnetic field compensable range.

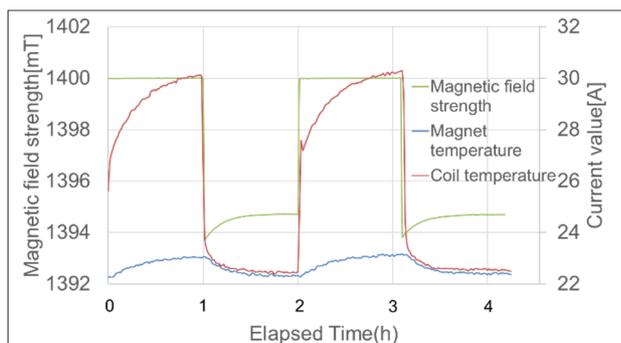


Figure 10: Measured magnetic field with compensation on/off.

磁場補償システム作動時には 1.4 T が安定して達成できていることがわかる。また、温調装置を作動させていてもコイルの発熱が磁石温度に多少の影響を与えており、コイルに流れる電流がさらに大きくなるとコイルの発熱の影響がさらに大きくなることが考えられる。

4.4 まとめ

本研究では磁場補償システムにより 1/5 モデル試作機の磁場の安定化に成功した。今後は永久磁石型偏向磁石導入に向けての実機サイズでのコイルの発熱影響などのシミュレーションの実施を行い、更なる検証を進めたい。

5 参考文献

- [1] “あいちシンクロトロン光センター「施設紹介」, Available ; <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/about/introduction.html>
- [2] 福江修平, “あいち SR における永久磁石を用いた省電力型偏向磁石の開発,” 2017.