

高温超伝導体 HTS の鞍型コイルによる 2 極磁石の誤差磁場の動的変動評価 EVALUATION OF MAGNETIC FIELD DYNAMICS OF AN HTS DIPOLE MAGNET MADE OF SADDLE-SHAPED COILS

鈴木研人 *

Kento Suzuki *

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We are currently testing a $\cos\theta$ high T_c superconducting (HTS) magnet assembled with saddle-shaped coils to assess its feasibility for accelerator application particularly focusing on the field quality. In the previous excitation test, the magnet was operated stably at $I=120$ A and the magnetic measurement was performed using a harmonics coil. Although the measurement was originally aimed at investigating temporal field variation due to screening currents in the HTS tapes, we observed fast magnetic transients ($\Delta B \sim 100$ ppm) during the test, which is considered to be invoked by flux jump. For further investigation, a new Hall sensor probe was developed to evaluate inclusively field dynamics in the HTS magnet. In this paper, we report progress in the magnetic measurement for the HTS magnet.

1. はじめに

加速器技術の発展に際し、液体窒素温度以上で超伝導特性を示す高温超伝導体 (HTS) の普及が望まれる。エネルギー産業利用のみならず、物理実験向けの加速器利用においても NbTi あるいは Nb₃Sn といった低温超伝導体 (LTS) と組み合わせた 20 T 級ハイブリッド磁石 [1] や、冷却効率が向上する 20 K 下の運転を想定した運用 [2] など、HTS でなければ実現できない様々なデバイスの需要が今後見込まれるためである。入手性の良い HTS としてレアアース系超伝導体 (Rare-Earth Barium Copper Oxide: REBCO) が挙げられる。現在は多くの線材メーカーで REBCO テープ線材を調達する事が可能で、テープ形状故にソレノイド等のコイル巻線に適している。一方で、未だに HTS 磁石の実応用が普及していない主な理由として、常伝導転移 (クエンチ) の伝播速度 (Normal zone propagation velocity: NZPV) が 10–100 cm/s と LTS と比べても 2–3 桁遅いためクエンチ検出が極めて難しい点 [3,4]、機械的な脆さに起因する超伝導特性の劣化や剥離 [5,6] が挙げられる。また、加速器応用に関して言うと、上記に加えて「磁場精度」も重要なテーマの一つである。過去の先行研究では REBCO テープ線材に流れる遮蔽電流が生み出す誤差磁場の動的変動の研究が進められてきた [7]。一方で加速器用磁石への応用を考えた際、コイルのみで純粋な $2n$ 極磁場を生み出すには磁石断面上の電流分布が $\cos n\theta$ となるのが理想的で、そのためコイルを鞍型のような形状で巻線を行うのが一般的である [8]。この $\cos\theta$ 型磁石における磁場精度の包括的研究については詳細な計算は行われているものの [9]、実際に鞍型コイルを取り入れている HTS 磁石を用いた磁場測定についてはあまり例がない。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では過去に株式会社東芝と京都大学との共同研究のもと、重粒子線医療用小型ガントリー向け HTS ダイポールのモデル磁石の製造を進めてきた [10]。本磁石の諸元を Table 1 に示しているが、特徴的なのは REBCO テープ線材を

Table 1: Main Parameter of the HTS Magnet

Dipole field strength	3 T
Rated current	366 A
Bore radius	30 mm
Inner radius of iron yoke	95 mm
Outer radius of iron yoke	205 mm
Num. of HTS coils	24
Num. of turn for each coil	50
Magnet mechanical length	1200 mm
Coil mechanical length	340 mm
Coil inductance	288.9 mH

使った鞍型コイル巻線技術を開発し、実際のコイル製造に適用した点である [11,12]。本磁石の巻線作業は東芝京浜事業所において 2015 年より開始され、2016 年には HTS 磁石が完成し、そしてその後はハーモニックコイル [13] による磁場精度の検証を進めた。磁石は定格電流 366 A に対して、150 A までの通電に成功し、その後は 120 A に落としての磁場測定 (120 A 通電で ~ 1 T の 2 極磁場に相当) であったが、通電途中磁束跳躍が原因と思われる磁場強度の急激な変化 ($\Delta B \sim 100$ ppm) を観測した [14]。加速器用磁石では通常 10^{-4} オーダーの磁場精度が求められる。今回観測した変動量は主磁場成分におけるものであるものの、その多極成分 (つまり誤差磁場成分) でどのような変化が生じているのかまだ精査できていない。従ってこれまでの研究対象であった遮蔽電流による磁場変動に加えて、磁束跳躍による影響も網羅する包括的な磁場測定を進める事にした。この測定を継続するため HTS 磁石は KEK に移送され、これまでにクエンチ保護の研究 [15] や励磁回路と保護システムの整備を行い、また後述する新たなプローブ開発を経て、ようやく磁場測定を再開できる目処が立った。本論文では HTS 磁石の磁場精度の動的な変動を捉えるための測定手法と磁場測定プローブ開発、そして低電流励磁試験によるプローブの性能検証

* kentsuzu@post.kek.jp

について報告する。

2. 測定手法

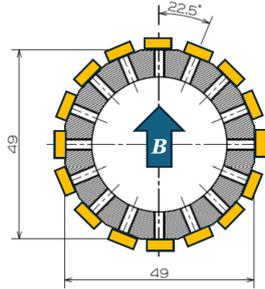


Figure 1: Location of hall sensors for the measurement. Each of the sensors is represented as a rectangular shape with orange color.

遮蔽電流に起因する磁場変動は参考文献 [7] で示されているようにオーダーとして 10^{-4} /hour の緩やかな変化である事が推測される。一方でフラックスジャンプによる磁場変化がみられた過去の測定では、ハーモニックコイルを用いた 7 Hz のサンプリングでデータ取得していたものの、細かな時間構造を明らかにする事ができなかった。そのためこれまでのハーモニックコイル方式ではなく、より高速なサンプリングで時間変動を捉える事ができるようにホール素子を用いた手法を採用する事とした。ここでは単にホール電圧の変化を捉えるだけでなく、誤差磁場を定量的に評価するため多極成分 (Multipole) を抽出できるような装置構成を検討した。そのためホール素子を Fig. 1 に示すように多角形状に切削したパイプ表面に円周方向に配列するように設置する。この場合各ホール素子で感じる磁場は以下の径方向の磁場成分となる：

$$B_r(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{ref}}} \right)^{n-1} (B_n \sin n\theta + A_n \cos n\theta), \quad (1)$$

ここで、 R_{ref} は参照半径 (本磁石では 20 mm)、 A_n と B_n はそれぞれ多極成分のスキューとノーマル成分である。Equation (1) を用いて、 i 番目のホール素子のホール電圧を以下のように書き表す：

$$V_{\text{hall},i} = \frac{R_H I B_r}{d} + U_p \quad (2)$$

ここで R_H はホール係数、 d はホール素子厚み、 U_p はミスアラインメントに起因するプラナー効果による [16]。Equation (2) によって得られた多極成分を用いて、磁束跳躍が発生箇所の特定期も原理的に可能となる [17]。複素表示における表現で、発生箇所 z_c を求めると：

$$z_c(t) = \frac{C_n(t)}{C_{n+1}(t)} \frac{n+1}{n} R_{\text{ref}}, \quad (3)$$

ここで $C_n = B_n + iA_n$ である。なお、この手法は CERN の先行研究にて Nb_3Sn 磁石に対して実施済みであり、

この時は静的なクエンチアンテナを用いた測定手法が使用されていた [18]。本研究とこの先行研究との違いは過渡的な変化のみとらえるアンテナではなくホール素子を用いることで、常に磁場の時間変動を測定する事ができ、上記のように遮蔽電流に起因する緩やかな変動の評価も同時に可能であることが挙げられる。

3. 測定装置



Figure 2: Left) GFRP pipe after the surface machining. Center) GaAs Hall sensor attached on the GFRP pipe. Right) Location of the hall sensors for this test.

Figure 2 に今回開発した装置となるホール素子プローブを示した。直径 57 mm の GFRP パイプ表面を 16 角形状に切削し、その表面に PEEK 板に貼り付けた GaAs ホール素子 (HG-166A-2U) を設置している。長さは 550 mm で、HTS 磁石内部を走査できるように端部には非磁性ベアリングを搭載している。今回はテスト評価のため、16 箇所全てつけるのではなく、まずは 8 箇所 (45 度ピッチ) で周方向に設置した。なお、8 個のホール素子は定電流駆動とし、共通の電流源を用いるため直列に入力部を繋げている。各ホール素子のホール電圧は差動信号で読み出せるようにし、まずは試験的に $6\frac{1}{2}$ 桁のマルチメータ (PXIe-4080) を用いた測定を行った。

4. 低電流励磁による検証結果



Figure 3: Left) Preparation for verification tests of the Hall sensor probe. The picture shows a part of the probe is inserted into the room-temperature bore ($\phi 57$). Right) Overall appearance during the test.

本検証では低温センター第 3 低温棟に保管中の HTS 磁石を伝導方式にて冷却 (~ 4 K) し、かつクエンチが確

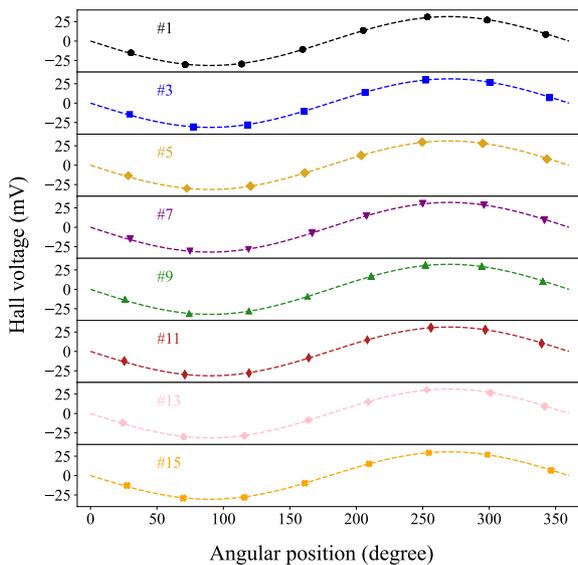


Figure 4: Test result of the Hall sensor probe. Each of the Hall voltage was measured by rotating the probe at 45 degree intervals. The dashed curve represents the fitting result by a simple sine-wave function.

実際に起きない低い電流領域（最大 20 A、磁場 167 mT 相当）にて通電励磁を行い、各ホール素子の動作確認を実施した。Figure 3 に試験中の様子を示したが、HTS 磁石に設けた室温ボア（φ57）に開発したホール素子プローブを挿入し、検証の際にはホール素子の長手位置が磁石の長手中心と位置するところまで移動させ、かつ回転をさせながら信号の読み出しを行った。Figure 4 にホール素子を 0.5 mA で駆動した場合の結果を示した。これは 45 度ピッチでプローブ角度を回転しながら測定を行ったもので、おおよそ想定通りの応答を示している事がわかった。また、Fig. 5 では角度を固定し、磁石通電電流を最大 20 A まで変化させた時に各ホール素子の応答を示した。このように磁場に対する線形応答性も問題ない事が確認できた。

今後は各ホール素子の設置時のミスアラインメントの影響を考慮した相対校正の方法を検討する。また、前回磁束跳躍の影響を確認できた電流付近まで励磁するため、クエンチによるリスクを低減するような新しいクエンチ検出法を検討しており、ここでは FPGA を活用した高速クエンチ検出ロジックの開発を進めている。本ロジックは既に NbTi 磁石の励磁試験でテスト動作済みであり [19]、今回初めて HTS 磁石に適用する事になる。

5. まとめ

鞍型コイルを取り入れた HTS 磁石の磁場精度を検証し、磁束跳躍を含む磁場の動的変動、特に加速器応用を検討した際に重要となる誤差磁場の影響を今後求めていく。ホール素子の相対校正についてはより厳密で詳細な手法を検討している所であるが、今後の定格通電に向けては上述したようにクエンチによるリスクを低減する必要がある。そのため、現在高速でクエンチ検

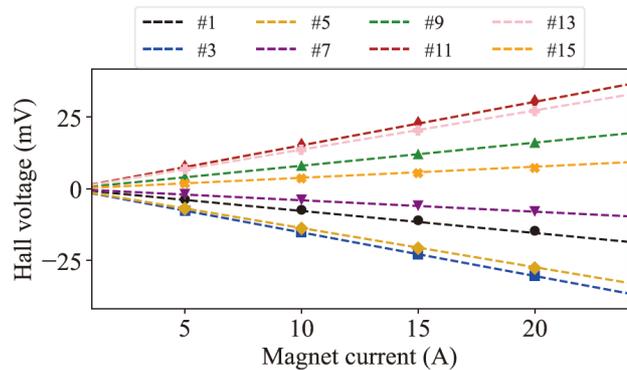


Figure 5: Another test result of the Hall sensor probe. In the test, the Hall sensor probe was set at a fixed angle and the magnet current was scanned. The dashed curve represents the linear fitting result.

出する方法の検討も同時に進めており、これが導入され次第、本格的な測定を進める計画である。将来的には、誤差磁場の影響の大きさによって HTS 線材の $\cos \theta$ 磁石への適用が妥当な設計かどうか、今後明らかにできると期待している。

謝辞

本研究は科研費「23K17151」によって助成を受けているものです。また、本論文で紹介したホール素子プローブは KEK 機械工学センターの製造支援によって製作されました。

参考文献

- [1] P. Feraccin *et al.*, “Towards 20 T Hybrid Accelerator Dipole Magnets”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, 4000906, 2022. doi:10.1109/TASC.2022.3152715
- [2] L. Bottura, S. Prestemon, L. Rossi and A. V. Zlobin, “Superconducting magnets and technologies for future colliders”, *Front. Phys.*, vol. 12, 10:935196, 2022. doi:10.3389/fphy.2022.935196
- [3] M. Bonura and C. Senatore, “An equation for the quench propagation velocity valid for high field magnet use of REBCO coated conductors”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, 242602, 2016. doi:10.1063/1.4954165
- [4] M. Marchevsky, “Quench Detection and Protection for High-Temperature Superconductor Accelerator Magnets”, *Instruments*, vol. 5, 27, 2021. doi:10.3390/instruments5030027
- [5] Y. Zhou, D. Park, Y. Iwasa, “Review of progress and challenges of key mechanical issues in high-field superconducting magnets”, *Natl. Sci. Rev.*, vol. 10, nwad001, 2023. doi:10.1093/nsr/nwad001
- [6] Y. Yan, Y. Li and T. Qu, “Screening current induced magnetic field and stress in ultra-high-field magnets using REBCO coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, 014003, 2022. doi:10.1088/1361-6668/ac392b
- [7] N. Amemiya *et al.*, “Temporal behaviour of multipole components of the magnetic field in a small dipole magnet wound with coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, 035003, 2015.

- doi:10.1088/0953-2048/28/3/035003
- [8] K. H. Mess, P. Schmüser, S. Wolff, “Superconducting accelerator magnets”, World Scientific.
- [9] Y. Sogabe *et al.*, “Influence of magnetization on field quality in cosine-theta and block design dipole magnets wound with coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, 045012, 2016. doi:10.1088/0953-2048/29/4/045012
- [10] S. Takayama *et al.*, “Design of conduction-cooled HTS coils for rotating gantry”, *Phys. Proc.*, vol. 67, p.879-884, 2015. doi:10.1016/j.phpro.2015.06.148
- [11] K. Koyanagi *et al.*, “Development of saddle-shaped coils using coated conductors for accelerator magnets”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, 4100404, 2013. doi:10.1109/TASC.2014.2385962
- [12] S. Takayama *et al.*, “Influence of manufacturing accuracy on magnetic field distribution in magnet for HTS rotating gantry”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, 7442106, 2016. doi:10.1109/TASC.2016.2543463
- [13] L. Walckiers, CERN Accelerator School CAS 2009. <http://arxiv.org/abs/1104.3784v1>
- [14] K. Suzuki *et al.*, “Field Quality Measurement of an HTS Magnet for a Rotating Gantry”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, 4600405, 2017. doi:10.1109/TASC.2016.2630805
- [15] K. Suzuki *et al.*, “Quench protection for high superconducting rotating gantry model magnet with I - V characteristics measured in the temperature range of 40 - 83 K”, *Cryogenics*, vol. 100, p28-35, 2019. doi:10.1016/j.cryogenics.2019.03.009
- [16] S. Sanfilippo, “Hall probes: physics and application to magnetometry”, CAS-CERN, 2009.
- [17] T. Ogitsu *et al.*, “Quench Observation Using Quench Antennas on RHIC IR Quadrupole Magnets”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, pp3098-3101, 1996. doi:10.1109/20.511531
- [18] P. Rogacki *et al.*, “Measurement of Fast Transients in Nb₃Sn Magnets by Using a Static Harmonic-Coil”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, 4003305, 2025. doi:10.1109/TASC.2025.3550313
- [19] K. Suzuki *et al.*, “Training Evaluation of Separation Dipoles in HL-LHC”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 36, 4000904, 2025. doi:10.1109/TASC.2025.3624726