

## 第一世代高温超伝導線材を用いた磁石の開発

### DEVELOPMENTS OF HTS MAGNETS UTILIZING FIRST GENERATION WIRE

鎌倉恵太 \*<sup>A)</sup>、畑中吉治 <sup>A)</sup>、福田光宏 <sup>A)</sup>、植田浩史 <sup>A)</sup>、安田裕介 <sup>A)</sup>、依田哲彦 <sup>A)</sup>、島田健司 <sup>A)</sup>、原周平 <sup>A)</sup>  
Keita Kamakura\*<sup>A)</sup>, K. Hatanaka<sup>A)</sup>, M. Fukuda<sup>A)</sup>, H. Ueda<sup>A)</sup>, Y. Yasuda<sup>A)</sup>, T. Yorita<sup>A)</sup>, K. Shimada<sup>A)</sup>, S. Hara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

At RCNP, we have been developing magnets utilizing first generation HTS wire for this decade. HTS materials have advantages over LTS materials. Magnets can be operated at 20 K or higher temperature and cooled by cryocoolers. The cooling structure becomes simpler and the cooling power of a cooler is high. Owing to a large margin in operating temperature, it is possible to excite HTS magnets by AC or pulsed currents without quenching. Three model magnets were fabricated; a mirror coil for an ECR ion source, two sets of race track coils for a scanning magnet, and a 3 T super-ferric dipole magnet having a negative curvature. They were excited with AC and pulse currents as well as DC currents and their performance was investigated. After successful tests of proto type models, two magnets have been fabricated for practical use. A cylindrical magnet generates a magnetic field higher than 3.5 T at the center to polarized 210 neV ultra cold neutrons. A dipole magnet is excited by pulse currents in order to deliver accelerated beams to two target stations by time sharing. The design of the dipole magnet and operational performance are discussed.

#### 1. 概要

大阪大学核物理研究センターでは、第一世代高温超伝導線材を用いた磁石の開発を行ってきた。加速器の電磁石として高温超伝導線材を用いることは低温超伝導線材に比べ、いくつかの利点がある。まず 20 K 以上の温度で運転できるため、冷凍機のみで冷却可能な点である。液体ヘリウムを必要とせず冷却装置の構造が簡素化できる。転移温度 100 K 付近の高温超伝導体であれば、運転を 20 K で行うことでクエンチに対して大きなマージンを得られ、AC やパルス励磁も可能になる。我々はこれまで三つのモデル磁石を高温超伝導線材で製作した。ECR イオン源用のミラーコイル [1]、スキャンニング用のレーストラック型双極磁石 [2] 及び負曲率磁場を発生する 3 T のスーパーフェリック磁石 [3] である。それらの磁石は、DC、AC、パルス電流で励磁され、その性能の評価が行われた。これらのプロトタイプの成功を受け、我々はさらに 2 つの実用磁石を製作した。一つは 210 neV の超冷中性子偏極用の中心磁場 3.5 T のソレノイド磁石 [4]。もう一つはビームを 2 つの実験室間でタイムシェアするために、ビームコースの迅速切り替えを行う分配磁石である。ここでは、この高温超伝導スイッチング磁石の設計と運転性能について議論する。

#### 2. 設計及び製作

当センターサイクロトン施設では実験者側からのビームタイム要求が実際に供給可能な時間を大きく上回っている。より多くの実験を行うために 2 つの実験室間でのビームシェアリングが計画されている。例えば西実験室で行われるミューオン生成と東実験室での超冷中性子生成を数十秒間隔で切り換え、同時並行で二つの実験を行うというものである。この試みを実現するため、リングサイクロトン直後に配置されている従来型の常伝導磁石に代わる、積層鉄心を用

いた 10 秒程度での迅速励磁可能な新たなスイッチング磁石を設計した。これまでのモデル磁石の成功を基に、巻線には第一世代高温超伝導線材 BSCCO-2223[5] を使用した。Table 1 にその諸元を、Figure 1 にコイルアセンブリ、Figure 2 に磁石外観をそれぞれ示す。

Table 1: Design Parameters of the HTS Switching Magnet

Coil	Inner size	1142 mm × 580 mm
	Number of DP	2
	Numbers of turns	256 × 2
Magnet	Inductance	2.5 H
	Temperature	< 20 K
	Rated current	200 A
Cryostat	Field at center	1.6 T
	Cooling power	16 W at 20 K 2 W at 7.5 K
	Shield temperature	50 K

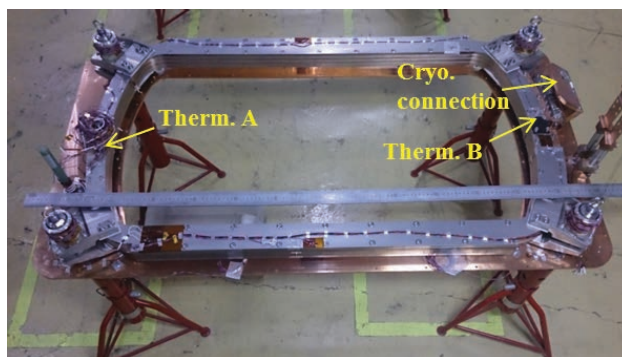


Figure 1: Upper coil assembly without thermal shields. Therm. A and B are positions of thermometer discussed in the next section.

\*keita@rcnp.osaka-u.ac.jp



Figure 2: HTS switching magnet from downstream.

### 3. 性能評価

これまでこの磁石に対して行った性能評価の項目とその結果について以下に記載した。

#### 3.1 冷却能力

常温からの初期冷却においては、約 50 時間かけて運転温度まで冷却する。輻射シールドは 50 K、コイル冷却板は 7 K 程度で安定した。

ビームシェアリングでは迅速な励磁が要求される。この磁石の鉄心は薄板積層構造を持つので、鉄損は十分に小さい。つまり励磁速度はコイルのインダクタンス (2.5 H) と電源性能 (最大定格電圧 50 V) より、最大で 20 A/s となる。

励磁電流をあるパターンで通電した時の温度変化を Figure 3 に示す。輻射シールド内のコイルアセンブリで発生する渦電流とヒステリシスロスのため、励磁・消磁のタイミングでコイル温度が上昇している。このパターンでは 20 A/s の速度で 160 A まで励磁し 30 秒通電、-20 A/s の速度で消磁して 60 秒間のインターバルを挟んだ。

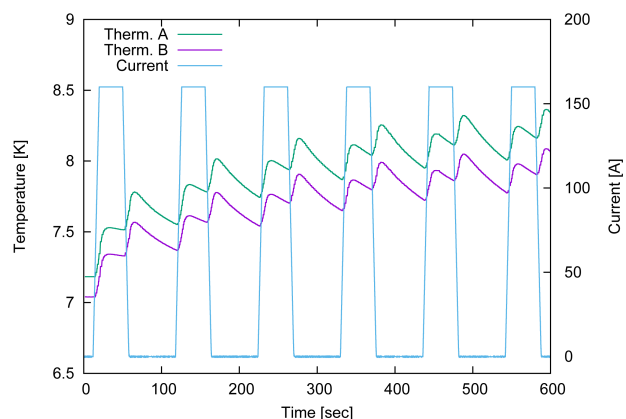


Figure 3: Temperature of upper coil during pattern operation.

Figure 4 はそのパターン運転を 2 時間継続し、温度

が安定するか試験した結果である。数十分程度でコイル温度の上昇は収束し、冷凍機から最も離れた地点の Therm. A でも 8.5 K 程度に抑えられている。このパターン運転試験によりコイルの熱設計の堅牢性が確認された。

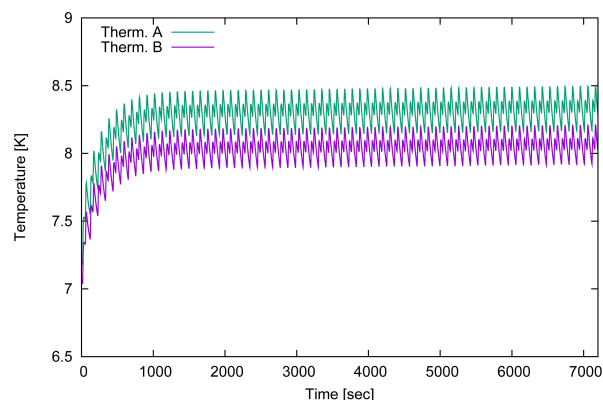


Figure 4: Temperature after 2 hours of the operation.

#### 3.2 磁場分布

定電流運転時の磁場分布に対する評価を行った。磁極のビーム入出射側の端はロゴスキー曲線を描くように切り取られており、有効磁場境界が励磁レベルにより変わらないように設計されている。ホール素子を用いてビーム軸上で磁場強度分布を測定した。まず 0 A から 200 A まで 10 A 刻みに励磁電流を変更し磁場分布測定。同様に 200 A から 0 A まで、励磁極性を切り替え後 0 A から -200 A、-200 A から 0 A まで電流の変更と測定を行った。その結果から有効磁場境界を計算した。結果を Figure 5 に示す。励磁レベルによらず、有効磁場境界は磁極の端からの 10~13 mm の距離にあることが確認された。これはスイッチング磁石として十分な性能である。

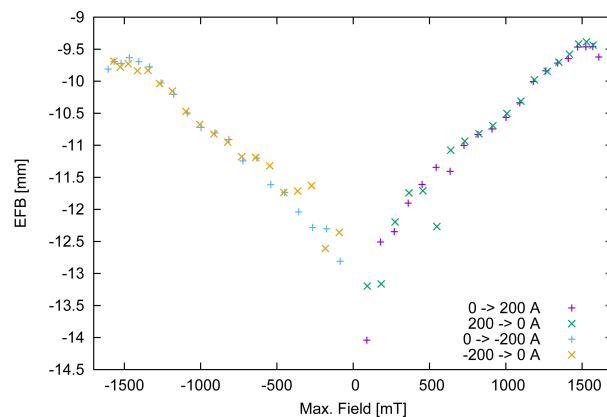


Figure 5: Effective field boundary for each excitation level.

#### 3.3 磁場の安定性

正確なビームシェアリングを行う上で、磁場強度には十分な時間安定性が要求される。そこでサイク

リング運転と呼ばれる励磁パターンを開発を行った。中心磁場強度 1.4 T を 160 A で励磁する場合、一旦より高磁場へ励磁してから、1.4 T まで下げるといった方法である。これにより鉄心内のヒステリシスによるドリフトが打消され磁場が安定する。そのサイクリング運転を行わなかった場合と、最大磁場 1.6 T (200 A) 及び 1.5 T (180 A) でサイクリング運転を行った場合の中心磁場強度をそれぞれ電流が 160 A に到達してから約 90 秒にわたり測定した。その一部を Figure 6 と Figure 7 に示す。

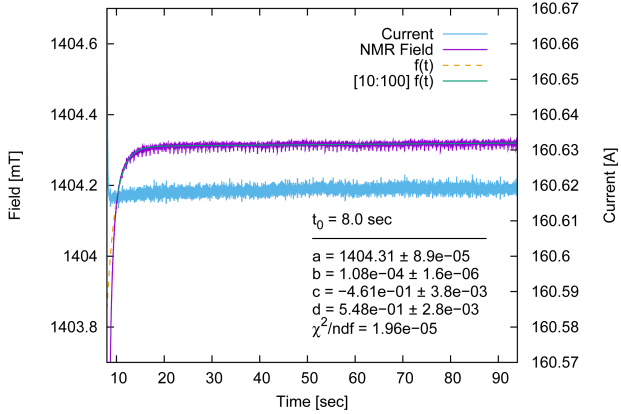


Figure 6: Field strength and current after excitation without cycling.

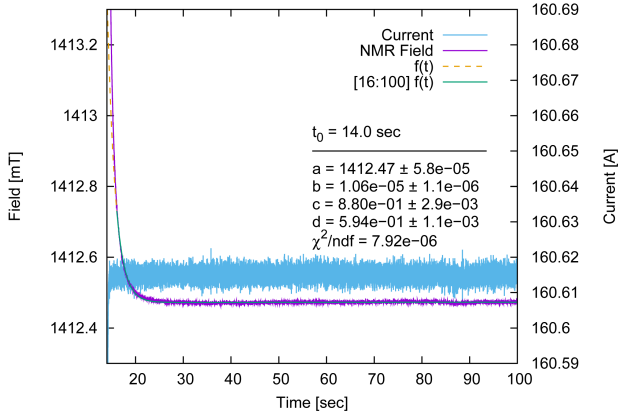


Figure 7: Field strength and current after excitation with cycling up to 1.6 T.

得られた磁場強度を (1) を用いてフィッティングし、ドリフト成分を評価した。

$$f(t) = a + b(t - t_0) + ce^{-d(t-t_0)} \quad (1)$$

$t_0$  は電流が 160 A に達する時刻である。

30 回程度パターン励磁測定及び (1) によるフィッティング解析を行い、ドリフト成分であるパラメータ  $b$  の統計分析を行った。Figure 8 にそのヒストグラムと Table 2 にその統計を示す。1.6 T でサイクリングを行うことでドリフトが抑えられることが確認された。

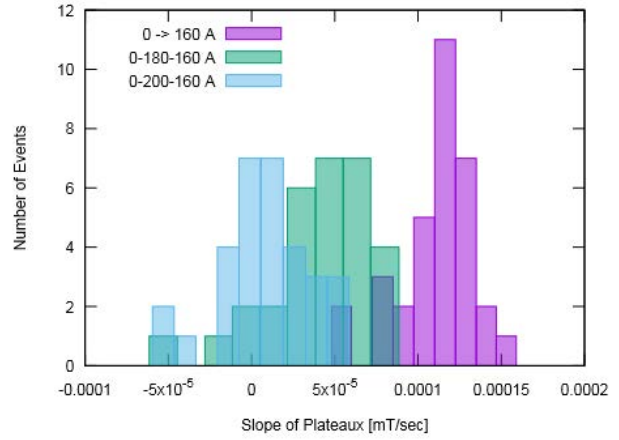


Figure 8: Histogram of parameter  $b$  of field strength with cycling operations.

Table 2: Statistical Analysis of Parameter  $b$

Cycling	-	1.5 T / 180 A	1.6 T / 200 A
Event #	34	34	32
Average	$1.1 \times 10^{-4}$	$5.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
STDEV	$3.1 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$

### 3.4 残留磁場

ビームのコース選択によっては、このスイッチング磁石を完全に消磁する必要がある。しかしながら励磁した状態から電流を 0 A にすると、3.5 mT 程度の磁場が残ってしまう。この残留磁場を消磁するために、磁石に逆方向の磁場を発生させ鉄心に残る磁化を打消す方法を検討した。最大磁場から 0 A に電流を落としのち一旦磁場の極性切り替えを行い、-10 A で励磁を行った。正方向、逆方向に励磁したのち電流を 0 A まで落とした場合と、上記の消磁運転を行った後の磁場分布の測定結果を Figure 9 に示した。ホール素子での測定結果であり 1 mT のオフセットが乗っているが、10 A の逆磁場励磁後は中心領域において完全に消磁されている。

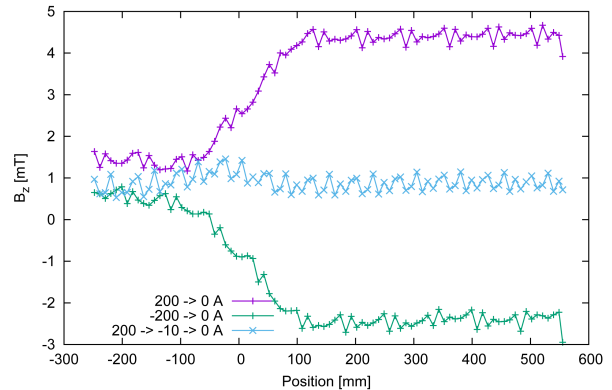


Figure 9: Field strength before and after degaussing operation.

#### 4. まとめ

第一世代高温超伝導線材、BSCCO-2223 を用いた磁極長約 1 m のスイッチング磁石を設計・製作した。性能評価試験の結果より、冷却性能、励磁時の磁場分布、磁場の時間安定性などが十分に要求性能を満たしていることが確認された。これはビームコースの数十秒程度での切り換えを可能にするものであり、ビームラインへの導入後は本施設のビーム利用の効率化に資することが期待される。また大型高温超伝導磁石のパルス運転の成功は今後の高温超伝導コイルの加速器利用における大きな布石である。

#### 参考文献

- [1] K. Hatanaka, S. Ninomiya, Y. Sakemi, T. Wakasa, T. Kawaguchi, N. Takahashi, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 571 (2007) 583-587.
- [2] K. Hatanaka, J. Nakagawa, M. Fukuda, T. Yorita T. Saito, Y. Sakemi, T. Kawaguchi, K. Noda, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 616 (2010) 16-20.
- [3] K. Hatanaka *et al.*, Proc. of IPAC 2012, New Orleans, the USA (2012) TUOAC02.
- [4] K. Hatanaka *et al.*, Proc. of IPAC 2013, Shanghai, China (2013) THPME007.
- [5] <http://www.sei.co.jp/super/hts/index.html>