

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(5)

-改造したモデル磁石の励磁試験結果-

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR LHC LUMINOSITY UPGRADE (5) -TEST RESULTS OF THE MODIFIED MODEL MAGNET-

榎本瞬^{#,A)}, 菅野未知央^{A)}, 中本建志^{A)}, 鈴木研人^{A)}, 川又弘史^{A)}, 岡田尚起^{A)}, 池本由希子^{A)}, 岡田竜太郎^{A)}, 田中賢一^{A)}, 大島洋克^{A)}, 飯田真久^{A)}, 高橋直人^{A)}, 荻津透^{A)}, 佐々木憲一^{A)}, 東憲男^{A)}, 佐々木憲一^{A)}, 木村誠宏^{A)}, Musso Andrea^{B)}, Todesco Ezio^{B)}

Shun Enomoto^{#,A)}, Michinaka Sugano^{A)}, Tatsushi Nakamoto^{A)}, Kento Suzuki^{A)}, Kento Suzuki^{A)}, Hiroshi Kawamata^{A)}, Naoki Okada^{A)}, Yukiko Ikemoto^{A)}, Ryutarō Okada^{A)}, Ken-ichi Tanaka^{A)}, Hirokatsu Ohhata^{A)}, Masahisa Iida^{A)}, Naoto Takahashi^{A)}, Toru Ogitsu^{A)}, Ken-ichi Sasaki^{A)}, Norio Higashi^{A)}, Nobuhiro Kimura^{A)}, Musso Andrea^{B)}, Ezio Todesco^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} European Organization for Nuclear Research (CERN)

Abstract

The High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has been developing a beam separation dipole magnet for the High Luminosity Large Hadron Collider upgrade (HL-LHC). The magnet has a coil aperture of 150 mm and uses NbTi superconducting cable. A dipole magnetic field of 5.6 T is generated at 12 kA at 1.9 K to provide a field integral of 35 Tm. KEK has started the development of the 2-m-long model magnet (MBXFS01) to evaluate the design and performance of the beam separation dipole magnet. In the first cold test in 2016, quench performance was not satisfactory because the coil stress at pole was completely released during excitation. It was decided that MBXFS01 was reassembled with increasing the coil stress to improve the quench performance. The excitation test of the modified model magnet (MBXFS01b) was performed at 1.9 K from February 2017 at KEK. This report presents the results of cold test of the MBXFS01b.

1. はじめに

欧州原子核研究機構(CERN)のLHC加速器のRUN2ではピークルミノシティが設計値 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えて、順調に運転が続けられている。しかし、CERNでは測定感度のさらなる向上を目指して、2026年から積分ルミノシティを現行の10倍に増大させる「LHC高輝度アップグレード(HL-LHC)」計画が進められている。高エネルギー加速器研究機構(KEK)も、日本が参加するATLAS実験の高度化に貢献するため、衝突点近くのビーム分離用超伝導双極磁石(D1)の研究開発に参加している。磁石は、コイル内径が150mm、全長7mであり、1.9Kにおいて双極磁場5.6T(磁場長35Tm)を発生する。前回の加速器学会では、KEKで所内開発した2mモデル磁石1号機(MBXFS01、以下01号機と略す。)の製作[1]とその冷却・励磁試験結果[2]について報告をした。01号機は定格電流12kAの105%まで到達したものの、トレーニングの進捗が遅く、必ずしも満足のいく結果ではなかった。その要因として、コイルに負荷する予備応力の不足が上げられる。コイルは組み立て段階で、電磁力による支持構造(Pole)からの分離を抑えるために十分な予備応力を負荷する。しかし、01号機の励磁試験では、定格電流以下で予備応力が完全に解放されていることが確認された。そのため01号機を一旦分解し、

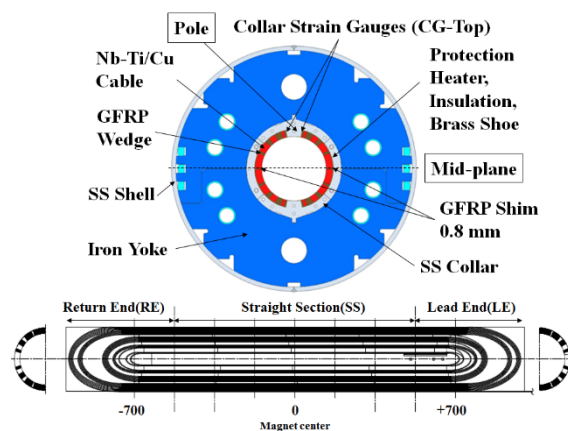


Figure 1: Cross-section of MBXFS01b magnet and schematic view of the 2-m-long model coils.

コイル予備応力を向上させるための改造を行った。改造された磁石(MBXFS01b、以下01b号機と略す。)では、超伝導コイルを含む主要な構造部品は再利用されたが、0.8mmのシム板をコイル水平面上に挿入する(Fig.1参照)ことで、コイル予備応力は35MPa増加されることができた。

01b号機の冷却・励磁試験は、2017年2月から4月にかけて行われた。試験項目は主に以下の3つに分かれる。

[#] enoshun@post.kek.jp

- トレーニングクエンチ試験: 1.9 K 及び 4.4 K において励磁試験を行い。定格電流 12 kA と受け入れ基準である 13 kA (定格電流に対して 108 %) を目安にトレーニングクエンチを実施する。
- ヒータークエンチ試験: 実機磁石がクエンチにより損傷することを防ぐため、超伝導コイルのクエンチ伝搬速度などのパラメーターを実験的に求める (スポットヒーター試験)。クエンチ保護ヒーターを実際に動作させ、設計検証を行う (クエンチヒーター試験)。これらのデータをもとに実機用クエンチ保護ヒーターの設計改良を行う。
- 磁場測定: 01 号機で測定できなかった磁石中心における定格電流周辺までの電流依存性および定格電流における磁石長手方向の磁場分布の測定を行う。

2. 試験セットアップ

01b 号機の冷却・励磁試験は 01 号機同様 KEK 超伝導低温工学センター第 4 低温棟・縦型クライオスタットで行った。励磁時の磁石構造体の応力変化について詳しく見るために (特に磁石長手方向に) ひずみゲージのチャンネル数を増やすなどの改良を行ったが、基本的には 01 号機同様のセットアップで行った。また、磁場測定用回転コイルについては 01 号機と同様、ダイポールバックリングできるように 350 x 30 mm² サイズのコイル 3 つ並べたものを用いた。測定プローブの詳細については [2], [3] を参照されたい。

3. 冷却・励磁試験

3.1 改良後のトレーニングクエンチ

改造前 (MBXFS01) と改造後 (MBXFS01b) のトレーニングクエンチの結果を Fig. 2 に示す。図中の SSL (Short Sample Limit) は、超伝導ケーブルの臨界電流・磁場特性とロードラインの交点の電流で決まる値を示し、

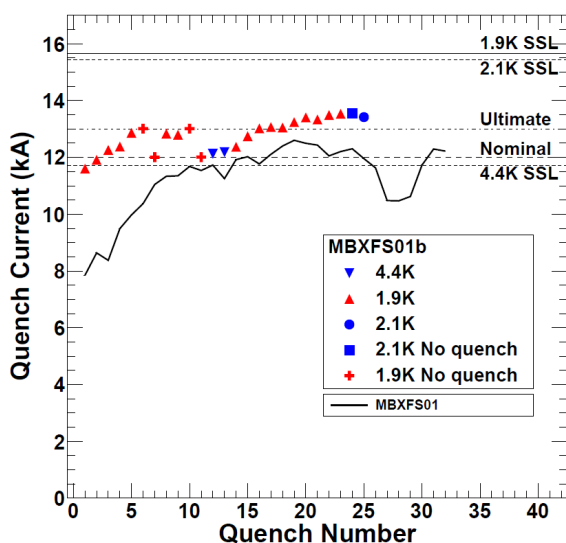


Figure 2: Training plots of the first 2 m Long model (MBXFS01) and the improved model (MBXFS01b). SSL=Short Sample Limit.

Nominal は定格電流 12kA、Ultimate は受け入れ基準電流 13 kA を示す。01b 号機のトレーニングクエンチ特性は格段に向上し、3 回目の励磁で定格電流を超え、また受け入れ基準には 6 回目の励磁で到達することができた。また昇温して 4.4 K で試験したところクエンチ電流が SSL とほぼ同レベルに達したことから超伝導線材としての性能は十分出ていることが確認できた。最終的に試験では 13.5 kA までトレーニングまで達成できたが、これは電磁気力の機械的支持に起因するものであることが示唆される。

クエンチ発生箇所についてコイルに取り付けた電圧タップ、およびクエンチアンテナで同定を行った。01 号機では、複数のターンで同時にクエンチしているような信号が見られ同定が困難であったが、01b 号機では、多くのイベントで、想定通り最大磁場付近でクエンチが発生していることを確認した。

励磁するとポール部分 (Pole: Fig. 1 参照) では、コイルはカラーから離れる方向にローレンツ力が働く。01 号機で予備応力の不足からポール部分でケーブルが動いてしまうことがクエンチ特性の劣化に起因すると考えられたが、01b 号機では組み立て工程でコイル予備応力を増加させた結果、01 号機と比較してより高い電流値 (定格電流 12 kA 以上) までコイル予備応力が残留していることも確認できた。

3.2 ヒータークエンチ試験

ヒーター試験は 01 号機では 9.5 kA までしか実施できなかったが 01b 号機では定格電流 12 kA まで実施した。

スポットヒーター試験は、超伝導コイルの低磁場と高磁場領域にそれぞれ取り付けられたヒーターにより、意図的にクエンチを生じさせ、クエンチ検出時間及びクエンチ伝搬速度を実験的に求めた。また、01 号機と 01b 号機の結果は再現性があることも確認できた。

クエンチ保護ヒーター試験では、ヒーター単体によるエネルギーダンプ試験を行った。Fig.1 に示すようにコイル外形に SUS をポリイミドシートで挟んだ薄いシート (0.125 mm) を設置するため熱接触が懸念されたが、設置した 4 つのクエンチ保護ヒーターで熱接触に大きな差がないことが確認できた。試作機により、クエンチ誘発されるために最低限必要なエネルギーを評価でき、実機用クエンチ保護ヒーターを設計するうえで必要なデータが得られた。

3.3 磁場測定

01b 号機では、クエンチ特性向上のためミッドプレーンに 0.8 mm シムを入れたため、多極成分では本来のデザイン値からは大きく異なることが分かっている。そのため今回の測定では、絶対値の議論ではなく、磁場測定の再現性や、多極成分に対する大口径の影響や鉄の飽和の影響などの相対的な比較・傾向についての議論を主眼に行う。

多極成分は、回転方向の磁場 B_θ の以下の式から得られる。

$$B_\theta(r, \theta) = B_{ref} \times 10^{-4} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{ref}}\right)^{n-1} \{b_n \cos n\theta + a_n \sin n\theta\} \quad (1)$$

参照磁場 B_{ref} は主双極磁場を示し、参照半径 R_{ref} は 50 mm (HL-LHC の衝突点磁石では直径の 1/3 と定義されている) とする。また、係数 b_n , a_n はノーマルとスキューの $2n$ 極の多極成分を示す。単位は [unit] である。

多極成分の磁場精度はメインダイポールに対して 10^{-4} 以下に抑えることが要求される。

磁石中心における磁場測定では最大 12.2 kA までの電流依存性測定を行った。01 号機、01b 号機のトランスファーフังก์ションの結果および電磁計算ソフト Roxie による 3D モデルの計算結果を Fig. 3 に示す。改善前後の測定結果はよく再現しており、6 kA 以上で鉄の飽和による影響が確認できる。また、磁場計算結果ともよく一致していることも確認できた。

次に、多極成分 (b_3) の電流依存性の結果を Fig. 4 に示す。ただし、先に述べたようにシムを入れることにより意図的にオフセットがずれることはわかっているので Fig. 5 ではオフセットを合わせる補正を行っている。トランスファーフังก์ション同様、改良前後の測定結果はよく再現している。一方、測定と計算では主に 2 つの大きな差異がみられる。1 つは、鉄の飽和が見られる領域で測定結果と計算で最大 10 units 以上の差が見られる。もう一つは 10 kA 以上で計算結果では立ち下がるのに対して測定結果はフラットに近い振る舞いを示す。

結論から述べると現在原因解明には至っていないが、長手方向の磁場分布測定の電流依存性から、大口径化に伴い端部からの漏れ磁場の効果が想定以上に見られており、計算モデルで再現しきれない可能性が示唆される。

また、その他の多極成分の磁場精度は双極磁石に対して 10^{-4} (1units) 以下であることが要求されているが、その他の多極成分 (a_n , b_{2m} : n, m は整数) では、1 units 以下であることを確認した。

長手方向磁場分布測定について、定格電流 12kA における多極成分の結果を Fig. 5 に示す。双極磁石で生じる多極成分 (Allowed) では、計算結果は絶対値の違いはあるが測定結果の傾向をよく再現している。一方、リードエンド (LE) を除いて対称性の保たれているため、本来生じるはずのない多極成分 (Un-allowed) では、リターン

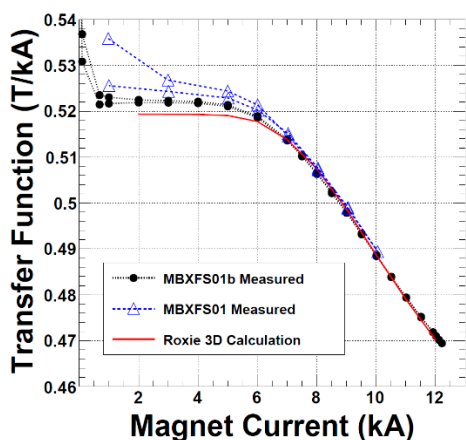


Figure 3: Transfer function at magnet center. Comparison between MBXFS01b measured, MBXFS01 measured and ROXIE 3D calculation.

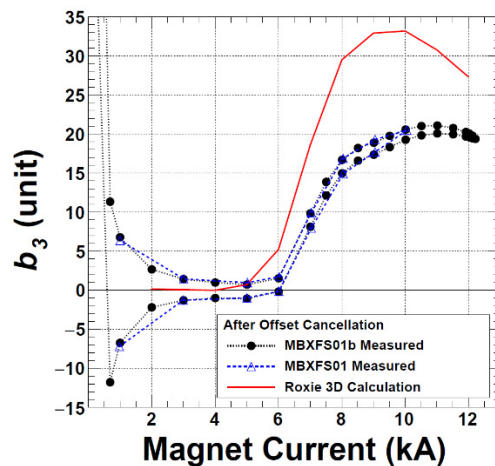


Figure 4: b_3 of DC loop after offset cancellation at the magnet center.

エンド (RE) でピークが確認できる。一つの可能性としてコイルのツイストが考えられ、 a_1 の RE のピークがツイストからくるものと仮定した場合、その角度は約 2.6 mrad になる。ただし、 a_1 に合わせて回転したときに他の un-allowed (a_3 , a_5) のピークは減少しないためツイストだけでは説明できない。コイルエンドは直線部に比べて予備応力が小さいため、冷却・励磁中に変形した可能性がある。実際、試験後の常温でコイルエンドブロックを観察するとケーブルが内径に変形している部分が見られたことから、コイルエンドでの変形による影響と考えられる。

4. まとめ

KEK では、LHC 加速器高輝度アップグレード用 D1 磁石開発を行っている。改良した 2m モデル磁石 1b 号機の冷却励磁試験を 2017 年 2 月から実施した。コイル予備応力増加させることにより、モデル磁石 1 号機では不完全であったトレーニング特性は改善した。その結果、定格電流 12kA および受け入れ電流 13kA 以上のクエンチトレーニングを達成した。磁場測定では、測定の再現性を確認するとともに多極成分においては十分な磁場性能が出ていることを確認した。一方で、 b_3 やコイルエンドでは測定結果に対して計算モデルとの差異が見られたため、これらについて計算モデルのフィードバックを行っている。

今後は、CERN 側からの仕様変更による鉄ヨークの断面形状の変更、コイル予備応力の増加および要求磁場特性に答えるためにコイルブロック再配置の検討、クエンチヒーターの設計を行い、モデル磁石 2 号機の制作を行う。そして、2018 年を目途に再度冷却励磁試験を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Sugano *et al.*, "Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (3)," presented at the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, 2016.

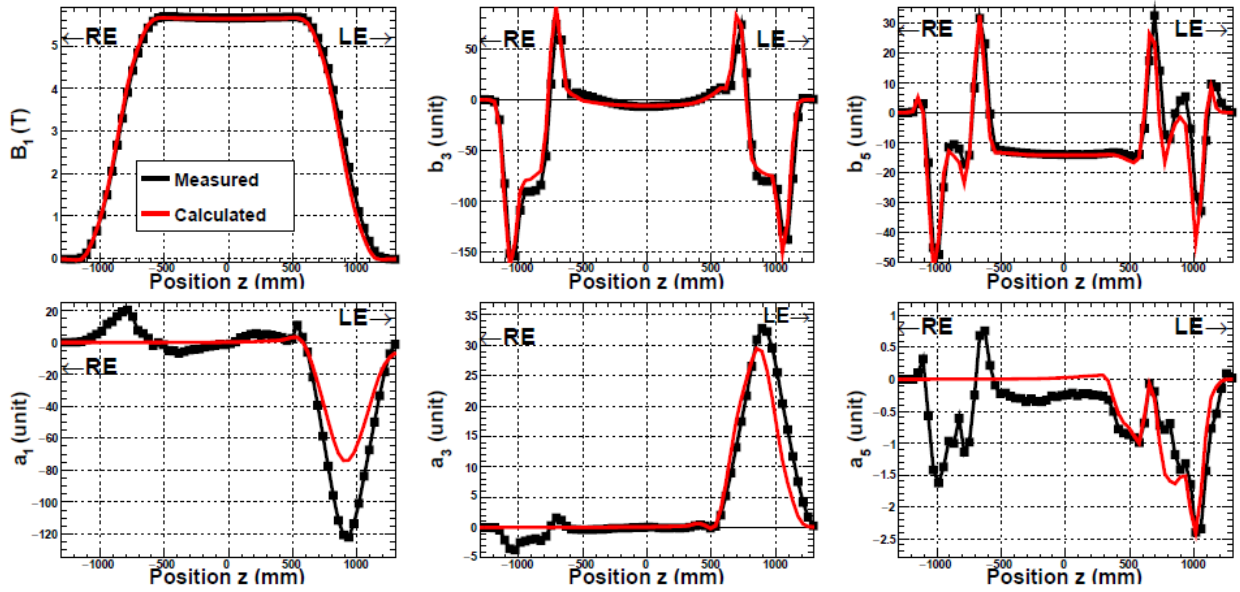


Figure 5: The result of main dipole B_1 , allowed multipoles (b_3 , b_5) and un-allowed multipoles (a_1 , a_3 and a_5) of z-scan measurement at 12 kA. Magnet center is 0 mm.

- [2] S. Enomoto *et al.*, “Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (4),” presented at the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, 2016.
- [3] S. Enomoto *et al.*, “Magnetic field measurement of 2-m-long model of beam separation dipole for the HL-LHC upgrade,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, Jun. 2017, Art. no. 0600705.