

## LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(4)

### -2 m モデル磁石の冷却・励磁試験-

#### DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR LHC LUMINOSITY UPGRADE (4) -TEST RESULTS OF THE 2 M MODEL MAGNET-

榎本瞬<sup>#, A)</sup>, 菅野未知央<sup>A)</sup>, 中本建志<sup>A)</sup>, 川又弘史<sup>A)</sup>, 岡田尚起<sup>A)</sup>, 岡田竜太郎<sup>A)</sup>, 東憲男<sup>A)</sup>, 荻津透<sup>A)</sup>, 佐々木憲一<sup>A)</sup>, 木村誠宏<sup>A)</sup>, 田中賢一<sup>A)</sup>, 大島洋克<sup>A)</sup>, 飯田真久<sup>A)</sup>, 菅原繁勝<sup>A)</sup>, 高橋直人<sup>A)</sup>, Musso Andrea<sup>B)</sup>, Todesco Ezio<sup>B)</sup>

Shun Enomoto<sup>#, A)</sup>, Michinaka Sugano<sup>A)</sup>, Tatsushi Nakamoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Kawamata<sup>A)</sup>, Naoki Okada<sup>A)</sup>, Ryutaro Okada<sup>A)</sup>, Norio Higashi<sup>A)</sup>, Toru Ogitsu<sup>A)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kimura<sup>A)</sup>, Ken-ichi Tanaka<sup>A)</sup>, Hirokatsu Ohhata<sup>A)</sup>, Masahisa Iida<sup>A)</sup>, Shigekatsu Sugawara<sup>A)</sup>, Naoto Takahashi<sup>A)</sup>, Andrea Musso<sup>B)</sup>, Ezio Todesco<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> European Organization for Nuclear Research (CERN)

#### Abstract

The High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has been developing the beam separation dipole magnet (D1) for the High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) upgrade. The magnet has a coil aperture of 150 mm using NbTi superconducting cable and dipole magnetic field of 5.6 T will be generated at 12 kA at 1.9 K to provide the field integral of 35 Tm. The excitation test at 1.9 K of the first 2-m-long model magnet has been carried out from April to June 2016 at KEK. In this report, test results of training quench, heater tests and magnetic field measurement of the first 2-m-long model will be presented.

#### 1. はじめに

欧州原子核研究機構(CERN)のLHC加速器では磁石への放射線によるダメージおよびルミノシティの増強にともない2024年頃にビーム衝突点近傍の超伝導磁石システムのアップグレードを計画している(高輝度アップグレード:HL-LHC)。現行LHCでは積分ルミノシティ $300 \text{ fb}^{-1}$ (ピークルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ )に対して、HL-LHCでは約10倍の増強(ピークルミノシティは5倍)を計画している。その中で高エネルギー加速器研究機構(KEK)はCERNとの国際協力の枠組みのもと、衝突点近くのビーム分離用超伝導双極磁石(D1)の開発を担っている。

現状のLHCのD1磁石では6台の常伝導磁石を用いているがHL-LHCのD1磁石はNbTi超伝導磁石を用いることで磁石長は23mから7mに短縮することができ、新たなスペースに補正コイル、クラブ空洞の新たな設置が行われる。D1磁石の主なパラメーターをTable 1に示す。定格磁場は5.57 T、積分磁場長は35 T・mとなる。技術的な課題としては、大口径化、放射線耐性、鉄の飽和などが上げられ、これらについて[1-2]、および本学会の講演[3]を参照されたい。

これまでKEKでは、性能検証のため、実機7mに対して直線部を短くした磁石機械長2mのモデル磁石1号機の開発を行ってきた。2016年3月に完成し、2016年4月から6月にかけて冷却・励磁試験を実施した。

冷却・励磁試験は、主に以下の3つの試験項目に分かれる。

Table 1: Design Parameters of D1 Magnet

General	7 m production	2 m model
Field integral	35 T・m	9.8 T・m
Coil aperture	150 mm	
Nominal dipole field	5.57 T	
Coil peak field	6.44 T in the straight section 6.56 T at coil end	
Nominal current	12 kA	
Operation temperature	1.9 K	
Stored energy	340 kJ/m	
Field quality	< $10^{-4}$ with respect to nominal dipole field	
Magnetic length	6.27 m	1.73 m

- トレーニングクエンチ試験: 4.2 K 及び 1.9 K において励磁試験を行う。定格電流 12 kA と受け入れ基準である 13 kA (定格に対して 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て、クエンチ保護用ヒーターを実際に動作させ、モデル磁石が安全に保護されることを確認する。
- 磁場測定: 磁石のボア中に常温クライオスタットチューブを挿入し、回転コイルにより磁場測定を行う。回転方向の磁場  $B_\theta$  は次式で表される。

<sup>#</sup> enoshun@post.kek.jp

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

参照磁場  $B_{ref}$  は主双極磁場を示し、参照半径  $R_{ref}$  は 50 mm とする。また、係数  $b_n$ ,  $a_n$  はノーマルとスキューの  $2n$  極の多極成分を示し、単位は[unit]である。

## 2. 試験のセットアップ

### 2.1 冷却・励磁試験

冷却・励磁試験は 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。クライオスタットは深さ 9 m あり、7 m 実機の試験にも用いられる予定である。Figure 1 に 2 m 磁石のインストール写真を示す。冷却運転のための液面計、温度計などが計装されている。磁石には、クエンチ発生場所を特定するために電圧タップ、冷却、励磁時の磁石構造体（カラー、ヨーク、シェル）の応力変化を測定するひずみゲージなどが取り付けられており、それらはトップフランジを介して測定機器に接続される。また、電圧タップとは別に間接的にクエンチ箇所を測定できるクエンチアンテナを磁石コアに挿入した常温クライオスタットに取り付けている。



Figure 1: Insertion of the 2 m model magnet to the 9 m-deep-vertical cryostat.

### 2.2 磁場測定方法

磁場測定用回転コイルは、常温クライオスタットに挿入される。回転コイルは Figure 2 に示すように 3 つのラジアルコイルから構成される。Coil-A はメインダイポールを測定するために用いられ、Coil-A と Coil-B をバックアップコイルとして用いて多極成分を測定する。通常の磁場測定ではロングコイル (350 × 30 mm<sup>2</sup>) を用いるが、コイルエンドの詳細な分布を測定する場合は、同じ基盤上のショートコイル (80 × 30 mm<sup>2</sup>) を用いる。得られた信号はデジタルインテグレータ (PDI5025) でデータ集積を行い、FFT (高速フーリエ変換) により多極成分をもとめる。

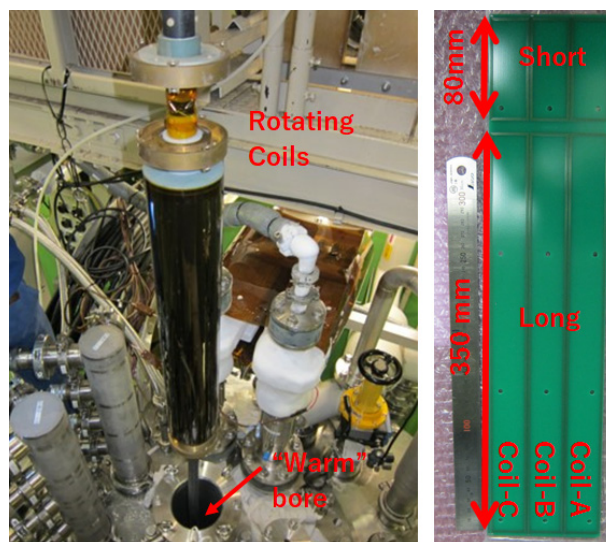


Figure 2: Rotating coils system and radial coils.

## 3. 試験結果

### 3.1 トレーニングクエンチ

トレーニングクエンチの結果を Figure 3 に示す。試験の都合で、最初に 4.45 K においてトレーニング試験を開始した。4回目以降は 1.9 K に冷却して、トレーニングクエンチを継続したが、徐々にクエンチ電流が上昇している様子が分かる。途中、12 回目と 13 回目の励磁の間に、常温までのサーマルサイクル (昇温・再冷却) を行ったが、クエンチ電流が大きく下がることなく、トレーニングメモリーがよく残っていることを確認できた。結局トレーニングクエンチでは定格を超える 12.6 kA まで到達することができたが、その後はクエンチ電流の上昇は留まり、受け入れ基準である 13 kA まで到達することができなかった。試験の終盤には、むしろクエンチ電流が低下する傾向が見られた。原因調査のため、一旦昇温して 4.45 K での試験 (28, 29 回目) を行ったが、4.45 K での臨界電流 (11.5 kA) に対して 90% 以上通電できることを確認できた。このことから、超伝導線材が損傷している可能性は低いと考えられた。

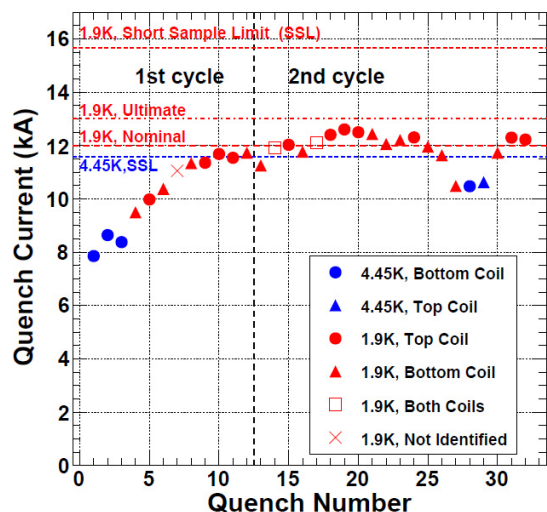


Figure 3: Training plot. SSL= Short sample limit.

次に、励磁時の超伝導コイルへの応力変化の測定結果について示す。Figure 4 は超伝導コイルに接するカラー磁極部にかかる予備応力の変化量を示したものである。励磁していくと、コイルにはカラーから離れる方向にローレンツ力がはたらく。そのためカラーに掛かる予備圧縮応力は徐々に減少していき、最終的に 8.5 kA 以上になると抜け切ってしまう( $\Delta\sigma$ が変化しなくなる)ことが分かった。このことがトレーニング性能に影響を与えている

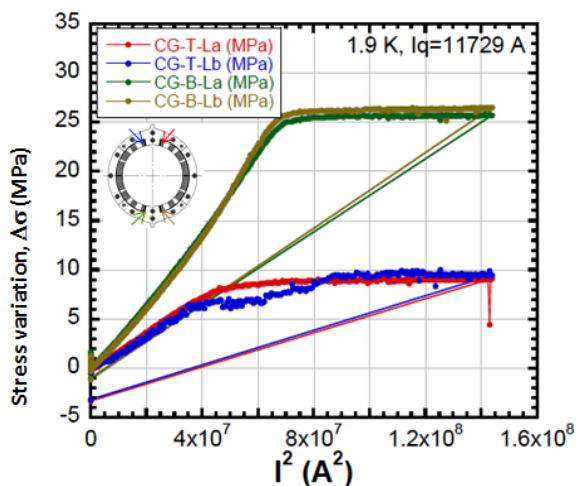


Figure 4: Stress variation at collar pole during excitation.

可能性が高いため、改善することを検討している。

### 3.2 ヒータークエンチ試験

ヒーター試験は連続して安定通電できる 9.5 kA まで実施した。スポットヒーター試験により低磁場と高磁場で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ることができた。また、クエンチ保護ヒーター試験では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

価できた。モデル磁石2号機で組み込まれるクエンチ保護ヒーターはこれらのデータをもとに設計改良を行う予定である。

### 3.3 磁場測定

磁場測定では、磁石中心における最大 10 kA までの電流依存性測定および z 方向分布の測定を行った。Figure 5 にトランスファーファンクションの結果について示す。6 kA 以上で鉄の飽和による影響が確認でき、磁場計算結果は測定値を再現していることを確認できた。

また、多極成分( $b_3$ ,  $b_5$ )の電流依存性の測定結果を Figure 6 示す。コイル幾何学形状の影響が主に反映される 4 kA 以下の領域では、 $b_3$  のついで計算結果と約 4 unit の系統的な違いが観察された。これはコイル形状や配置の約 50  $\mu\text{m}$  程度の誤差により説明することができる。6 kA 以上の領域では、鉄ヨーク飽和の影響が顕著となる

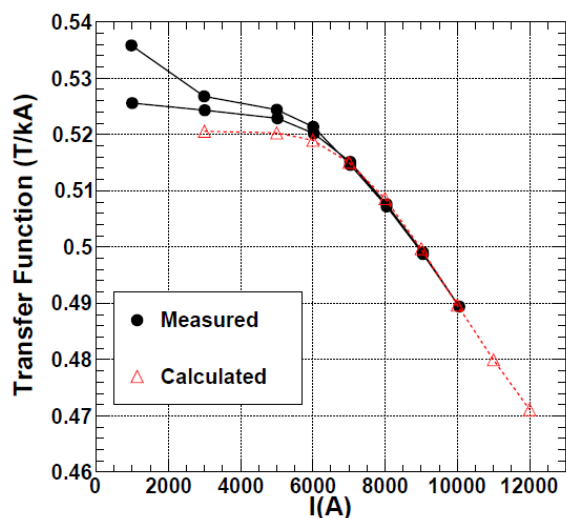


Figure 5: Transfer function measurement at coil center.

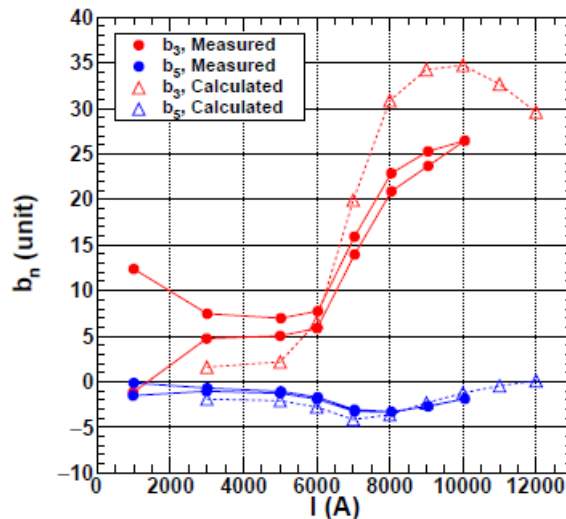


Figure 6: DC loop at coil center. Comparison between measured and calculated  $b_3$  and  $b_5$ .



が、傾向は再現するものの計算との不一致が確認できた。

Z方向の分布測定では Figure 7 に示すように  $b_3$  などの 2 極磁石の allowed の Normal 多極成分についてはコイルエンドでの大きな磁場変化もよく再現しており、積分磁場も計算結果をよく再現している。一方 Un-allowed の多極成分では Figure 8 に示すようにコイルのリードエンド(LE)、リターンエンド(RE)で計算結果と大きな差異が見られた。

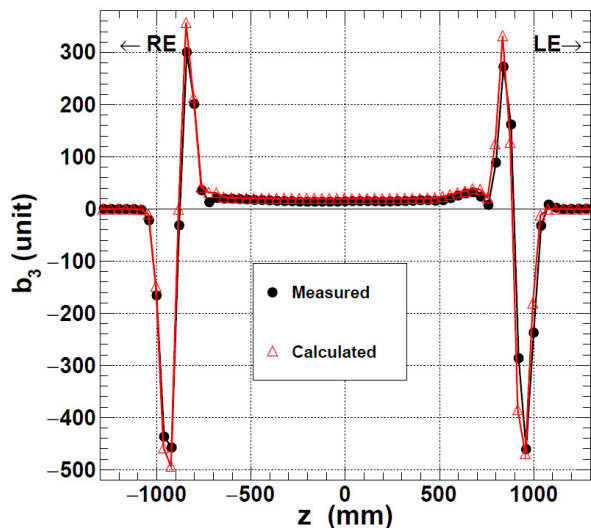


Figure 7: Allowed multipole  $b_3$  of z-scan measurement at 7 kA. Magnet center is 0 mm.

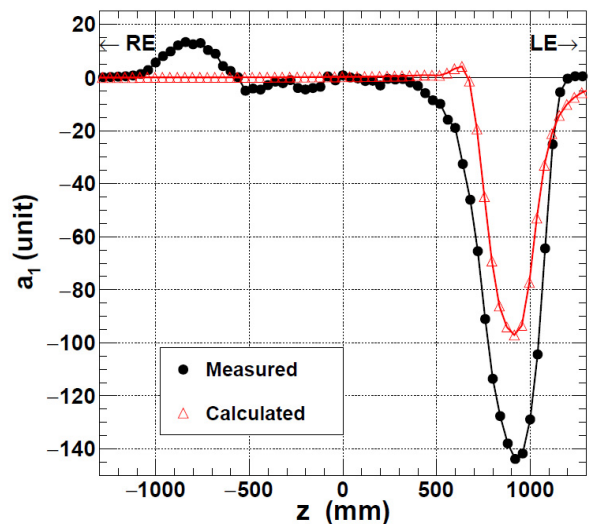


Figure 8: Un-allowed multipole  $a_1$  of z-scan measurement at 7 kA.

#### 4. まとめ

LHC 加速器高輝度アップグレード用 D1 磁石の 2 m モデル磁石 1 号機を試作し、冷却励磁試験を実施した。クエンチ試験、ヒーター試験、磁場測定を行い、磁石の性能評価を行った。

この結果、特にクエンチ性能に課題が見つかったため、冷却試験後に本磁石の改造を進めている。そして、2016 年末を目途に再度冷却・励磁試験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Nakamoto *et al.*, “Model magnet development of D1 beam separation dipole for the HL-LHC upgrade,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, 2015, Art. ID 4000505.
- [2] M. Sugano *et al.*, “Development status of 2 m model magnet of beam separation dipole for the HL-LHC upgrade,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 4, 2016, Art. ID 4002606.
- [3] M. Sugano, presented at the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, 2016.