

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(3) -2 m モデル磁石製作-

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR LHC LUMINOSITY UPGRADE (3) - FABRICATION OF THE 2 M MODEL MAGNET -

菅野未知央^{#,A)}, 中本建志^{A)}, 榎本瞬^{A)}, 川又弘史^{A)}, 岡田尚起^{A)}, 岡田竜太郎^{A)}, 東憲男^{A)}, 荻津透^{A)},
佐々木憲一^{A)}, 木村誠宏^{A)}

Michinaka Sugano^{#,A)}, Tatsushi Nakamoto^{A)}, Shun Enomoto^{A)}, Hiroshi Kawamata^{A)}, Naoki Okada^{A)}, Ryutarō Okada^{A)},
Toru Ogitsu^{A)}, Kenichi Sasaki^{A)}, Nobuhiro Kimura^{A)}

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

Abstract

High luminosity LHC upgrade (HL-LHC) project is ongoing at CERN. The goal of this project is to achieve the peak luminosity of $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-2}$ and the integrated luminosity of 3000 fb^{-1} . One of the key technical challenges for this goal is upgrade of superconducting magnets at the insertion regions on both sides of two interaction points, ATLAS and CMS. KEK is in charge of development of beam separation dipole (D1 magnet). The requirements for new D1 are coil aperture as large as 150 mm and field integral of 35 Tm at the nominal current of 12.0 kA and operating temperature at 1.9 K. The mechanical length of production magnet is around 7 m. After series of design studies, we started fabrication of 2 m model magnet in KEK to establish technologies for the production magnets. In this paper, we report on overview of D1 magnet, magnetic and mechanical design and fabrication of 2 m model.

1. はじめに

欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の高輝度アップグレード計画 (High Luminosity LHC, HL-LHC) が進行中である。本プロジェクトでは、ピーク luminositiy を $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (現行 LHC の 5 倍)、積分 luminositiy を 3000 fb^{-1} (同 10 倍) に向上することを目指している[1]。これを実現するためには、2 箇所の衝突点 (ATLAS, CMS) の左右のビーム挿入部磁石の高機能化が不可欠である。

Figure 1 に現行の LHC と HL-LHC 後の衝突点近傍の磁石配置を示す[2]。HL-LHC において CERN とアメリカが担当する最終収束四極磁石 (Q1-Q3) には、高磁場化を実現するために加速器用超伝導磁石として初めて Nb₃Sn 超伝導コイルが採用される予定である。一方、日本は Nb-Ti 超伝導線を用いたビーム分離双極磁石 (D1)

を担当する予定である。

衝突点でのβ関数 (β^*) を小さくするため、挿入部で一旦ビームを広げなければならず、Q1-Q3 には大口径化が必要になる。したがって、D1 磁石にも 150 mm という大口径が求められる。一方で、Q1-Q3 の全長が長くなるため、D1 にはより強いキックが必要になる。以上の要求を満たすために、6 台の常伝導磁石 (定格磁場 1.28 T、全長約 20 m、磁極間ギャップ 63 mm) で構成されている現在の D1 磁石を超伝導磁石 (5.57 T、磁場長 6.28 m、コイル口径 150 mm) に置き換えることが計画されている。

前回の報告では、コイル口径が 160 mm の段階での磁石設計について報告した[3][4]。その後、2013 年 5 月にコイル口径 150 mm を含む主要な要求仕様が確定した。

KEK では D1 磁石の実機製作に先駆けて、2 m モデル磁石の開発を行っている[5][6]。本講演では、D1 磁石の概要、設計および KEK 所内での 2 m モデル磁石 1 号機の製作について報告する。なお、引き続き実施した冷却、励磁試験の結果については[7]で報告する。

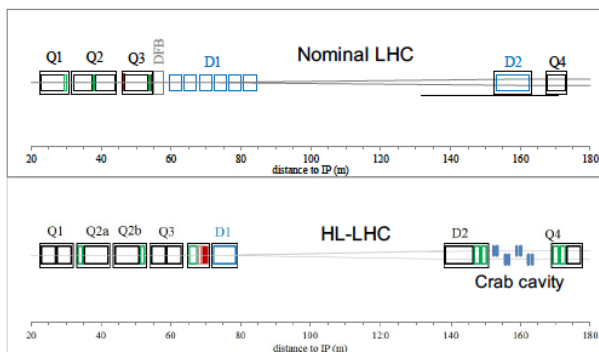


Figure 1: Layout of magnets around the interaction point. (ATLAS and CMS) in nominal LHC and HL-LHC.

[#] michinaka.sugano@kek.jp

2. D1 磁石の概要

D1 磁石の設計パラメータについて、実機磁石 (Production) と 2 m モデル磁石の値を Table 1 にまとめる。150 mm の大口径と、実機において 35 Tm の積分磁場 (運転電流 12.0 kA、運転温度 1.9 K) が要求されている。これは、5.57 T の主双極磁場に相当する。実機の磁石機械長は約 7 m である。一方、2 m モデル磁石は、実機コイルとコイル端部が同一だが、直線部分を短縮した設計となっている。負荷率はコイル直線部で 75%、端部で 77% である。磁場精度の多極成分は参照半径 50 mm で主双極磁場の 10^{-4} 以下を目標としている。高輝度化に伴う放射線量の増大により、磁石全体で 135 W、超伝導コイルへのピーク入熱 2 mW/cm^3 、 3000 fb^{-1} に

Table 1: Design Parameters of D1

	Production	2 m model
Coil aperture	φ150 mm	
Nominal current	12.0 kA	
Operating temperature	1.9 K	
Field integral	35 Tm	9.8 Tm
Nominal dipole field	5.57 T	
Coil peak field	6.44 T in the straight section 6.55 T at coil end	
Load line ratio	75.4% in the straight section 76.6% at coil end	
Field quality	<10 ⁻⁴ with respect to nominal dipole field	
Differential inductance	3.95 mH/m	
Stored energy	340 kJ/m	
Coil mechanical length	6.57 m	2.00 m
Magnet mechanical length	6.72 m	2.15 m
Heat load	135 W in total 2 mW/cm ³ at local peak	
Radiation dose	> 25 MGy	

相当する吸収線量 25 MGy が想定されている。

本磁石の技術的課題は以下のようにまとめられる。

- ・ 大口径コイルであるがゆえに、磁石組み立て、冷却、励磁によるコイルの変形量大きい。変形量を設計段階で正確に予測することが、要求される磁場精度の実現やコイルに負荷する予備応力を設計値に調整するために重要である。
- ・ コイルが大口径であるにもかかわらず、実機のクライオスタット寸法や既存治具の再利用という制約から鉄ヨークの外径はφ550 mm よりも大きくできない。結果として、コイルと鉄ヨークの距離が近くなり、局所的な鉄の飽和による誤差磁場や大きな漏れ磁場が予想される。

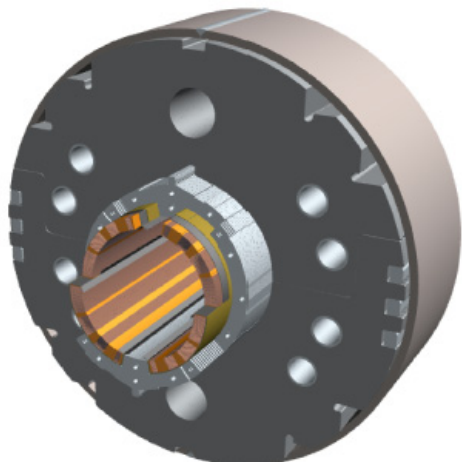


Figure 2: 3D exploded view of D1 magnet.

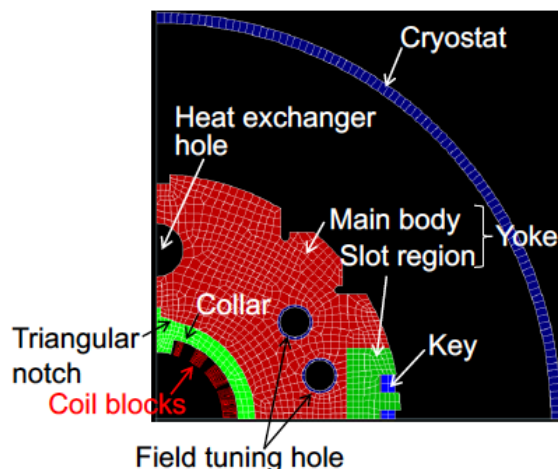


Figure 3: ROXIE model for 2D magnetic field calculation.

- ・ ウェッジやエンドスペーサーなどのコイル部品に用いられる GFRP に高い耐放射線性が求められる。

D1 磁石の断面構造を Figure 2 に示す。コイルは $\cos\theta$ 型であり、Cu/Nb-Ti 超伝導ケーブルと GFRP ウェッジで構成されている。高除熱性能と鉄ヨークの断面積を最大化するという観点から、単層コイル構造を採用した。4 コイルブロックで、各ブロックのターン数は 19、13、8、4 (合計 44 ターン) である。耐放射線性有機材料として新たに開発した、ホウ素フリーの S2 ガラス繊維とビスマレイミド-トリアジン樹脂製の耐放射線性 GFRP をウェッジに採用した。この材料は、100 MGy のγ線照射でも 3 点曲げ強度に劣化がみられないことが確認されている[5]。

コイルとヨークの間にはスペーサーおよび磁極 (Pole) 部のコイル位置決め役を担うカラーを配置する。本磁石では磁場精度への影響を考慮して、4.2 K での非透磁率 1.002 を有するステンレスをカラーに採用した。本磁石では 4 分割構造のカラーを採用した。これは、大口径コイルであるがゆえに、従来の 2 分割構造ではカラーの腕の部分のアスペクト比が大きくなり、精密打ち抜きによる製作時の反りがカラーの組み立て性に悪影響を及ぼすことが懸念されたためである。

D1 磁石においては、低炭素鋼製のヨークが磁石の剛性を担っている。後述するように、上下のヨークをカラードコイルに組み付け、ヨークの肩部分をプレスした後、ロックキーを挿入し、コイルに負荷した予備応力を保持する。

コイルへの入熱は速やかに熱交換器まで導き除熱する必要がある。鉄ヨークの上下に開けられた 2 つの穴 (φ60) は熱交換器を通すためのものである。さらに、積層構造のカラー、ヨークの充填率は 96%、98% に調整され、かつ長手方向の熱パスも考慮した空隙を意図的に設けて超流動ヘリウムの流路を確保している。

3. 磁石設計

3.1 磁場設計

ROXIE を用いて要求される磁場精度を満足するための磁場設計を行った。まず、コイル直線部の 2D 断面に

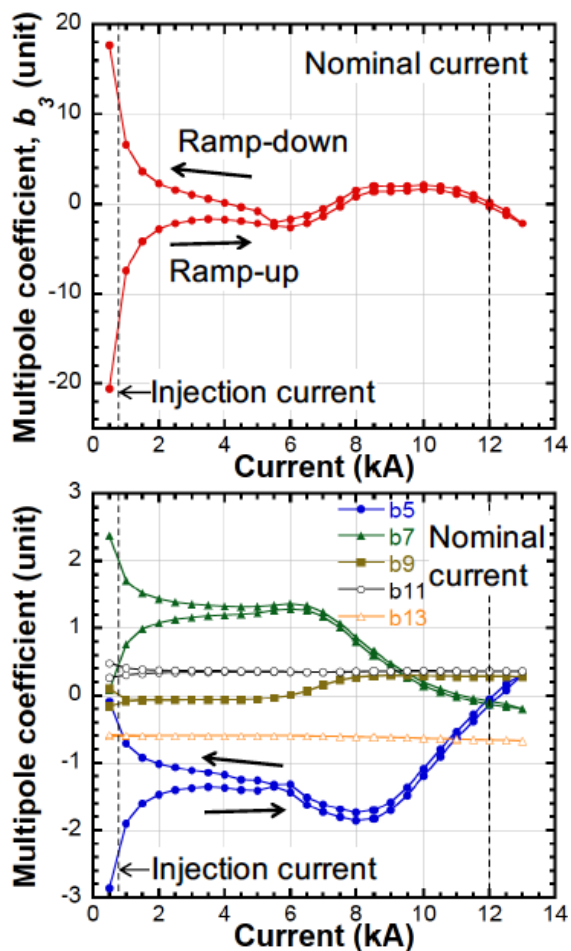


Figure 4: Multipole coefficients during current ramping-up and down.

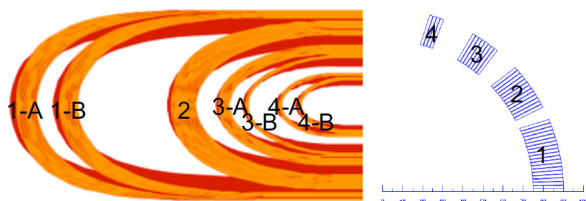


Figure 5: Coil end shape for 7 m production magnet (left). 2D cross-section in the straight section (right).

Table 2: Multipole Coefficients at $I=12.0$ kA Averaged over Coil Length for 7 m Production Magnet

\bar{b}_3	0.490 unit	\bar{b}_{15}	-1.085 unit
\bar{b}_5	0.271 unit	\bar{b}_{17}	-0.737 unit
\bar{b}_7	-0.644 unit	\bar{b}_{19}	0.379 unit
\bar{b}_9	-0.449 unit	\bar{a}_1	-4.745 unit
\bar{b}_{11}	0.033 unit	\bar{a}_3	1.666 unit
\bar{b}_{13}	-0.718 unit		

における超伝導ケーブル配置の最適化を行った。磁場計算に用いたモデルを Figure 3 に示す。

磁場計算においては、鉄ヨークや鉄クライオスタットの非線形な $B-H$ 曲線を考慮している。鉄の飽和の影響を緩和するために、飽和の著しい Pole 部の鉄をあらかじめ除去するための三角ノッチや、1/4 断面あたり 2 個の磁場調整穴を設けた[8]。また、磁場精度に影響を及ぼすと予想される因子を最大限モデルに反映した。例えば、鉄ヨークに構造上発生する局所的な充填率の違い(ヨーク本体で 98%、スロット部で 95%)やステンレススカラーのわずかな透磁率もモデルに取り込んだ。

磁場精度は次式により評価した。

$$B_y + iB_x = 10^{-4} \times B_{ref} \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad (1)$$

ここで、 B_{ref} は主双極磁場 (B_1)、 R_{ref} は参照半径 (50 mm)、 b_n 、 a_n はノーマル、スキューの多極磁場係数である。

多極成分を低減するために鉄ヨーク形状、およびコイルブロックの配置を最適化した後の多極磁場係数の電流依存性を Figure 4 に示す。定格電流では、 $b_3 \sim b_{13}$ の全てで 1 unit 以下に抑えられていることがわかる。 b_3 の電流依存性に注目すると、定電流で ramp-up と ramp-down で大きな差がみられるが、これは超伝導ケーブルに生じる磁化電流の影響である。一方、6 kA 以上でみられる変動は鉄の飽和によるものである。前述のように、三角ノッチや磁場調整穴の形状や位置を調整することにより、飽和の影響が数 unit 以内に抑えられている。

コイル端部の形状は 7 m 長の実機磁石の磁場精度を最適化するように以下の点を考慮して設計した。

- 端部を含む磁石全体での多極磁場係数の低減
- 巻線性を考慮したケーブルの曲面形状の最適化
- ピーク磁場の低減とコイル端部のケーブル形状予測の容易化のためのコイルブロックの再分割

Figure 5 に最適化後のコイル端部形状を示す。各コイルブロックに付した数字は直線部の 2 次元断面のコイルブロック (1~4) に対応しており、A, B は端部で再分割されていることを示している。コイルブロック 1-B と 2 の間に大きなギャップが設けられていることが目につくが、これは磁石全体の多極磁場成分を低減するための最適化の結果である。

7 m 磁石の全長で積分した多極磁場成分を Table 2 に示す。表中の値は式(2)で定義された値である。

$$\bar{b}_n = 10^4 \times \frac{\int B_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz} \quad (2)$$

$$\bar{a}_n = 10^4 \times \frac{\int A_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz}$$

大きなスキュー成分が生じているが、これは非対称なランブリードによるものである。以上のコイル端部設計に基づいて、エンドスペーサーを製作した。

3.2 構造設計

D1 磁石の 2D 断面の構造設計のため、組み立て、冷却、励磁の各プロセスを模擬した ANSYS による有限要素法解析を行った。

ヨーキングにおいて、キー挿入により鉄ヨークのキー溝周囲に最大応力が発生する。Figure 6 にキー挿入後の

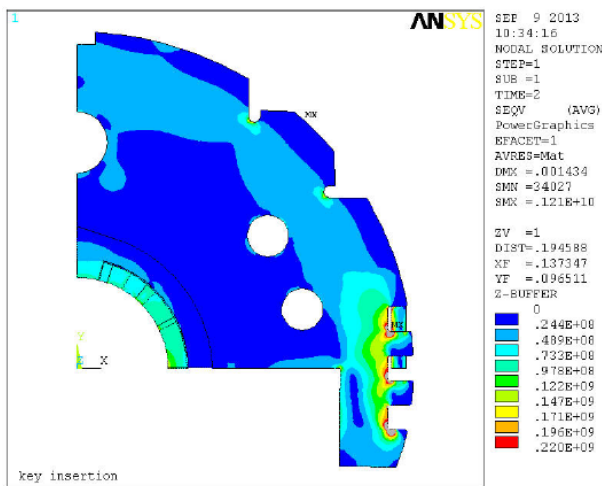


Figure 6: Stress distribution in iron yoke after key insertion.

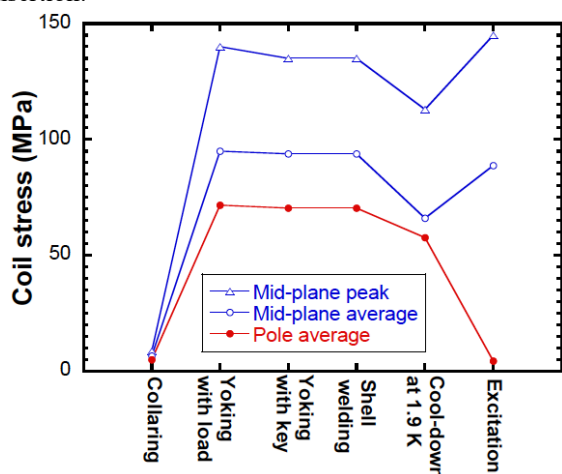


Figure 7: Coil stress after each step calculated with ANSYS.

ヨークの応力分布の解析結果を示す。キー溝周辺の応力は 220 MPa 以下であり、使用した低炭素鋼の降伏応力以下に収まっていることを確認した。シェル溶接の過程では、溶接によりシェルの周方向に生じる引張応力を与えた。その後、磁石を 2 K まで冷却時の熱応力、および定格電流の 110%まで励磁したときにコイルに発生するローレンツ力を含めた応力解析を行った。

$\cos\theta$ 型の双極磁石の場合、Pole ターンのケーブルを Pole から引き離す方向にローレンツ力が作用する。したがって、これに抗する圧縮応力を組み立て段階で予備応力としてコイルに負荷する。具体的には、巻線段階でコイルを最終寸法よりも大きめに製作し、ヨーキングで最終寸法まで圧縮することにより必要な予備応力をコイルに与える。今回は、コイル励磁後も Pole ターンが圧縮応力状態を維持できるように、予備応力の条件を変えた計算を繰り返し行った。Figure 7 に各プロセス後のコイル (Pole ターンと mid-plane ターン) 応力を示す。この結果から、Pole ターンに必要な予備応力が 70 MPa と見積られた。モデル磁石においては、10 MPa のマージンを加えて予備応力の設計値を 80 MPa とした。

4. 2 m モデル磁石の製作

磁場、機械設計に基づいて製作した GFRP ウェッジ、エンドスペーサーと Cu/Nb-Ti ケーブルを用いて 2 m 長さのコイル 2 台の巻線を行った。GFRP とケーブル間の接着には耐放射線性のシアネートエステルを接着剤として用いた。一方、ケーブル同士の接着は、ケーブル絶縁の最外層のポリイミドテープの自己融着を利用した。

コイル成形を目的として、巻線後のコイルの加圧加温処理を行った。加温条件は、シアネートエステルの硬化、ポリイミドの自己融着およびケーブルの表面に素線間の抵抗調整のためにコートされた Ag-Sn ハンダの融点以下という条件を考慮して決定した。実際には、150°C、4 時間、180°C、8 時間、190°C、30 分という多段の熱処理プロファイルを採用した。Figure 8 にキュアリング後のコイルの写真を示す。

キュアリング後のコイルの寸法測定を実施した。専用の測定装置を用いて、mid-plane に圧縮応力を負荷した。コイルが最終寸法まで押し込まれるために必要な応力と予備応力の設計値を比較することで、オーバーサイズの量が所定の値になっているかどうかを確認した。結果として、コイル直線部で均一かつ設計値に対して許容範囲内のコイル寸法が得られていることが確認された。

コイルの外径面にクエンチ保護ヒーター、対地絶縁シート、ブラッシュを順に配置したのち、カラー組み付けを行った。カラー形状はコイルブロック配置に直接影響を及ぼすので、高い寸法精度が要求される。今回は、精密打ち抜きにより、厚さ 2.3 または 2.6 mm のステンレスシートから Figure 9 に示すようなカラー板を製作した。製作後の主要部分の寸法精度は±10 μm であることが確認された。

上記 2 種類の厚さのカラー板を交互に積層することでカラーサブスタックを形成するカラーサブスタックをコイルに対して上下、左右に配置し、油圧プレスにより加圧した後、ピンで連結して固定する。以上のカラーリング作業において、今回採用した 4 分割カラーの組み立て性に問



Figure 8: Two 2-m long coils after curing.

題がないことを確認した。
ステンレスカラーに加えて、ランプリードが取り出される

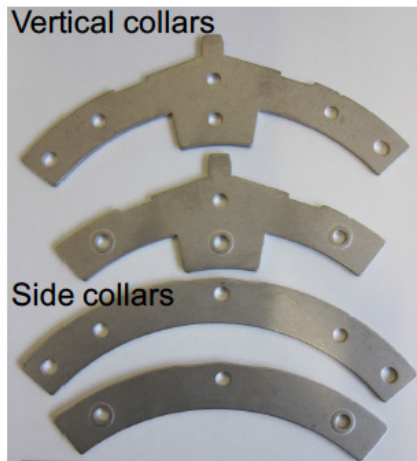


Figure 9: Collar plates fabricated by fine-blanking.

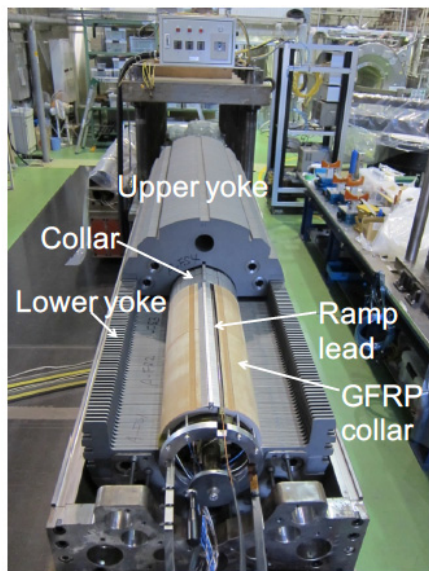


Figure 10: Magnet structure at lead end.

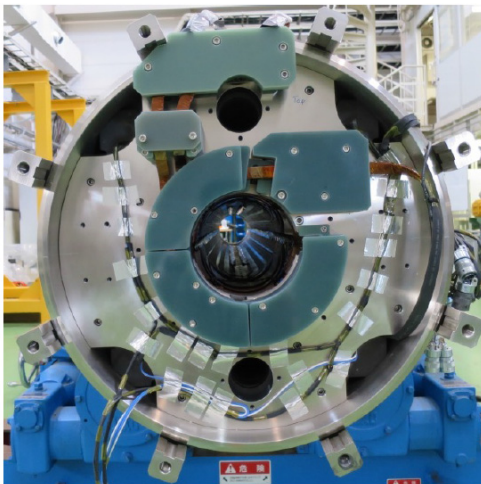


Figure 11: 2 m model magnet after shell and end-ring welding, and splice work for ramp leads.

端部(リードエンド)では Figure 10 に示す通り耐放射線性 GFRP 製のカラーを用い、ランプリードをクランプした。

ヨーク板もカラーと同様に精密打ち抜きにより製作した。厚さ 5.6 mm と 6 mm のヨーク板を交互に積層し、サブスタックを組み立てた。カラードコイルを上下のヨークサブスタックで挟み込み、上下ヨークのキー溝が揃うまで油圧プレスでヨーク肩に荷重を付した。左右 3 箇所ずつのキー溝にキーを挿入後に除荷し、ヨークキングが完了した。

カラー板に貼り付けたひずみゲージにより、Pole ターンの応力を測定したところ、ヨークキングによる予備応力の平均値として 65 MPa という値が得られた。これは設計値 80 MPa よりも低い値であるが、その可否については励磁試験で確認することとした。

ヨークキングに引き続き、2 m のハーフシェルの縦継ぎ溶接、コイルを長手方向から支持するエンドプレートの取り付け、エンドプレートを固定するエンドリングの磁石両端部での溶接を行った。最後に上下の 2 コイルのランプリード同士のハンダ付けを行い、Figure 11 に示すような 2 m モデル磁石の製作が完了した。

各製作工程後に、品質管理のため電気性能試験を行った。コイル抵抗、インダクタンス測定、サージ試験、耐電圧試験を行った結果、コイルの電氣的な健全性が確認された。

5. まとめ

CERN-LHC 加速器の高輝度アップグレード計画の一環として、KEK ではビーム分離双極磁石(D1 磁石)の開発を行っている。磁場設計、構造設計に基づき、KEK 所内で 2 m のモデル磁石 1 号機の製作を行った。モデル磁石の冷却、励磁試験を 2016 年 4 月および 6 月に 2 サイクルに分けて実施した。試験結果については[5]を参照されたい。

参考文献

- [1] R. Lossi and O. Brüning, "High Luminosity Large Hadron Collider," Conseil European pour la Recherche Nucleaire (CERN), Geneva, Switzerland, CERN-ATS-2012-236, 2012.
- [2] <https://espace.cern.ch/HiLumi/wp3/SitePages/Home.aspx>
- [3] T. Nakamoto *et al.*, "Model Magnet Development of D1 Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 2015, 4000505.
- [4] M. Sugano *et al.*, "Development Status of a 2-m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, 2016, 4002606.
- [5] T. Nakamoto *et al.*, "Development of Superconducting Magnets for LHC Luminosity Upgrade (1) -Scenario and contribution from KEK," Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, 232.
- [6] Q. Xu *et al.*, "Development of Superconducting Magnets for LHC Luminosity Upgrade (2) -Conceptual Design of a Large Aperture Dipole magnet for beam separation," Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012, 235.
- [7] S. Enomoto, presented at the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, 2016.
- [8] Q. Xu *et al.*, "Design of a Large Single-Aperture Dipole Magnet for HL-LHC Upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 2013, 4001305.