テーマ解説

LHC 高輝度化アップグレードのためのビーム分離超伝導双極磁石開発

菅野 未知央^{*1}

Development of the Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade

Michinaka SUGANO^{*1}

Synopsis: The large-aperture beam separation dipole (D1 magnet) needs to be developed for the high luminosity upgrade of the Large Hadron Collider (HL-LHC) at CERN. This magnet requires a field integral of 35 T·m at 12.0 kA and 1.9 K with a coil aperture of 150 mm. The technical challenges are controlling the pre-stress of the thin coils, achieving high radiation resistance and managing the iron saturation. In the framework of CERN-KEK collaboration, KEK is in charge of developing the D1 magnet and has been conducting design studies since 2011. A design including a single-layer coil based on Nb-Ti technology with a collared yoke structure was selected and fabrication of the first 2-m model started in 2015. In this paper, the overview and design studies of the D1 magnet are first introduced. Then, fabrication and test results of the first 2-m model are reported. Finally, future perspectives for the D1 production magnets are described.

Keywords: HL-LHC, superconducting accelerator magnets, dipole magnet, coil pre-stress, large aperture

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

世界最大の加速器研究所である欧州原子核機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider, LHC）は 2012 年にヒッグス粒子発見という大きな物理的成果を上げた¹⁾。しかし現行の LHC で実験を継続した場合、2020 年を過ぎると統計量蓄積の鈍化が顕著になり、統計誤差を半分にするために必要な実験期間として 10 年以上を要するようになる²⁾。また、そもそも最終収束四極磁石は 2023 年頃までに特に絶縁材料の放射線損傷が懸念され、磁石の交換が必要になる²⁾。これらの問題を克服するため、LHC 加速器の高輝度化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ルミノシティを $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ （現行 LHC の 5 倍）、積分ルミノシティを 3000 fb^{-1} （同 10 倍）に向上することを目指している²⁾。

日本は 1995 年から LHC の建設に正式に参加した。日本の貢献として、主要な 2 箇所の衝突点の一つである ATLAS の検出器開発に加えて、高エネルギー加速器研究

機構（KEK）超伝導低温工学センターは最終収束四極超伝導磁石（MQXA）の開発を担当した³⁾。こうした背景を踏まえ、KEK は ATLAS 実験の高精度化という観点から、2000 年代始めに LHC アップグレードの研究開発に参加した。当初は最終収束四極磁石の高磁場化のため、Nb₃Al 超伝導線材を用いた加速器磁石開発を目指していた。最終的には線材特性と磁石要求仕様との兼ね合いから、2011 年に KEK としては Nb-Ti 超伝導磁石による貢献に集中することに決定し、HL-LHC のためのビーム分離双極磁石の設計研究を開始した。

ビーム挿入部の超伝導磁石システムの高性能化は高輝度化の実現に重要な役割を果たす。参考文献 4 でも紹介されている通り、HL-LHC の最終収束四極磁石（Q1-Q3）には加速器磁石として初めて Nb₃Sn 超伝導コイルが採用される予定であり、CERN とアメリカが共同で開発を進めている。一方、上述のように日本は Nb-Ti 超伝導線を用いたビーム分離双極磁石（D1 磁石）を担当する予定である。この D1 磁石は衝突点で同一軌道に揃った対向する 2 本のビームをアーク部に向かって再び別軌道に分離する役割を果たす。

衝突点での β 関数 (β^*) を小さくするためには、挿入部で一旦ビームを広げなければならない。そのため、Q1-Q3 およびその後段の D1 磁石には 150 mm という大口径が必要になる。大口径化により Q1-Q3 に Nb₃Sn 磁石を用いて高磁場化するにも関わらず、磁場勾配は現行の 230 T/m か

Received January 31, 2017

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

E-mail: michinaka.sugano@kek.jp

DOI: 10.2221/jcsj.52.149

ら 140 T/m まで低下してしまう。この磁場勾配の低下を補うために Q1-Q3 の磁石長を長くする必要があり、その結果 D1 磁石とビーム再結合双極磁石 (D2) の距離は短くなる。これにより、D1 磁石により強いキックが必要となり、積分磁場として 35 T・m が求められる。以上の要求を満たすため、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) から構成される現行の D1 磁石を超伝導磁石 (主双極磁場 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。

本稿では、KEK が行っている D1 磁石開発について報告する。2 章で D1 磁石の設計の概要について説明したのち、3 章ではより詳細な磁場設計および構造設計について述べる。4 章では KEK 所内で行った 2 m モデル磁石 1 号機の製作について紹介し、その冷却・励磁試験の結果について 5 章で報告する。6 章ではモデル磁石開発と実機製作に向けた今後の展望について述べる。

2. D1 磁石の概要と設計

2.1 D1 磁石の特徴

D1 磁石実機および 2 m モデル磁石の主要な設計パラメーターを Table 1 にまとめた。前述の通り、コイル口径 150 mm および積分磁場 35 T・m が D1 磁石の最も重要な要求値である。これは、主双極磁場にして 5.57 T に相当する。運転条件は定格運転電流 12.0 kA、運転温度 1.9 K である。磁場精度の目標値は、参照半径 50 mm において多極磁場成分を主双極磁場に対して 10^{-4} (この値を 10000 倍して 1 unit と定義される) 以下に抑えることとしている。

実機の磁石機械長は 6.7 m であるが、設計や磁石製作方法の妥当性の検証を目的として、現在 KEK で 2 m モデル磁石の開発を進めている⁵⁻⁷⁾。

D1 磁石の技術的課題について以下に述べる。大コイル口径により、磁石組み立て過程におけるコイルの円周方向

寸法の変化はコイルの 1/4 象限ごとに数 mm にも及ぶ。この寸法変化を正確に予測することが、コイルに適切な予備応力を負荷するために必要になる。要求磁場精度を実現するための超伝導ケーブルのコイル内配置精度は数十 μm であり、これを満たすためにもコイルの変形量の管理は不可欠である。

D1 磁石は、大口径コイルであるにも関わらず、磁石の地下トンネルへの輸送や設置スペースの制約からクライオスタットの外径を現行の 914 mm に維持しなければならない。結果として、コイルと鉄ヨークの距離が近くなり、飽和の影響が磁場精度に顕著に現れる。したがって、鉄ヨークの飽和を十分に考慮した磁場設計が求められる。

高輝度化に伴って、磁石が経験する放射線量は増大する。D1 磁石の運転期間中の放射線量は 25 MGy と見積もられており、そのため磁石の絶縁材料として従来用いられてきたエポキシ樹脂を含むガラス繊維強化プラスチック (GFRP) が放射線損傷のため使用できない。そのため、D1 磁石では新たに開発した耐放射線性 GFRP を加速器磁石に初めて適用した。

磁石への入熱は磁石全体で 135 W、局所的な最大値として 2 mW/cm³ と見積もられている。この入熱を速やかに熱交換器まで運ぶため、磁石内部には一定量の空隙を設け、かつカラー、ヨークの充填率も一定値に調整されている。

2.2 磁石設計の概要

D1 磁石の断面を Fig. 1 に示す。2 台の超伝導コイル (トップ、ボトムコイル) が水平面 (ミッドプレーン) で向かい合わせになるように配置されており、磁極 (ポール) はコイル頂部に位置している。鉄ヨークの量を最大化し、かつ除熱性能を向上させるため、コイル構造として単層コイルを選択した。超伝導ケーブルは、現行 LHC 加速器の主双極磁石の外層コイルに用いられているものと同じ Nb-Ti/Cu ラザフォードケーブルを使用している⁷⁾。ケーブル絶縁として 1、2 層に 50 μm 厚のポリイミドテープ (カネカ製 APICAL) を、最外層には自己融着性ポリイミドを塗

Table 1 Design parameters of the D1 magnet

Design parameters	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 the coil end	
Load line ratio	75.4% in the straight section 76.3% at the coil end	
Field quality	< 10^{-4} with respect to nominal dipole field	
Nominal current	12.0 kA	
Operation temperature	1.9 K	
Differential inductance	4.0 mH/m	
Stored energy	0.34 MJ/m	
Heat load	135 W in total 2 mW/cm ³ at local peak	
Radiation dose	> 25 MGy	
Magnetic length	6.33 m	1.73 m
Coil mechanical length	6.57 m	2.00 m
Magnet mechanical length	6.72 m	2.15 m

Fig. 1 Cross-section of the D1 magnet.

布したポリイミドテープ（同 PIXEO）が巻きつけられている。

コイルは 4 ブロックから構成されており、各コイルブロックのターン数は水平面側からポールに向かって 19、13、8、4 ターン、合計で 44 ターンである。

コイルブロック間のウェッジには耐放射線 GFRP（有沢樹脂製）を用いる。この材料はホウ素フリーの S2 ガラス繊維とビスマレイミドトリアジン樹脂から構成されている⁸⁾。耐放射線性試験としてγ線照射後に 3 点曲げ試験を行った結果、従来の G10 では 10 MGy の照射で曲げ強度低下が観察されるのに対して、上記の耐放射線性 GFRP では 100 MGy の照射後においても強度の低下はみられなかった⁸⁾。

D1 磁石では鉄の体積を最大化するため、カラー・ヨーク構造を採用している。すなわち、カラーは機械的にはスペーサーとしての役割のみで、剛性は鉄ヨークが担う。

カラーはコイルブロックの配置決め、およびコイルと鉄ヨークの間のスペーサーとしての機能を果たす。材質は 4.2 K での比透磁率が 1.002 というステンレス（新日鐵住金ステンレス製 NSSC130S）である。本磁石の特徴の一つとして、双極磁場でありながら、4 分割のカラーを採用していることが挙げられる。これは、大口径コイルに従来の上下 2 分割カラーを適用した場合、幅に対して腕が長いアスペクト比の大きな形状になってしまい、カラーの打ち抜き加工で想定外の反りが生じて、カラーの組み立て性を悪化させることが懸念されたためである。

鉄ヨークには純鉄（JFE スチール製 EFE）を用いる。ヨーク側面にはロックキー用の溝が設けられており、ヨーク組み付け工程（ヨーキング）で負荷する予備応力をキー挿入により保持する。鉄ヨーク断面には熱交換器を挿入するφ60 mm の穴が上下に 1 個ずつ、また磁場精度調整のためのφ34 mm の穴 8 個も磁場計算により決定された位置に設けられている。

D1 磁石実機では磁石内部は流れのないヘリウムで満たされ、これを熱交換器内部に流れる飽和超流動ヘリウムからの熱伝導で冷却し、1.9 K の加圧超流動ヘリウム状態とする。コイルへの入熱を速やかに熱交換器まで輸送するためには He II の流路を確保する必要がある。したがって、上記の穴を含めたコールドマス内部の空隙を断面あたり 100 cm² 以上設け、さらに薄板の積層により構成されるカラー、ヨークの充填率をそれぞれ 96%、98%に調整するよう設計されている。

以上に加えて磁石開発における経済性も考慮し、過去に KEK 超伝導低温工学センターで開発した現行 LHC の MQXA や J-PARC ニュートリノビームラインの複合磁場型超伝導磁石（Superconducting Combined Function Magnet, SCFM）⁹⁾で使用した治工具類（巻線機、カラーリング用およびヨーキング用油圧プレス機など）を最大限活用する

こととした。そのため、鉄ヨークの外径は SCFM と同じ 550 mm に設定した。

2.3 磁場設計

磁場設計はコイルブロックの配置、鉄ヨーク形状を決定するための 2 次元磁場計算から始めた。磁場計算には CERN で加速器磁石設計のために開発された電磁計算ソフトウェアである ROXIE を用いた^{10, 11)}。解析モデルでは、コイルブロック、鉄ヨークに加え、磁性鉄性のクライオスタットや比透磁率 1.002 のステンレスカラーの影響なども考慮した¹¹⁾。定格電流である 12.0 kA において多極磁場成分を最小化することに加えて、ビーム入射に対応する 0.7 kA から D1 磁石性能試験の合格条件である 13 kA の間で鉄の飽和による多極磁場の変動を平坦化することを目指した。特に、ノーマル 6 極成分 (b_3) の低減のため、磁場調整穴の寸法、配置の最適化や、飽和の著しいポール付近の鉄を除去するため三角ノッチを設けるなど鉄ヨーク断面形状の最適化を行った¹⁰⁾。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、スクューの多極磁場係数である。

最適化後の多極磁場係数のうち b_3 の電流依存性を Fig. 2(a)に示す。ramp-up と ramp-down で低電流の b_3 に超伝導線の磁化による大きな差がみられる。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。前述の三角

Fig. 2 Multipole coefficients as a function of current. (a) b_3 and (b) other higher order allowed multipole coefficients.

Table 2 Multipole coefficients integrated over the entire coil length of the 7 m-long production magnet

$\overline{b_3}$	0.49	$\overline{b_{13}}$	-0.72
$\overline{b_5}$	0.27	$\overline{b_{15}}$	-1.09
$\overline{b_7}$	-0.64	$\overline{a_1}$	-4.73
$\overline{b_9}$	-0.45	$\overline{a_3}$	1.67

ノッチや磁場調整穴により、 b_3 の変動幅が数 unit 以内に抑えられている。さらに、Fig. 2(b)から定格電流 (12 kA) においては、高次成分を含む $b_3 \sim b_{13}$ の全てが 1 unit 以下に調整されていることがわかる。

2次元断面の決定後にコイルエンド形状の設計を行った。磁石実機全長 (約 7 m) にわたる積分多極磁場成分を最小化するため、各コイルエンドブロックの長手位置の最適化、巻線性を考慮し、ケーブルのひずみエネルギーを最小化するエンド形状の探索、ピーク磁場の低減およびエンド形状予測の容易化のための一部のコイルブロックの再分割を行った。

次式で定義される、最適化後の 7 m 実機モデルの全長で積分した多極磁場を Table 2 にまとめた。

$$\begin{aligned}\overline{b_n} &= 10^4 \times \frac{\int B_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz} \\ \overline{a_n} &= 10^4 \times \frac{\int A_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz}\end{aligned}\quad (2)$$

コイルの対称性から必ず生じる allowed の多極成分 (ノーマルの奇数次成分) は 1 unit 以下に調整されている。一方、大きなスキュー成分は、磁石外に取り出される非対称なコイル口出し部によるものである。

2.4 構造設計

有限要素法計算により行い、組み立て中に鉄ヨークに発生する最大応力やコイルに負荷すべき予備応力を見積った。

$\cos \theta$ 型磁石のコイルに作用する電磁力のうち、半径方向外側向きの成分はコイル周囲の構造体で容易に支持できる。一方、カラーから水平面に向かって作用する円周方向の電磁力はコイル自体で受け止めなければならない。この円周方向の電磁力によりコイル頂部がカラーから分離するとクエンチの原因となり得るため、電磁力に抗する圧縮の予備応力をあらかじめ組み立て工程 (本磁石ではヨーキング工程) で負荷する。コイルの最終寸法はヨーク内径で決定されるが、あらかじめコイルを大きく製作することにより、コイルに圧縮応力を発生させることができる。ANSYS による各組み立て工程、1.9 K への冷却、励磁を模擬したコイル応力を計算し、定格電流の 110% まで励磁した後もカラーのポール部分に接するケーブルが圧縮応力状態に保たれるための予備応力を見積った⁵⁾。これをもとに、コイル予備応力の目標値をポールに接するケーブルで 80 MPa、水平面で 104 MPa と設定した。

3. 2 m モデル磁石 1 号機の製作

3.1 コイル製作・寸法測定試験

2 m モデルマグネット 1 号機の製作は KEK 所内で行った。コイルエンドの設計をもとに所内で加工した耐放射線性 GFRP 製のエンドスペーサー (コイル端部でコイルブロック間に挿入するスペーサー)、および同材料製のウェッジを用い、張力を負荷しながらラザフォードケーブルを巻線した。GFRP スペーサーとケーブルの間の接着剤として耐放射線性のシアネートエステルを用いた。一方、ケーブル間の接着は絶縁テープの自己融着ポリイミドを使用した。

巻線後に、コイル成形を目的としたキュアリングを行った。コイルを U 字型の溝を有するブロックに押し込み、円周方向、長手方向にプレスした状態で最高温度約 200°C で加温した。この熱処理により、シアネートエステルの接着硬化とケーブル間の自己融着ポリイミド接着を行った。製作された 2 台の 2 m 長コイルの写真を Fig. 3 に示す。

キュアリング後のコイルが既定のオーバーサイズを有しているかどうかを確認するため、寸法測定を行った。専用の圧縮装置を用いて、コイルをヨーキング後の最終寸法まで押し込むために必要な応力を長手分布を含めて測定し、予備応力の設計値と比較した。コイルの直線部の押し込み応力の平均値は 95~97 MPa であり、水平面での予備応力設計値の 104 MPa との差は 10% 以下であることが確認された。一方、押し込み応力はコイルエンドに向かって低下し、最端部ではほぼゼロであった。このようなコイル端部での低い予備応力の影響については、クエンチ試験で確認することとした。

3.2 計測

クエンチ試験による電圧発生をモニターするため、コイル 1 台あたり 29 個の電圧タップをはんだ付けした。

また、磁石組み立て過程および励磁試験中の応力、ひずみ測定のため、磁石構成要素であるカラー、ヨーク、シェ尔にはひずみゲージを取り付けた。特に重要なコイルの予備応力はカラーのコイルと接するポール部分に貼りつけたひずみゲージにより測定した。

Fig. 3 Two 2-m coils.

Fig. 4 Four-way split collar.

Fig. 5 D1 model magnet during yoke assembly.

3.3 磁石組み立て

コイル外径面に D1 磁石で磁石保護を担っているクエンチ保護ヒーター (Quench protection heater, QPH) を組み込んだ。その外側に厚さ 0.125 mm の対地絶縁ポリイミドシート 4 層を巻き、機械的保護のための 0.5 mm 厚のブラッシュを組み付けた。

次にカラー組み付け (カラーリング) を行った。本磁石でコイルの位置決め機能を担うカラーの製作方法については、再現性を含めた寸法精度と経済性を考慮し精密打ち抜き技術 (ファインブランキング) を採用した。打ち抜き後の寸法測定の結果から、主要部分の寸法公差が $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内に収まっていることが確認された。カラーは Fig. 4 に示すように固定ピン穴を含む 2.3 mm 厚のカラー板 (fixing collar) とスペーサーの役割をする 2.6 mm 厚のカラー板 (spacer collar) の交互積層構造である。前述の通り、本磁石では上下と水平方向からの 4 分割カラーを採用している。それぞれのカラーサブスタックを隣り合う櫛刃部分を噛み合わせるようにコイルの周囲に配置し、4 方向からプレスした状態で長手に連結ピンを挿入することでカラー組み立てが完了した。以上のステンレスカラーに加えて、Fig. 5 に示す通りコイル端部では口出し部をクランプするための GFRP 製 4 分割円筒状カラーも併用している。

ヨークは Fig. 5 に示すように上下の 2 分割であり、キー溝を有する 5.6 mm 厚 fixing yoke と、6 mm 厚の spacer yoke の積層構造である。ヨーキングの手順を以下に説明

する。カラーリング後のコイルを上下ヨークで挟んだ状態で、ヨークの肩部分に油圧プレスで上下方向の荷重を負荷する。ヨークの水平面はテーパ構造になっており、その頂点がまず接触する。この状態でコイルはほぼ最終寸法まで圧縮され必要な予備応力が負荷される。さらにプレス荷重を増加させ、上下ヨークのキー溝が揃った後、ロックキーを挿入する。このようにヨークをバネに見立てた変形を利用することで、再現性よくコイル予備応力を調整できる。ヨーキング後にコイル円周方向の圧縮予備応力を測定し、目標値 80 MPa に対して 65 MPa であることが確認された。

シェルは半割円筒状のステンレス製の曲げ薄板をヨーク磁石の外面に縦継溶接することで組み付けた。磁石の両端面にエンドプレートを取り付け、これを固定するためのエンドリングをシェルに溶接した。最後に 2 台のコイルのサプライスハンダ接続を行い、2 m モデル磁石の組み立てが完了した。

4. 2 m モデル磁石 1 号機の冷却・励磁試験

4.1 クエンチ特性

KEK 超伝導低温工学センター内にある深さ 9 m の縦型クライオスタットにおいて、2 m モデル磁石 1 号機の冷却・励磁試験を実施した⁷⁾。Fig. 6 にモデル磁石をクライオスタットに挿入する様子を示す。サーマルサイクルの影響を確認するため、昇温、再冷却をはさんで 2 サイクルの試験を行った。試験内容としてトレーニングクエンチ、磁場測定、ヒーター試験を実施したが、紙面の関係でヒーター試験については割愛する。

トレーニングクエンチ試験は 4.45 K と 1.9 K で実施した。実機ではエネルギー取り出しは行わず、QPH によってクエンチ保護する設計であるが、本試験においては 73 mΩ のダンブ抵抗によりエネルギーを取り出した。クエンチ検出の閾値電圧は 0.1 V、検出時間は 10 ms とした。典型的な励磁速度は 10 A/s であった。

Fig. 6 Inserting the 2-m model magnet into the 9-m deep cryostat.

Fig. 7 にトレーニングクエンチ履歴を示す。冷却系、電源、計測システムの確認のため最初の 3 回は 4.45 K で行い、その後 1.9 K で一連の試験を行った。今回使用した超伝導ケーブルの short sample limit (図中の SSL、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) は 4.45 K、1.9 K でそれぞれ 11.6 kA、15.7 kA である。1 回目のクエンチは 4.45 K の SSL の 68% で発生した。12 回のクエンチ試験の後、昇温、再冷却を行ったが、その前後の電流の差 (図中の A と B) は 500 A 以下であり、良好なクエンチメモリーが確認された。15 回目のクエンチでクエンチ電流が定格電流である 12 kA に到達した (C)。最大クエンチ電流は 12.6 kA (D) であり、これは定格電流の 105% に相当する。一方で、本試験の範囲では合格条件である 13 kA (定格電流の 108%) には到達しなかった。さらに、D 以降でクエンチ電流が 12 kA 以下まで低下する現象が起こった。一旦温度を 4.45 K まで上昇させ、再度クエンチ試験を実施した結果クエンチ電流は SSL の 90% 以上であり (E)、かつ直前の 1.9 K でのクエンチ電流とほぼ同等であった。このことは、ケーブルの損傷ではなく、電磁力の機械的支持に起因するクエンチであることを示唆している。また、磁場測定後に再度トレーニングクエンチを実施したところクエンチ電流が 12 kA 以上まで回復した。以上のような不安定な振る舞いの原因は明らかになっていない。

Fig. 7 Quench history.

Fig. 8 Variation of the coil stress as a function of I^2 during a quench test.

クエンチ発生は主に水平面から 2 番目のコイルブロックで発生した。多くのケースでタップ間電圧信号からより詳細なクエンチ発生位置の同定 (直線部か端部かを含めて) はできず、複数ターンが同時にクエンチしている兆候が確認された。

励磁中のコイル応力変化の一例を Fig. 8 に示す。各曲線は磁石直線部のある断面における円周方向のコイル応力変化である。横軸は通電電流の 2 乗であり、電磁力に比例した値である。励磁開始直後は曲線がほぼ線形であり、予備応力が電磁力の増加にともなって減少していることがわかる。しかし、8.5 kA 以上で応力変化はほぼ一定になっており、予備応力が完全に解放されてしまったことを示唆している。この結果から、本磁石ではコイル予備応力が不足していることが確認された。Fig. 8 の初期勾配を 13 kA まで外挿して概算した予備応力の不足量は約 35 MPa であった。

Fig. 8 の応力一定のレベルから冷却後のコイル予備応力を求めると、その平均値は 17 MPa であった。冷却直前の室温でのコイル予備応力と比較すると、冷却により予備応力が 43 MPa 減少したことになる。これは ANSYS で計算した冷却過程での応力解放値 (13 MPa) と比較してかなり大きな値である。冷却による予備応力が予想外に大きかった原因としては、コイルのヤング率が ANSYS の計算で用いた値よりも高い値であったことが考えられる。2 m モデル磁石 1 号機を試験後に分解し、コイルの目視検査を行ったところ、直線部の一部で電磁力によってカラーのポールに接するターンののはく離が観察された。これは予備応力解放の証拠である。

以上は直線部での予備応力についての議論であるが、これに加えてコイルエンドでの予備応力についても検討する必要がある。3.1 で述べた通り、本モデル磁石では端部の予備応力が直線部と比較して非常に低かった。実際、分解後のコイルエンドブロックの最端部ではケーブルが内径側に変形している部分が見られ、電磁力支持が不十分であったことが示唆された。

以上の結果から、本モデル磁石でクエンチ特性を改善するためには予備応力の増加が不可欠であると結論づけた。

4.2 磁場性能

磁石の $\phi 150$ mm ボアに 9 m 長の断熱真空クライオスタットを挿入し、その室温ボアに回転コイルを挿入して磁場測定を行った¹²⁾。電流値は不安定なクエンチ特性を考慮して、定格電流よりも低い 10 kA 以下とした。回転コイルが磁石ボア中心から偏心していると、注目している次数よりも高次の多極成分により見かけの多極成分が誘起される (例えば、6 極以上の成分から見かけの 4 極成分が現れる)。これは Feed down 効果¹³⁾と呼ばれ、コイルの対称性から本来現れないはずの多極成分 (unallowed multipoles) が誤差として測定されてしまう。以下の磁場測定の結果は、この効果による測定誤差を補正した後の値である。

Fig. 9 に磁石の長手中心で測定した transfer function を示す。ROXIE による 3 次元磁場計算と測定結果がよく一致していることがわかる。6 kA 以上で transfer function の減少がみられるが、これは鉄の飽和によるものである。計算値から低電流と比較して 12 kA では約 10% の減少がみられ、顕著な飽和の影響が現れている。

同じく磁石の長手中心において各電流での多極磁場係数を測定した結果を Fig. 10 に示す。低電流で磁化の影響を除いた b_3 の値は磁石の幾何的な配置誤差によるものである。この幾何的 b_3 の測定値は計算値と比較して約 4 unit 大きくなっている (図中の Δb_3^g)。6 kA 以上での鉄の飽和による b_3 の急激な増加など定性的な振る舞いは計算でも再現できているが、定量的には一致しておらず計算モデルの改良が必要である。例えば、高電流では電磁力によるコイルブロックの変形の影響なども考慮に入れる必要がある。

Table 3 に 10 kA で磁石長手方向全体に渡って測定した積分磁場を直線部と端部の寄与に分けた値を示す。 b_3 、 b_5 では全ての区間で鉄の飽和の影響が観察されている。unallowed multipoles のうち a_2 はコイル端部で数 unit となっているが、これは feed down の補正が不完全であるためと考えられる。 a_1 ではコイル端部の付加的なツイス

Fig. 9 Transfer function measured at the coil center and calculated by ROXIE 3D.

Fig. 10 b_3 and b_5 measured at the coil center. Calculated values were also plotted for comparison. Δb_3^g shows the difference between the measured and calculated geometric b_3 .

Table 3 Field integral at 10 kA. The values with and without parentheses correspond to calculated and measured values. The magnet mechanical center is at $z=0$ mm. RE, SS and LE stand for return end ($z = -1925 \sim -525$ mm), straight section ($z = -525 \sim +525$ mm) and lead end ($z = +525 \sim +1925$ mm), respectively.

$\bar{b}_n$	RE	SS	LE	Total
1	1938(1965)	6032(6081)	2031(1954)	10000(10000)
2	0.25(0.00)	-0.36(0.00)	0.25(0.00)	-0.17(0.00)
3	-9.26(-7.70)	18.76(21.41)	-5.19(-5.50)	4.30(8.21)
4	0.21(0.00)	0.00(0.00)	0.07(0.00)	0.28(0.00)
5	-1.12(-1.73)	-1.14(-0.66)	1.42(-0.08)	-0.84(-2.46)
6	0.14(0.00)	-0.04(0.00)	-0.04(0.00)	0.06(0.00)
7	-1.34(-1.49)	0.18(0.20)	-0.62(-0.70)	-1.78(-1.99)
8	0.12(0.00)	-0.10(0.00)	-0.19(0.00)	-0.18(0.00)
9	-1.16(-1.32)	-0.02(0.09)	-0.92(-1.01)	-2.09(-2.23)
10	0.06(0.00)	-0.08(0.00)	-0.08(0.00)	-0.10(0.00)
11	-0.37(-0.55)	0.46(0.20)	-0.35(-0.46)	-0.25(-0.81)
$\bar{a}_n$	RE	SS	LE	Total
1	2.53(0.04)	-0.46(0.27)	-28.55(-17.11)	-26.47(-16.80)
2	-2.50(0.00)	-0.23(0.00)	-0.93(0.00)	-3.67(0.00)
3	-0.24(0.00)	0.29(0.13)	6.74(5.74)	6.78(5.88)
4	-0.26(0.00)	0.19(0.00)	0.23(0.00)	0.17(0.00)
5	-0.07(0.00)	0.05(-0.02)	-0.52(-0.52)	-0.54(-0.54)
6	-0.13(0.00)	0.03(0.00)	-0.02(0.00)	-0.12(0.00)
7	-0.01(0.00)	0.08(0.03)	0.36(0.39)	0.43(0.41)
8	-0.12(0.00)	-0.08(0.00)	0.07(0.00)	-0.12(0.00)
9	-0.06(0.00)	-0.09(-0.01)	0.00(-0.25)	-0.16(-0.16)
10	-0.05(0.00)	-0.03(0.00)	0.02(0.00)	-0.06(0.00)
11	0.02(0.00)	0.11(0.00)	0.06(0.03)	0.19(0.03)

ト変形によると推定される不一致も確認された。一方、これ以外の高次成分は十分に低い値であることが確認された。

以上の結果から本モデル磁石の磁場性能は概ね計算結果と一致したものの、 b_3 の電流依存性においてはより定量的な理解に課題が残った。

5. 今後の展望

5.1 2 m モデル磁石開発

2 m モデル磁石 1 号機のクエンチ特性を改善するため、コイルの予備応力を増加させた上で再試験を行う方針を決定した。1 号機を分解し、取り出したコイルの水平面にシムを貼り付けてコイルのオーバーサイズ量を増加させることで、ヨーキング後のコイル円周方向予備応力を 35 MPa 増加させた。この再組み立てモデルのトレーニング試験では、2 回のクエンチ後に定格電流、5 回のクエンチ後に合格条件 (13 kA) に到達した。この結果から、予備応力の増加によって磁石のトレーニング特性を大幅に改善できることが実証された。

予備応力の増加と要求磁場特性を同時に満足するためには、まずコイル直線部断面でのコイルブロックの再配置が必要になる。これに加えて、CERN 側からの要請により、鉄ヨークの熱交換器穴を 1 号機での上下 2 個から Fig. 11 に示すように最終収束四極磁石と同じ 45° の位置に 4 個に変更することが必要になった。この変更は transfer function や鉄の飽和に大きなインパクトを与えるため、鉄ヨーク磁場調整穴の配置、寸法および積分多極磁場を最小化するためのコイルエンドブロックの軸方向配置最適化が

Fig. 11 Tentative cross-section of the second 2-m model of the D1 magnet.

再度必要である。これらの再設計を現在進めている。

5.2 実機製作への展望

D1 モデル磁石開発は KEK が担当している一方、7 m 実機の製作を日本が担当するかどうかについては、未だ正式決定されていない。以前に日本が MQXA を担当したときには、担当範囲が実機コールドマスの製作、性能確認試験までであり、コールドマスのクライオスタットへの組み込みは米国・フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) が担当した。一方、D1 磁石の実機製作を日本が担当することになった場合は、クライオスタットの組み込みまでを含めて受け持つことが想定されている。製作台数は実機長のプロトタイプ磁石 1 台、実機は LHC の ATLAS、CMS 衝突点の両側に 1 台ずつ配置される 4 台とスペア 2 台の合計 6 台である。実機製作は入札により決定される日本の超伝導磁石メーカーが担当する予定である。

現在発表されている最新の情報¹⁴⁾では、CERN において挿入部のプロトタイプ磁石群を地上で連結し、同時に通電試験を行う「ストリング試験」が 2021 年に予定されている。また、2024 年から実機磁石の LHC 加速器トンネルへの設置が計画されている。

6. まとめ

CERN-LHC 加速器の高輝度化アップグレードへの日本の貢献の一環として、KEK においてビーム分離超伝導双極磁石の開発を進めている。2015 年から 2016 年にかけて磁場設計、構造設計に基づいて KEK 所内で 2 m モデル磁石 1 号機を製作し、冷却・励磁試験を行った。クエンチ試験の結果、定格電流には到達したものの、予備応力の不足により満足のいくクエンチ特性は得られなかった。一方、再組み立てモデルにおいて、予備応力を増加させることでトレーニング特性の改善に成功した。KEK 所内での 2 号機以降のモデル磁石の再設計、製作、性能試験と並行して、実機製作への準備も今後本格化させる予定である。

本解説で紹介した D1 モデル磁石の開発には KEK から以下のスタッフが参加しました。ご協力に感謝致します。中本建志、菅野未知央、榎本 瞬、川又弘志、岡田尚起、

岡田竜太郎、佐々木憲一、荻津 透、木村誠宏、田中賢一、大島洋克、飯田真久、東 憲男、高橋直人、菅原繁勝

また、本プロジェクトは KEK、CERN および多くの民間企業のご支援、ご協力のもとに進めています。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) <http://home.web.cern.ch/topics/higgs-boson>
- 2) R. Lossi and O. Brüning, "High Luminosity Large Hadron Collider," CERN-ATS-2012-236 (2012)
- 3) T. Nakamoto, et al: "Production and performance of the LHC interaction region quadrupoles at KEK," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 1321-1324
- 4) T. Nakamoto: "The High Luminosity LHC upgrade project," TEION KOGAKU **52** (2017) 141-148 (in Japanese)
中本建志:「LHC 高輝度化アップグレード計画」, 低温工学 **52** (2017) 141-148
- 5) T. Nakamoto, et al.: "Model magnet development of D1 beam separation dipole for the HL-LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4000505
- 6) 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
- 7) M. Sugano, et al: "Fabrication and test results of the first 2 m model magnet of beam separation dipole," IEEE Trans. Appl. Supercond. (2017) to be published.
- 8) A. Idesaki, et al: "Development of high radiation-resistant glass fiber reinforced plastics with cyanate-based resin for superconducting magnet systems," Fusion Eng. Des. **112** (2016) 418-424
- 9) K. Sasaki, et al.: "Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line—development, construction and operation of superconducting magnets—," TEION KOGAKU **45** (2010) 166-173 (in Japanese)
佐々木憲一ら:「J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石システム—超伝導磁石の開発・建設・運転—」, 低温工学 **45** (2010) 166-173
- 10) Q. Xu: "Design of a large single-aperture dipole magnet for HL-LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 4001305
- 11) M. Sugano: "Field quality and mechanical analysis of the beam separation dipole for HL-LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4001105
- 12) S. Enomoto: "Magnetic field measurement of 2-m-long model of beam separation dipole for the HL-LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. (2017) to be published.
- 13) S. Russenschuck: "Field Computation for Accelerator Magnets," Wiley-VCH, Weinheim (2010)
- 14) L. Rossi: "HL-LHC Project status: outcome C&SR and re-baseline," presented at the 6th HL-LHC Collaboration Meeting, Paris, Nov. 2016.

菅野 未知央 1974 年生。2003 年京都大学大学院工学研究科材料工学専攻博士後期課程修了。同年より、物質・材料研究機構強磁場研究センター特別研究員。2005 年より、京都大学大学院工学研究科電子工学専攻助手。2007 年より同助教。2011 年より高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センター助教、2014 年より同研究機関講師。超伝導複合材料の電磁機械特性の評価および加速器用超伝導磁石の開発に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会に所属。工学博士。