

LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発(6)

– 2 m モデル磁石開発から実機磁石製造へ –

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR LHC LUMINOSITY UPGRADE (6) – FROM DEVELOPMENT OF 2 M-LONG MODEL MAGNET TO CONSTRUCTION OF SERIES MAGNET –

菅野未知央^{#, A)}, 中本建志^{A)}, 鈴木研人^{A)}, 有本靖^{A)}, 飯田真久^{A)}, 池田博^{A)}, 池本由希子^{A)}, 植木竜一^{A)}, 大島洋克^{A)}, 大内徳人^{A)}, 岡田尚起^{A)}, 岡田竜太郎^{A)}, 荻津透^{A)}, 川又弘史^{A)}, 木村誠宏^{A)}, 佐々木憲一^{A)}, 高橋直人^{A)}, 田中賢一^{A)}, 寺島明男^{A)}, 東憲男^{A)}, A. Musso^{B)}, E. Todesco^{B)}

Michinaka Sugano^{#, A)}, Tatsushi Nakamoto^{A)}, Kento Suzuki^{A)}, Yasushi Arimoto^{A)}, Masahisa Iida^{A)}, Hiroshi Ikeda^{A)}, Yukiko Ikemoto^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Hirokatsu Ohata^{A)}, Norihito Ouchi^{A)}, Naoki Okada^{A)}, Ryutaro Okada^{A)}, Toru Ogitsu^{A)}, Hiroshi Kawamata^{A)}, Nobuhiro Kimura^{A)}, Naoto Takahashi^{A)}, Kenichi Tanaka^{A)}, Akio Terashima^{A)}, Norio Higashi^{A)}, Andrea Musso^{B)}, Ezio Todesco^{B)}

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

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

Abstract

High luminosity LHC upgrade (HL-LHC) is ongoing at CERN, which aims at 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 innovations to achieve 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 large-aperture beam separation dipole (D1 magnet). The requirements for D1 magnet are coil aperture as large as 150 mm and field integral of 35 Tm at the nominal current of 12 kA and operating temperature at 1.9 K. In order to validate design and fabrication processes, KEK has developed three 2 m-long model magnets of D1. This paper reports design update, fabrication and test results of the second model magnet (MBXFS2). The current status towards construction of series production magnet is also mentioned.

1. はじめに

欧州原子核研究機構 (CERN) では、統計量の飛躍的な向上を目指して大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider, LHC) の高輝度化アップグレード計画 (High-Luminosity LHC, LHC) が進行中である [1]。ピークルミノシティを現状の 5 倍の $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、積分ルミノシティを 10 倍の 3000 fb^{-1} に増加させること目標としており、その実現に向けて様々な技術革新が導入されようとしている。ルミノシティ増強のために、ビーム強度増加、 β^* の低減、ビーム光学の観点からの取り組みが並行して進められているが、衝突点磁石に関連した部分としては、最終収束四極磁石の大口径化が挙げられる。口径を現 LHC の 2 倍以上の 150 mm まで大きくしつつ、ビーム収束に必要な磁場勾配を確保するため、加速器ビームラインに導入される磁石としては初めて Nb_3Sn コイルが採用されている [2]。

この四極磁石の後段には、ビーム分離双極磁石 (D1 磁石) が配置される。この磁石は、衝突点に向かって同一軌道に揃った対向する 2 本の陽子ビームをアーク部に向かって別軌道に分ける役割を果たす。最終収束四極磁石と同様に、D1 磁石にも同様に 150 mm の大口径が必要である。この磁石には、LHC 加

速器の設計エネルギーである 7 TeV 運転 (重心系では 14 TeV) における積分磁場として 35 Tm が求められている。

KEK では 2011 年から D1 磁石の設計研究を開始した。さらに、2015 年からは KEK 所内で 2 m 長モデル磁石の製造、性能評価試験を繰り返し行ってきた。モデル磁石 1 号機、1b 改造機については [3, 4] で報告されている。本稿では、モデル磁石 2 号機における設計変更、製造および試験結果の概略について報告する。なお、試験結果の詳細については別報 [5] で報告する。2018 年に、7 m 長実証機、実機磁石製造を KEK が担当することが正式決定された。これを受けて実機製造開始に向けた準備を進めており、その内容についても合わせて報告する。

2. D1 磁石の概要

磁石の設計パラメーターを Table 1 にまとめた。積分磁場は LHC 加速器の 7 TeV 運転で 35 Tm、さらに高エネルギーの 7.5 TeV 運転 (いわゆる ultimate 条件) で 37.8 Tm が必要となる。これは、主双極磁場で 5.6~6.0 T、ピーク磁場では 6.6~7.1 T に相当する。定格電流は 12.05 kA、受け入れ条件電流は 13.28 kA である。He II 冷却で運転温度は 1.9 K である。要求磁場精度は定格電流において、各多極磁場成分について規定されているが、双極磁石で一般的に最も大

[#]michinaka.sugano@kek.jp

きな値を持つ 6 極成分で主磁場に対して 3×10^{-4} 以下 (10^{-4} を 1 unit と規格化する表現では 3 unit 以下) である。

コイル形状は単層の $\cos\theta$ 型で、各象限につき 4 つのコイルブロックで構成されている。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 ターンで、合計 44 ターンである。

技術的課題は以下の 3 点である。

- ・大口径に伴って、組み立て、冷却におけるコイル周方向の寸法変化が数ミリにも及ぶ。変形量の正確な予測が後で述べるコイルの予備応力管理や要求磁場精度の実現に必要。

- ・磁石の運転期間中に 25 MGy という高い放射線量を経験するため、構成材料には耐放射線性が必要。除熱を考慮した磁石設計も重要。

- ・コイルの大口径化にも関わらず、輸送、設置スペースの制約からクライオスタットの外径は現状 LHC 磁石から大きくできない。結果として、コイルと鉄ヨークの距離が近くなることで鉄の飽和の影響が顕著に現れる。鉄の飽和の影響を低減したヨーク断面設計が必要。

D1 磁石の構造を Fig. 1 に示す。コイルは、Nb-Ti/Cu ラザフォードケーブルと耐放射線性 GFRP 製のウェッジから構成されている。コイルに対してクエンチ保護ヒーター、対地絶縁シート巻き付け、ブラッシュを被せた後、ステンレス製カラー、純鉄製鉄ヨークを組み付ける。最後にヘリウムと真空の境界となるステンレス製のシェルを縦継溶接する。

この磁石ではカラーはコイルの位置決め役を果たすスペーサーであり、ヨークが剛性を担っている。

カラーとヨークは薄板の積層体であり、その充填率をそれぞれ 96 %、98 % に調整することで He II の流路を確保している。

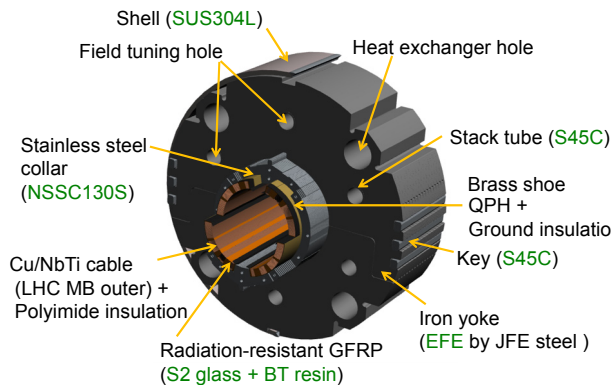


Figure 1: Exploded view of D1 magnet.

Table 1: Design Parameters of D1 Magnet

	Series production magnet	2 m model magnet
Coil aperture	150 mm	
Field integral	Nom. 35 Tm, Ult. 37.8 Tm	9.5 Tm
Main field	Nom. 5.60 T, Ult. 6.04 T	
Peak field	Nom. 6.58 T, Ult. 7.14 T	
Operating current	Nom. 12.05 kA, Ult. 13.28 kA	
Operating temperature	1.9 K	
Field quality	$b_3 < 3$ unit	
Load line ratio	Nom. 76.5%, Ult. 83.1%	
Inductance	4.0 mH/m	
Stored energy	340 kJ/m	
Magnetic length	6.28 m	1.67 m
Coil mech. length	6.58 m	2.00 m
Magnet mech. length	6.73 m	2.15 m
Heat load	135 W (magnet total) 2 mW/cm ³ (coil peak)	
Radiation dose	> 25 MGy	

Nom. : Nominal operating condition

Ult. : Ultimate condition

3. 2 m モデル磁石開発

3.1 モデル磁石 1 号機、1b 号機の試験結果

本磁石は $\cos\theta$ 型コイルで構成されており、励磁によってコイルに対してポールから水平面に向かって電磁力が発生する。これに抗するため、コイルの円周方向寸法を最終寸法に対して大きく製作し、組み立て段階で最終寸法まで押し込むことで圧縮予備応力を与える設計になっている。

モデル磁石 1 号機 (MBXFS1) ではこの圧縮予備応力が不足していたことにより、磁石のトレーニング性能が不十分であった。この磁石は、試験後に一旦分解し、コイル水平面に 0.8 mm 厚さのシムを挿入することで予備応力を 65 MPa から 100 MPa まで増加させた。この 1b 改造機 (MBXFS1b) において、定格電流および受け入れ条件電流が達成され、トレーニング性能の要求仕様を満足させることができた。

3.2 モデル磁石 2 号機における設計変更

D1 磁石はヨークを長手方向に貫通する $\phi 61$ mm の穴に熱交換器が挿入される。この熱交換器穴条件に

ついて、CERN 側からの要求により変更が必要になった。Figure 2 に 1 号機と 2 号機 (MBXFS2) の磁石断面を示す。1 号機では 90°、180°に設けられた穴が、2 号機では 45°の位置に合計 4 個に変更されている。このような設計変更を受けて、磁場設計のアップデートを行った。

磁場設計は ROXIE を用いて行った。ヨークは電磁鋼板の積層に対して、長手にスタックチューブを通し、両端からボルトで締めこむことで構造体を形成している。一方で、このスタックチューブ穴は磁場調整の役割も担っている。モデル磁石 2 号機のヨーク断面設計においては、鉄の飽和による多極磁場成分の電流に対する変動を小さくすることを目指して、スタックチューブ穴条件の最適化を行った。その結果、25°と 90°に $\phi 34$ mm の穴を配置することとした。

ヨーク断面決定後に、コイルブロック配置の再調整を行った。定格電流で多極成分を 1 unit 以下に抑えることを目標として、ケーブル配置の最適化を行った。

1 号機、1b 号機の磁石試験で実証されたように、トレーニング性能が受け入れ条件を達成するためには、コイル円周方向の圧縮予備応力を適切に負荷する必要がある。2 号機では、受け入れ条件電流でコイルに作用する電磁力下においてもコイルの予備応力が残ることを条件として、予備応力値を 115 MPa と設定した。これを実現するため、コイルブロック間に挿入される GFRP 製のウェッジの円弧長を最終断面寸法に対して 0.8 mm 大きい寸法とした。

過去のモデル磁石では、磁石試験後にコイル端部のケーブルがボアの内側に落ち込む変形が観察された。これは、電磁力に対する機械的支達が不十分であることを示唆している。1 号機では最大 3.4 mm の変位が観察され、1b 号機では対策として端部の予備応力を増加させる対策を施したものの 2.5 mm の変位が残った。実機磁石では、コイルボア内にコールドボアチューブを挿入する必要があり、その外径面とコイル内径面の間に He II の流路として最低 1 mm のギャップを確保する必要がある。以上のことから、ケーブル変形は最大 0.7 mm 以下に抑える必要があり、2 号機でさらなる対策が必要とされた。

過去のモデル磁石では、ケーブル間の自己融着ポリイミド接着強度が電磁力に対して不十分であるため、ターン間が独立に変位する振る舞いが観察された。これが変形を容易にしている要因と考え、2 号機ではコイル端部のみに樹脂を塗布しながら巻線する「塗り巻き」を適用した。耐放射線性や巻線作業性を考慮し、エポキシ混合シアネートエステルにシリカのフィラーを添加した樹脂を選択した。

同じく、コイル端部での機械的支達強化を目的として、ウェッジと同様にエンドスペーサーについてもオーバーサイズを行なった。また、エンドプレートからボルトを押し込んで負荷するコイル長手方向の予備荷重についても、ボルトの締め付けトルクを 1.7 倍に増加させた。

3.3 モデル磁石 2 号機の磁石の製作

耐放射線性樹脂を用いた塗り巻きでは、コイル表

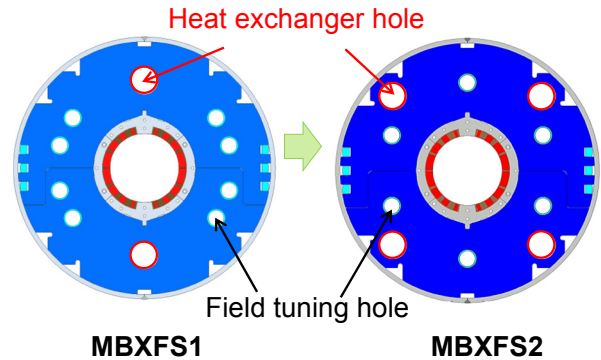


Figure 2: Magnet cross-section of MBXFS1 and MBXFS2.

面の清浄性とキュアリング後のフォームブロックからの離型を用意にする目的で樹脂塗布量を最小限に抑えた。

キュアリングはコイルをフォームブロックに押し込み、円周方向、長手方向に圧縮した状態で、ヒーター加温した。加温条件は 120 °C、4 時間、150 °C、4 時間、190 °C、30 分である。最初の 2 ステップは樹脂硬化、最後のステップは直線部のケーブル表面のポリイミド絶縁の自己融着を目的としている。キュアリング後の目視観察により、塗り巻き工程に問題ないことが確認された。

磁石組み立ては、1 号機とほぼ同様の工程で行なった[3]。各組み立て工程および 1.9 K 冷却後のコイル円周方向予備応力を Fig. 3 に示す。予備応力は、

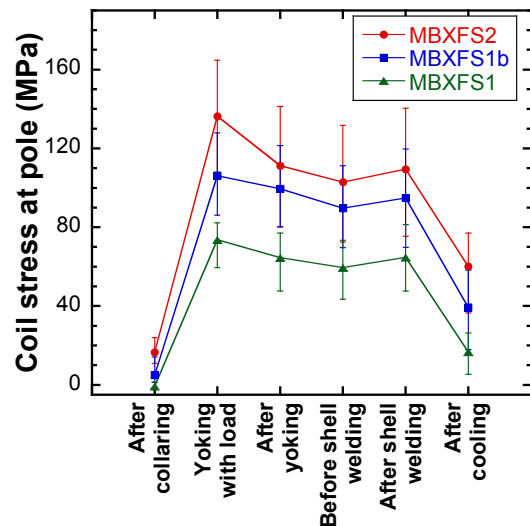
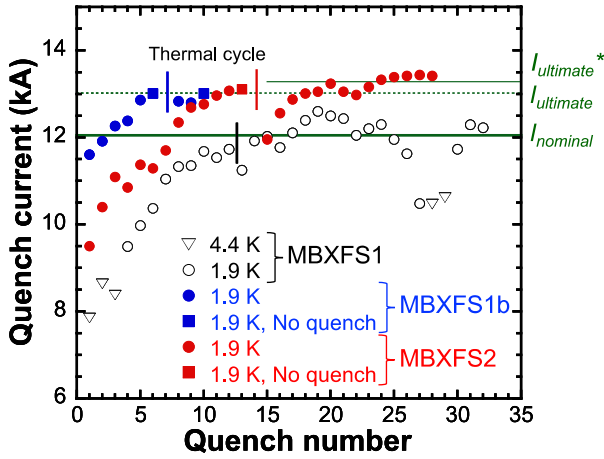


Figure 3: Azimuthal coil pre-stress measured during magnet assembly and after cooling.

カラーに貼り付けたひずみゲージにより測定した。コイルはヨーキング工程でほぼ最終寸法まで押し込まれるため、このタイミングでの予備応力で設計値を設定している。2 号機については、設計値 115 MPa に対して、測定値は 111 MPa であり、ほぼ設計通り

の予備能力が負荷されていることが確認された



3.4 モデル磁石 2 号機の磁石試験結果

Figure 4 にトレーニングプロットを示す。今回試験を行った 2 号機では、7 回のクエンチで定格電流を 11 回のクエンチで受け入れ電流を達成した。受け入れ条件は当初定格の 108 % 電流とされていたが、その後、積分磁場で定格の 108 % と再定義された。その結果、最終的な受け入れ条件は電流換算で 13.28 kA となった。昇温、再冷却後の磁石試験第 2 サイクルで上記受け入れ条件も達成することができた。これにより、トレーニング性能は要求仕様を満たすことが確認された。

磁石試験後にコイル端部変形を確認したところ、2 号機では最大変位が 1 mm 以下まで低減されていた。モデル磁石 3 号機では、さらにコイルオーバーサイズを増やしてコイル変形をゼロに近づける対策を講じている。

磁石ボア内に挿入したボアチューブの室温空間に回転コイルを挿入し、電流、磁石長手位置を変えながら磁場性能評価を行った。双極磁石では、磁石断面の対称性から Normal allowed multipole (6 極、10 極、14 極、・・・、 b_3, b_5, b_7, \dots) が必ず発生する。このうちの b_3 成分について、磁石直線部における測定結果と OPERA 3D による計算結果を比較したところ +17 unit と大きな差があることが確認された。この差は鉄の飽和の影響がない低電流領域 (3 kA) で比較した値であり、磁石断面の幾何形状に起因するものである。一方で、断面の非対称性により生じる Unallowed multipole、Skew multipole はほぼ 1 unit 以下であり、対称性は維持されていることも確認された。磁場測定結果の詳細については、[5] でより詳細に報告する、

3.5 モデル磁石 3 号機

磁石 2 号機とほぼ同じ設計で、再現性確認としたモデル磁石 3 号機 (MBXFS3) の製。ヨーキング後に、常温磁場測定を行った 2 号機と比較して数 unit の範囲で大きな b_3 された。現在、原因解明を進めると同時に、幾で b_3 を低減する再設計を進めている。

磁石製造に向けた取り込み

この HL-LHC 計画への正式参加

7 月 6 日に、文科省において、CERN のティ所長、KEK の山内機構長同席のもと、計画への KEK の正式参加に合意する協定書が執り行われた。これにより、KEK が DI 機製造に協力することが正式に決定された。磁石製造に関する入札が行われ、2019 年 5 製作所が製造メーカーに決定した。

製造への要求

磁石台数は、実機と同じ仕様のプロトタイプ (実証機) 1 台と実機磁石 6 台の合計 7 台である。磁石の要求仕様は Acceptance criteria で規定されている。この中に、積分磁場 35 Tm (7 TeV 運転)、37.8 Tm (7.5 TeV 運転) や、それらに相当する磁石電流値、トレーニング性能、磁場性能、磁場角度や磁場角度や磁場中心軸位置を決めるアライメント性能などが記述されている。

磁石の製造は、シェル溶接、シェルキャップ溶接までを完了し、磁石性能評価試験が可能な「磁石本体」と、熱交換器やコイルボアチューブを挿入後、端部溶接を行い圧力容器として完結している「コールドマス」の二つの状態に分けられる。それぞれの状態での長手寸法は 6.7 m、7.4 m である。磁石性能試験は KEK において実施される。

CERN で使用される圧力容器の設計は、ヨーロッパ向け圧力容器・機器に適用される圧力機器指令 (Pressure Equipment Directive, PED) に基づく欧州規格 (EN-13445:2014) に従う必要がある。ただし、相当規格である ASME BPVC VIII Div. 2 の全面的または部分的適用が認められており、KEK では ASME に基づいた圧力容器設計を進めている。

本磁石製造においては、品質管理が厳しく求められている。これに関連して、品質保証計画 (Quality Plan, QP) の作成と CERN による承認、認証が必要である。QP には、製作計画、製作検査成績書、圧力容器製造に関わる認証用図書などが含まれる。また、使用原材料や検査・試験装置のトレーサビリティが強く求められている。例えば、鉄ヨークに使用される電磁鋼板ではチャージごとのミルシート提出が必要であることはもちろんのこと、圧延加工されたどの板材から打ち抜かれたヨーク板であるかをサブスタック単位で ID 管理することが想定されている。

また、部品、治具の図面、調達、製造、検査試験

などの製造記録や安全に関する書類を CERN サーバーのフォルダ (Manufacture and Test Folder, MTF) に随時アップロードすることも求められている。

実証機磁石製造の流れを Fig. 5 に示す。磁石本体の製造完了後に、一旦 KEK に納品される。このタイミングで、Single Stretched Wire (SSW) 法で磁場角度の測定、回転コイルによる常温磁場測定、磁石を縦吊りして 1.9 K に冷却した状態でトレーニング試験、磁場測定、ヒーター試験などを実施する。その後、再び磁石を製造メーカーに輸送し、圧力容器の状態まで完成させ、耐圧、気密試験を行った後、再度 KEK に納品される。KEK で横型常温磁場測定を行い、CERN に向けて出荷される。

この過程で、製造メーカーには各工程の開始前に製造開始が可能であることを示す技術書類を KEK および CERN に提出し、準備状況について審査を受ける Production Readiness Review (PRR) が求められている。特に、圧力容器製造に関わる工程では、CERN の安全部門の審査を合格して初めて製造開始の承認を得ることができる。

また、製造工程の重要なポイント (Hold Point, HP) が設定されており、CERN の適合性確認を受ける。この承認後に、次の工程を開始することができる。

このように、本磁石製造においては非常に厳しい品質管理が求められている。

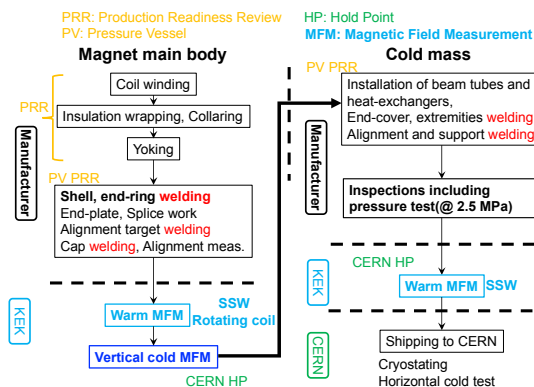


Figure 5: Production flow of D1 magnet main body and cold mass.

4.3 実機製造に向けた KEK での準備状況

前述の通り、モデル磁石では 6 極成分の大きな設計からのズレが確認された。これを解決するためのコイルの新断面設計を進めている。この断面設計が完了し次第、ウェッジやエンドスペーサーといったコイル部品の製作を開始することになる。

実証機の納期を考えると、7 m 長コイル巻線機およびマンドレルの調達を製造メーカー決定に先行して行う必要があった。KEK では Fig. 6 に示すような回転テーブル式の巻線機を整備し、基本動作確認までを完了している。製造工程のうち、コイル巻線まではこの巻線機を用いて KEK 敷地内で実施される予定である。

主要な原材料は KEK で調達し、製造メーカーに支

給することとした。クエンチ保護ヒーター用の Cu/ステンレス/ポリイミド積層シート、耐放射線性 GFRP パイプ、板材、鉄ヨーク用電磁鋼板、カラー用ステンレス板、エンドリング用ステンレス鍛造板などがこれに相当する。

7 m 長磁石に適用可能な磁場測定装置の整備も並行して進めている。双極磁場の磁場角度は SSW 法で評価する予定であるが、過去に SuperKEKB の衝突点用電磁石 (QCS) のために開発されたシステムを利用することになっている。一方、回転コイルを用いた横型常温磁場測定装置、低温縦磁場測定装置についても現有設備を有効利用しつつ、整備を進めている。



Figure 6: Winding machine for 7 m-long coil.

5. まとめ

KEK における HL-LHC 計画のための D1 磁石開発について報告した。KEK 所内で進めてきた 2 m モデル磁石 2 号機では、トレーニング特性が受け入れ条件を満足することが確認された。一方で、磁場性能については、測定した 6 極成分と計算結果に大きな差異が確認されており、実証機に向けてこれを改善するコイル断面設計を進めている。

2018 年 7 月に、D1 磁石実機製造に KEK が協力することが正式に決定した。実証機は 2020 年 11 月までに CERN に納品することが求められている。その後、各国からの衝突点磁石システムの実証機を CERN 地上試験設備で接続し、同時に励磁する磁石試験 (String 試験) が計画されている。最終的には、2024 年 6 月に全 6 台の実機磁石を納品するスケジュールで製造準備が進められている。

参考文献

- [1] R. Lossi and O Brüning, “High Luminosity Large Hadron Collider”, CERN-ATS-2012-236 2012.
- [2] P. Ferracin *et al.*, “Development of MQXF: The Nb3Sn Low-b Quadrupole for the HiLumi LHC”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, 2016, 4000207.
- [3] M. Sugano *et al.*, “Fabrication and Test Results of the First 2 m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, Vol. 27, 2017, 4002409.
- [4] M. Sugano *et al.*, “Training Performance with Increased Coil Prestress of the 2 m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, Vol. 28, 2018, 4000805.
- [5] K. Suzuki *et al.*, “LHC 高輝度化アップグレード用超伝導磁石の開発 (7) —2 m モデル磁石性能評価試験結果—”, Presented at the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, 2019.