

HL-LHC 計画と KEK における 超伝導磁石開発

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、1970 年代から超伝導磁石開発をスタートさせ、12GeV PS 東カウンターホールに建設された $\pi 1$ 超伝導ビームラインを皮切りに、TRISTAN や KEKB 加速器のビーム衝突点用超伝導四極磁石などが建設され、実際の加速器実験に利用されてきた。またビーム衝突点に設置される大型の検出器用超伝導ソレノイド磁石も建設された。これらの超伝導磁石開発・建設を通じて、多くの研究者や技術者が育つことになった。

こうした背景のもと、1990 年代後半には、欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器建設へ協力することが決定し、ルミノシティ性能達成の鍵を握るビーム衝突点用超伝導四極磁石 (MQXA) の建造を担うことになった。非常に高い性能目標を要求された MQXA 磁石には、それまでに KEK で培ってきた技術だけでなく、新たな技術開発の成果が惜しみなく投入された。プロジェクトは無事完了し、MQXA 磁石は現在も LHC 実験を支える重要な磁石として運用されている。

MQXA 磁石開発が一段落した頃、J-PARC 加速器における T2K ニュートリノビームラインの建設が決定し、一次陽子ビームラインに超伝導磁石システムが導入されることになった。非常に短期間で設計、開発を完了させる必要があり、また製造コストにも厳しい要求があった。磁石の大口径化や左右非対称コイルの採用など、多くの新規性を含んでいたものの、MQXA 磁石開発の経験をできるだけ活かし、また製造・試験設備を活用することで、無事磁石開発に成功し、建設期間の短縮化を達成した。

2010 年頃になると、欧州を中心として LHC 加速器の高性能化の機運が高まり、LHC 高輝度化アップグレード High Luminosity LHC (HL-LHC) 計画が正式に立ち上がった。ビーム衝突点付近の超伝導磁石システムは最重要であり、全て入れ替

えて高性能化を図ることになった。必要な磁石は多種になることから、CERN を中心とした世界中の研究所が分担して開発を進めてきた。KEK は上述の J-PARC ニュートリノビームライン用大口径超伝導磁石の経験もあり、HL-LHC ビーム分離用大口径双極超伝導磁石 MBXF の建造を担当することになった。そこでは、新たな性能目標として、磁石の大口径化や耐放射線性能の向上などが求められた。

これらの超伝導磁石 (LHC ビーム衝突用超伝導四極磁石 MQXA、J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石 SCFM、HL-LHC ビーム分離用大口径超伝導双極磁石 MBXF) は解決すべき技術的課題や達成すべき性能がそれぞれ異なる一方で、同じ系譜に連なる超伝導磁石ともいえる。

この講義では、OHO22 セミナーの前半で講義・解説された超伝導線材や超伝導磁石の基礎を前提としつつ、実際の加速器用超伝導磁石をどのように設計開発してきたのか、ケーススタディを試みる。開発中に直面した問題点や、それらを如何に解決したのか、解説したい。

なお以下の章では、磁石の磁場特性を次の式のように多極成分で表現する。

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

ここで B_{ref} は主磁場 (双極磁石では B_1 、四極磁石では B_2)、 R_{ref} は参照半径を示す。 b_n 、 a_n はノーマル、スキューの多極磁場係数で単位は unit となる。

2. LHC MQXA 磁石

2.1. CERN LHC 加速器と最終ビーム収束用四極磁石^[1, 2]

CERN LHC 加速器は、陽子を世界最高エネルギー 7+7 TeV で衝突させ、ピークルミノシティが $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ にまで到達する世界最高水準の加速器である (いずれも設計値)。LHC は旧 LEP 加速器用地下トンネル (深さ約 100 m、周長 27 km) を再利用して建設されているが、陽子を 7 TeV にまで加速するためには、8 T を越える超伝導磁石が必要不可欠となる。超伝導磁石を用い

た衝突型加速器としては、これまでに Tevatron (Fermilab)、HERA (DESY)、RHIC (BNL)が建設されたが、いずれも NbTi 超伝導線を 4.5K 程度に冷却して約 5 T の磁場を発生するものだった (SSC では 6.6 T だったが、計画自体がキャンセルされた)。検討の結果、超流動ヘリウム (He II) により 1.9 K まで冷却する方法を採用することで、発生磁場を 8 T 以上にまで飛躍的に増加させることになった。

日本政府は 1995 年に LHC 計画に参加協力することを決定し、KEK は 4 つのビーム衝突点の直前に設置されるビーム最終収束四極磁石のうち、16 台 (全数 32 台の半分) の開発を担当することになった。Fig. 2-1 に LHC 加速器全体とビーム衝突点の左右に設置される最終ビーム収束用超伝導磁石システムの概略図を示す。Inner Triplet (衝突点寄りから順に Q1, Q2, Q3) を構成する最終ビーム収束四極磁石は、衝突点でビームを強力に絞り込む役割を持ち、ルミノシティに直接的に寄与するため、LHC 加速器の中でも特に重要な超伝導磁石といえる。このうち、Q1 と Q3 (MQXA) を KEK が担当し、Q2 (MQXB、実際には磁石 2 台で構成される) は Fermilab が担当した。また各種補正用超伝導磁石は CERN から供給された。全ての磁石の断熱真空容器 (クライオスタット) は Fermilab が開発し、磁石の挿入組立も行った。

2.2. 1 m 長モデル磁石開発

2.2.1. 概念設計

磁石開発は 1996 年からスタートし、電磁・機械構造設計、モデル磁石の試作、性能評価試験は全て KEK の所内開発で進められた。1m 長モデル磁石は、実機磁石の直線部のみを短尺化したものである。モデル磁石開発の成果を基に、メーカー (東芝) において 1999~2000 年にフルスケールプロトタイプ 2 台の製作、2001 年からは実機生産がスタートした。製造された磁石は、順次 KEK において冷却、励磁試験を行った。2004 年までにスペア機を含む全 20 台の生産が完了した。磁石は試験完了後に Fermilab に輸送され、クライオ

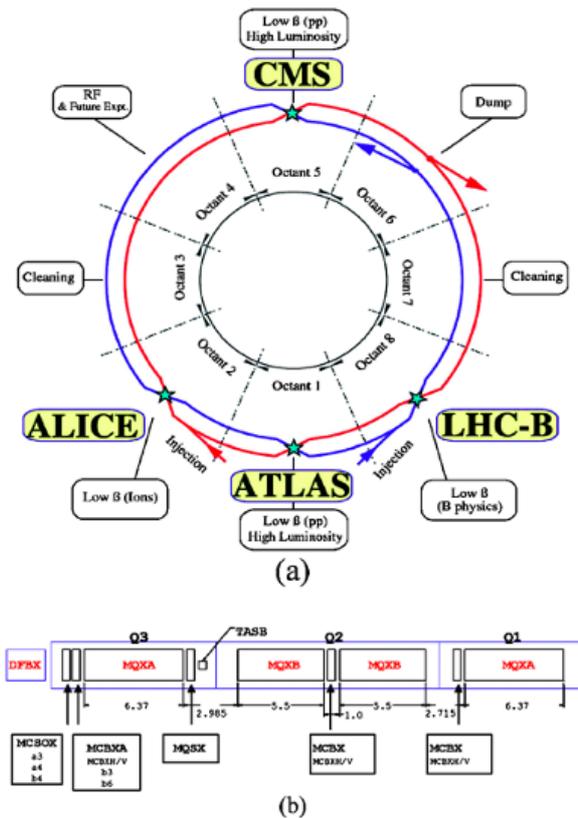


Fig. 2-1 (a) LHC 加速器全体と (b) 4 カ所のビーム衝突点の左右に設置される最終ビーム収束用超伝導磁石システムの概略図

スタットに組み込まれた後、最終的に CERN に輸送され、LHC 加速器に組み入れられた。

当初 CERN から示された主な仕様は、以下の通りだった。

- He II 冷却下 1.9 K において、コイル内径 70 mm で定格 215 T/m の四極磁場勾配を発生すること。
- 高調波成分の誤差磁場を、参照半径 17 mm で 10^{-4} 以下に抑えること。
- 超伝導コイルは、ビーム衝突によるデブリに起因する 5 W/m の発熱にも耐えられること。

コイルのピーク磁場は 8.6 T に達することになり、LHC の超伝導磁石の中でも最も厳しい仕様だった。KEK 内部では、それまでに SSC や LHC との協力で進めてきた超伝導双極磁石モデル開発や、TRISTAN や KEKB におけるビーム最終収束超伝導四極磁石実機開発で得られた経験、ノウハウをもとに概念設計を行った。Fig. 2-2 に MQXA 磁石の断面模式図、また Table 2-1 に主要

設計パラメータを示す。この MQXA 磁石の設計上の特徴を以下にまとめる。

- 1) 4層コイル (Fig. 2-3) にして電流マージンを大きくする一方で、機械構造的にはインナーコイルとアウターコイルの2層構造に単純化した。
- 2) コイル内に2種類の NbTi 超伝導ケーブル (インナーケーブル、アウターケーブル) を用い、電流密度を変えることで、ロードライン比をほぼ等しくした (Fig. 2-4)。またクエンチ時のコイル保護の観点から、それぞれの銅比を決定した。
- 3) 鉄ヨークからの磁場への寄与をできるだけ大きくするために超伝導コイルを拘束するカラーの径方向厚さをできるだけ薄くした。
- 4) このため、電磁力の支持構造は、鉄ヨークそのものをキー留めすることで達成する。
- 5) カラーには、透磁率が真空に近いオーステナイト系高マンガン鋼を採用した。一方、鉄ヨークには、冷間加工により強度を改善した電磁鋼板を用いた。

2.2.2. NbTi 超伝導ケーブル

NbTi 超伝導ケーブルの主要パラメータを Table 2-2 に示す。また、ケーブルの断面写真を Fig. 2-5 に示す。パラメータは若干異なったものの、LHC 主偏向磁石向け超伝導線材の大量生産のタイミングと重なったため、MQXA 磁石向けにも高性能で安定した超伝導ケーブルを調達することができた。

なお、2.2.1 の 1) と 2) について補足すると、高い磁場を経験する場所 (Fig. 2-3 の 1層コイル 4+8 ターンと 2層コイルのポール寄り 4 ターン) には、NbTi をより多く含む『インナーケーブル』を配置している。超伝導部の電流密度は下がるので、Fig. 2-4 に示すように、磁場が高くてロードライン比は下げることができる。ただし、素線内の安定化材 (銅) の量はどちらも同程度必要となることから、インナーケーブルの素線径は大きくなっていることがわかる (Fig. 2-5)。

超伝導ケーブルに求められる性能は、第一義的にはもちろん超伝導性能 (臨界電流密度、磁化特性の向上、磁氣的不安定性の改善など) だが、一

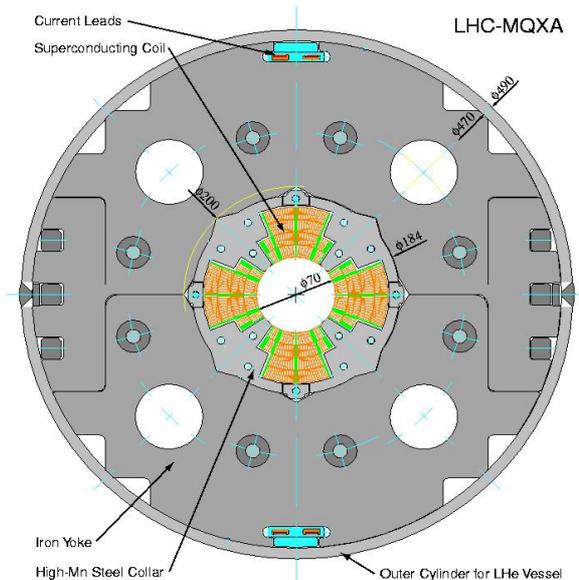


Fig. 2-2 MQXA 磁石の断面模式図

Table 2-1 MQXA 磁石の主要設計パラメータ

Field gradient (T/m)	215
Coil inner radius (mm)	35
Yoke outer radius (mm)	235
Magnetic length (m)	6.37
Peak field in coil (T)	8.63
Operation current (A)	7149
Superconductor load line ratio	0.80
Inductance (mH)	87.9
Stored energy (MJ)	2.24
Magnetic force/octant (MN/m)	
radial	1.19
azimuthal	1.37

方でコイル構造体の一部となるため、ケーブルの寸法制御も大変重要となる。コイル巻線は 10~20 ターンを繰り返すので、ケーブル厚さの系統誤差は、そのまま組立時のコイル予備圧縮応力や磁場精度 (後述) に影響してくる。このため、約 1.4 mm 程度のケーブル厚さに対して、仕様で求められた寸法精度は $\pm 6 \mu\text{m}$ と非常に厳しいものだった。

ケーブル絶縁は、内層が幅 6 mm、厚さ 25 μm Upilex-RN の 1/2 オーバーラップ、外層は幅 6 mm、厚さ 50 μm Upilex-RN の 2 mm ギャップ巻きを採用した。外層 Upilex の表面には B-stage エポキシ (厚さ 10 μm) が塗布されている。実は LHC で採用されている超流動ヘリウム冷却は NbTi の臨界電流を向上させるためだけでなく、

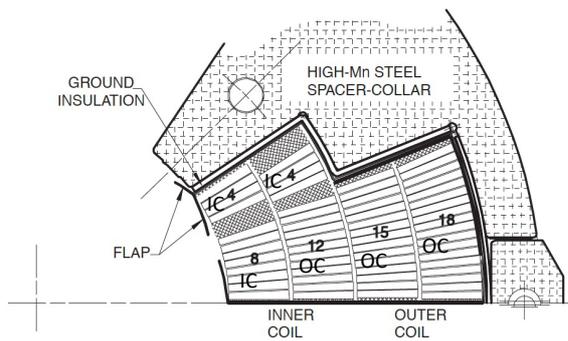


Fig. 2-3 MQXA コイルの断面(1/8)。各コイルブロックの数はターン数、IC 及び OC はそれぞれインナーケーブル及びアウターケーブルを示す。

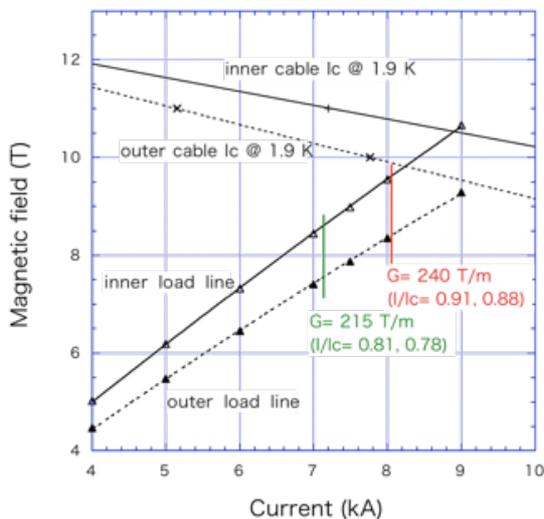


Fig. 2-4 インナーケーブルとアウターケーブルでのロードライン比

その優れた熱伝達特性により狭いギャップを透過してデブリによるコイル発熱を除熱するために重要な役割を担う。B-stage エポキシ量 (厚さ) は、130°Cで硬化 (キュア) した際に十分なコイル接着強度が得られるとともに、ギャップが閉塞されないように注意深く最適化された。

2.2.3. 電磁設計

電磁設計では、まず磁場分布を決定する最適な超伝導コイルと周囲の構造部品の二次元断面を求めることになる。まず CERN で開発された電磁設計プログラム ROXIE プログラム³⁾を用いてコイル形状を最適化し、次に別の OPERA により

Table 2-2 ケーブルと素線の主要パラメータ

Cable	Inner	Outer
Width (mm)	11.00	11.00
Thickness (mm)		
Inside edge	1.264	1.210
Middle	1.487	1.340
Outer edge	1.697	1.469
Keystone angle (deg.)	2.324	1.348
Cable pitch (mm)	90	90
Number of strands	27	30
Ic at 1.9 K (A)		
9 T	>13250	>9000
10 T	>10000	>6000
11 T	>6000	>4000
Strand		
Diameter (mm)	0.815	0.735
Cu to SC ratio	1.2	1.9
NbTi filament dia. (μm)	< 10	< 10
RRR of copper	> 110	> 110
Twist pitch (mm)	15	15

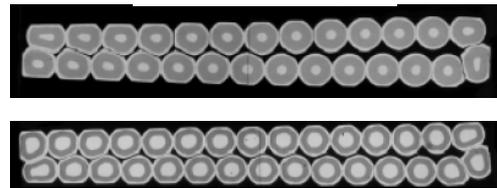


Fig. 2-5 インナーケーブルとアウターケーブルの断面写真

計算結果を比較、検証した。Fig. 2-3 に示されるように、二次元近似が可能な直線部では4層コイルは全部で6個のコイルブロックから構成されているため、これらをミクロン単位で位置調整しながら磁場計算を繰り返すことで誤差磁場が最小になるコイル配置を求めることになる。このとき、周囲の構造部品 (ステンレスカラーや鉄ヨーク) の寸法、形状にも注意を払い、できるだけ四極磁石対称性を保つような機械設計を行うことになる。(Fig. 2-2 を見ると 45° 対称性が保たれている様子が分かる)。

直線部の次は、コイル端部の設計を行う。Fig. 2-6 に MQXA コイルのコイル端部モデルを示す。容易に想像できるようにコイル端部ではもはやコイルを二次元近似できないため、三次元計算を行うことになる。

コイル端部でケーブルをターンするには、構造的な条件としてケーブル最内周と最外周で『等周条件』を満足する必要があるため、折り返し頂点ではケーブルの最内周側がコイル端部方向に突き出す形になる。一方でケーブル断面のキーストーン角の影響でターン数が多く積み重なると段々とケーブル最外周側がコイル端部に突き出す形になってしまう。こうなるとコイル端部の機械構造支持が非常に不安定になってしまう。この問題を解決するため、コイルブロックを端部で複数に分割（サブブロック）して、新たにエンドスペーサーを挿入することで、ケーブル傾斜角を初期化する方法が取られる。

端部でのコイルブロックの分割は、電磁設計の観点からも有益で、各多極成分の積分磁場を最小化することが可能となる。具体的には、エンドスペーサーの長手方向の挿入位置や、分割したブロックのターン数を変数として調整することになる。Fig. 2-7にMQXAコイルのエンドスペーサーの写真を示す。各層コイルが端部で複数に分割されている様子がわかる。

2.2.4. 磁石の機械構造と寸法制御

良く知られているように、超伝導磁石では、超伝導線に何らかの擾乱が生じると、局所的な温度上昇→常伝導へ遷移し電気抵抗が発生→電流によりオーム発熱→周囲からの冷却が負けてさらに常伝導領域が発展・暴走、といった流れでクエンチが起きてしまう。これを防ぐためには、超伝導線自体の設計も当然重要だが、磁石構造的にはメートル当たり100トン以上となる強大な電磁力下においても、超伝導コイルが動かない様にしっかりと支持する構造設計や高強度の材料選択が重要となる。

加速器用超伝導磁石では、鉄の透磁率が飽和しきってしまう2T以上に励磁されるため、超伝導コイルの形状（つまり電流分布）そのもので磁場分布が決定される。つまり、求められる磁場（MQXA磁石では四極磁場）を発生する理想的な電流分布に近付けるように超伝導コイルを設計、製作、制御することになる。MQXA磁石の場合、

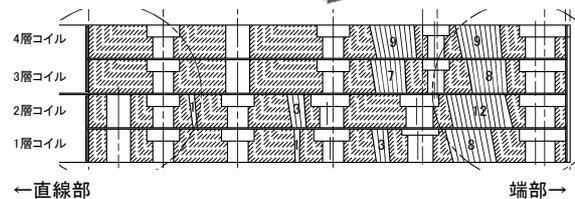
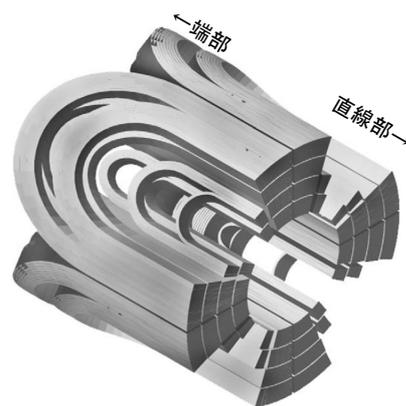


Fig. 2-6 ROXIE で計算した MQXA コイルのコイル端部モデル (上) とコイル端部でのサブブロック化の様子を示す折り返し部の断面図 (下)

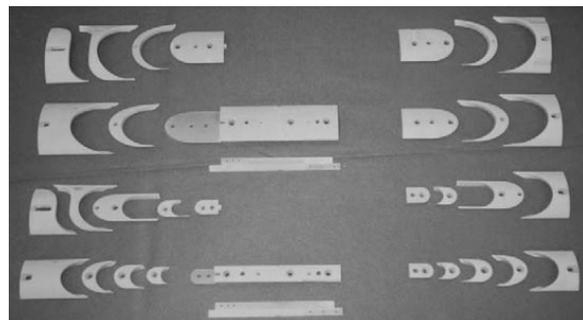


Fig. 2-7 4層コイル1極分のエンドスペーサー

誤差磁場を 10^{-4} 以下に抑えるということは、超伝導コイルやそのサポート部品（カラー）などを $50 \mu\text{m}$ 以下の寸法精度で制御しなければいけないことを意味している。

常温での磁石組み立て段階で、超伝導コイルには適切な予備圧縮応力（具体的には、コイル周方向で70 MPa程度）が掛けられる。もし磁石を冷却、通電した際に、予備圧縮応力が不足していると、超伝導コイルは自らの電磁力で変位、変形してしまい、支持不安定になってクエンチ発生の原因となる。また設計したコイルの形状がずれることで電流分布が歪み、誤差磁場が誘発されることになる。一方で、過剰な予備圧縮応力は、電気絶

縁や超伝導線そのものを傷めることにつながる。以上の理由から、予備圧縮応力制御（＝コイルサイズや部品寸法の制御）は、大変重要なプロセスといえる。MQXA 磁石では、コイルにカラーを装着する（カラーリング）際にはほとんど予備圧縮応力は与えられず、ほとんどは鉄ヨークによって与えられる。製作再現性や強度の観点からボルト留めなどは使用されず、鉄ヨークそのものをバネに見立て、スロットにキーを挿入することで、コイルに予備圧縮応力を与える構造になっている。最外周は、ヘリウム容器を兼ねる半割れのステンレス曲げ板 2 枚により長手溶接され、さらに径方向に圧縮、拘束して構造強度を高める。もちろん 1.9 K まで冷却するため、各部品の熱収縮による影響も十分考慮される。

機械構造計算は有限要素法プログラム (ANSYS) を用いて実施した。例えば、鉄ヨーク Median Plane 左右にあるキー挿入スロットや、油圧プレス用段付き肩の形状や数が決定された。カラーや鉄ヨークには、鋼板(カラー:厚さ 2 mm、ヨーク:厚さ 6 mm) を高精密打ち抜き (ファインブランキング) し、積層パックする方法を採用した。この方式により、部品寸法精度を確保しながらコスト削減や量産スピード向上を達成できた。

2.2.5. 製造工程

Figs. 2-8~10 に、KEK で進められた 1 m モデル磁石開発当時のスナップ写真のいくつかを示しながら、MQXA 磁石の製作工程を以下に説明する。

- (1) ターンテーブルの鞍型マンドレルに超伝導ケーブルを巻き線 (1-2 層インナー及び 3-4 層アウターコイル巻き線)。
- (2) ケーブル絶縁表面にあらかじめ塗布したエポキシにより、巻き線コイルを成形ブロック中で 130°C、2 時間で反応させ、成形 (キュアリング)。
- (3) インナー及びアウターコイルを一体化し 4 層コイル化 (第二次キュアリング)。
- (4) (3) の 1 極コイルを 4 台セット組んだ状態で電気絶縁シートを取付け、ステン

レスカラーを油圧プレスでピン留め (カラーリング)。

- (5) 鉄ヨークでカラードコイルを上下から挟み込んだ状態で油圧プレスし、キーを挿入 (ヨーキング)。
- (6) ステンレスシェルを溶接。
- (7) リード部をハンダ接続



Fig. 2-8 1m モデル磁石試作： コイル巻線



Fig. 2-9 1m モデル磁石試作： カラーリング

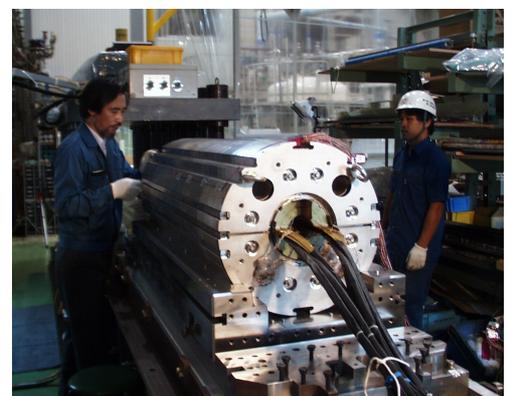


Fig. 2-10 1m モデル磁石試作： ヨーキング

これらは NbTi 超伝導線材を用いた加速器用超伝導磁石の代表的な製造工程と言える。(余談だが、さらなる高磁場化を図るために化合物系 Nb₃Sn 超伝導線材を用いる場合には、コイル巻線後に 600℃以上で熱処理するため、脆い無機絶縁の使用や樹脂含浸などのプロセスとなり、より複雑で繊細な製造工程となる。)

コイル巻き線とキュアリング作業は、コイル形状と寸法を決定する最も重要な作業であるため、超伝導ケーブルや CNC 加工した GFRP 製ウェッジやエンドスペーサーの寸法管理はもちろんのこと、キュアリング後の超伝導コイルに荷重を掛けてコイルサイズを測定し、コイル毎の再現性や傾向を把握した。

電気絶縁の取付けは、複雑に折れ曲がったポリイミドシート(厚さ 125 μm)を正確に 4~8 層に重ね合わせる作業で、見えない部分の折り返しや不適当なオーバーラップ(組立時に過剰な予備圧縮応力となりコイルを傷めてしまう)防止などに、大変気を遣う。

2.2.6. 1m モデル磁石の試作

所内で試作、性能評価した 1m 長モデル磁石では、実機磁石とは異なり各種センサー(クエンチ場所同定用の電圧タップ、コイル予備圧縮応力や機械構造測定用の歪みゲージやキャパシタンスゲージ)を取付け、製作時や励磁試験中の磁石機械的挙動を観察した。1m モデル磁石は全部で 5 台製作し、高エネ研の縦型超流動ヘリウム冷却試験用クライオスタットで 1.9 K に冷却後、クエンチ特性、磁場測定などの励磁試験を行って性能を評価した。

初期の 1m モデル磁石 2 台では、基本的なクエンチ特性(トレーニング特性)に重点を置き、必要とされる磁場勾配を達成できることを確認した。磁石の基本構造に問題が無いことを確認した上で、3 号機からは磁場精度を改善するためにインナーコイルの改良(直線部と両エンド部)に着手した。四極磁場対称性からは、主磁場の他に、12 極と 20 極の高調波成分磁場が発生するが、特に 20 極成分に関しては、ほとんどゼロ近くまで減少させることが出来た。

なお、実機製作のため、メーカーに対しては、1m モデル磁石に関する図面はもちろんのこと、油圧プレス、計測機器、高精度打ち抜き金型などが高エネ研から支給、貸与された。

2.3. MQXA 磁石製造と初期トラブル

1m モデル 3~5 号機の開発を通じて、磁石性能の再現性を確認し、メーカーでの 7m 長実機磁石(プロトタイプ 2 台を含む)の製造を開始した。7m 実機磁石では、1m モデル磁石と比較してコイル直線部の長手方向長さのみを延長しているが、直線部断面や両端部の形状はそのままである。

プロトタイプや初期の実機製造では、いくつか大きなトラブルが発生した。

最初のトラブルは、プロトタイプ 1 号機の励磁試験中に発生したコイル内での電気ショートだった。トレーニングクエンチ試験を実施中、突然クエンチ電流が大幅に低下して、以降は安定して励磁できない状態に陥った。クエンチアンテナや磁場測定の解析結果は、コイル内でのターンショートを示唆しており、磁石を分解して目視観察することになった。Fig. 2-11 は、分解後の 1、2 層コイルの Lead End 側コイル端部であり、電気ショートによりコイル絶縁や GFRP 製の層間シートが黒焦げになっている様子がわかる。原因調査の結果、1 層コイルの 1 ターン目エンドスペーサー一部品形状に問題があることがわかった。Fig. 2-12 上図に示すように、問題のあったエンドスペーサーのターン(ケーブル折り返し)部での傾きは約 2 度であり、最外層側と比較して最内層側の周長が 3mm も短かかった。つまりケーブルの等周条件を満足していないことになる。このためケーブルは自然と上側に持ち上る(ポップアップ)ことになり、2 層コイルと干渉して、絶縁損傷に至った。等周条件を満たすようにエンドスペーサーの傾きを 8 度に再設計してからは、電気ショートは再発していない。

次の大きなトラブルは、実機 2 号機において発生した、電気絶縁シートの損傷だった。励磁試験後に磁石ボア内部を検査した際、コイル間や対地絶縁となるフラップ状に突き出た電気絶縁シートが Fig. 2-13 に示されるように引き裂かれていることが判明した。磁場測定用ボアチューブとコイルの隙間（数 mm）をフラップ状の電気絶縁シート（Fig. 2-3）が完全に塞ぐため、クエンチ発生時に突発的に発生するヘリウムガスの流路がなくなってしまうことが原因であることがわかった。検討の結果、フラップに等間隔で孔を開けることで、ヘリウムガスの流路を確保する工夫を施した。当然、絶縁性能を低下させることになったが、LHC で要求される耐電圧試験を合格すること



Fig. 2-11 プロトタイプ 1 号機の電気ショートの様子。2 層コイル内周側（上）と 1 層コイル外周側に黒焦げの部分が見える。

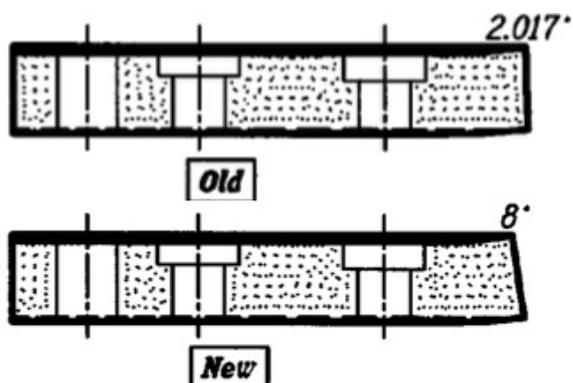


Fig. 2-12 エンドスペーサーの設計変更

を確認した。本施工後は、電気絶縁シートが破れるトラブルは起きなかった。

2.4. MQXA 磁石の励磁試験結果

Fig. 2-14 に、MQXA 磁石 19 台全てのトレーニングクエンチの履歴を示す。上図は、クエンチした時の電流を表しており、下図はリード側端部、直線部、コイルリターン側端部の各領域で発生したクエンチ回数を示す。いずれも試験した磁石毎に、左から時系列順で並べている。初期の 10 号機までの試験では、2~3 回程度のクエンチで定格電流を超えており、その後も 230 T/m まで比較的少ないクエンチ回数で到達している。クエンチ発生箇所が磁石端部に集中しているのは、磁場のピークがあり、しかも直線部と比べて支持構造が弱いためだと類推できる。

ところが、11 号機以降は、合格基準となる 230 T/m に到達するまでのクエンチ発生回数は増加し、トレーニングによるクエンチ電流増加も明らかに鈍化してきた。特におかしかったのは、クエンチがほとんど直線部で発生した点だった。そして、ついに 14 号機では、一旦 230 T/m に到達したにも関わらず、定格付近から一向に電流が上昇できない事態となってしまった。様々な調査の



Fig. 2-13 磁石ボア内部の電気絶縁シートの損傷。

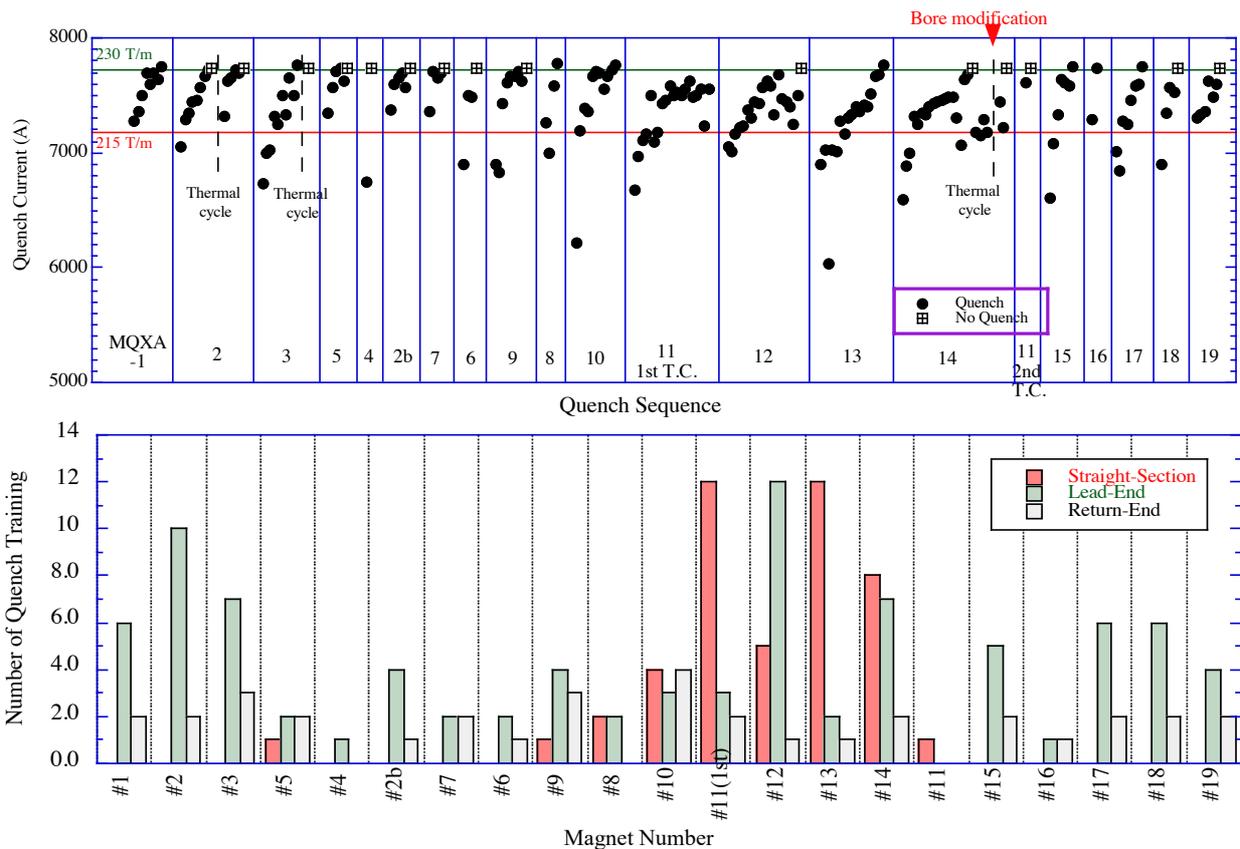


Fig. 2-14 MQXA 磁石のクエンチ特性。各磁石毎のクエンチ電流（上）とクエンチ発生箇所（下）

結果、磁石のビームボアに挿入した磁場測定のためのボアチューブに原因があることを突き止めた。ボアチューブは二重管のアンタイクライオスタット構造になっていて、外管と内管の隙間は断熱真空槽になっている。内外管には共に透磁率が真空に近い SUS316L を用いたが、それでも強力な四極磁場勾配中で少しでも偏芯すると、磁石側に引っ張られてしまう。断熱真空槽には内外管が接触しないためのスペーサーが取り付けられていたが、磁石直線部付近では不十分だったため、超伝導コイルに内管と外管が引っ張られて接触してしまっただけでなく、常温からの侵入熱によりコイル温度が上昇したことが、クエンチ多発の原因だと分かった。ボアチューブを改造してスペーサーの形状と数を改良してからは、14号機の2回目の冷却試験以降、劇的にクエンチ回数が改善された。また直線部におけるクエンチもほとんど見られなくなった。このことから、11~14号機で見られたクエンチ特性の悪化も、磁石自身の問題で

はなく、ウォームボアが原因だったと考えている。

MQXA 磁石の磁場測定では、コイル半径 21 mm、長さ 25 mm と 600 mm の 2 種類の回転コイルを用いた。LHC での運転範囲をカバーするように複数の電流値において、磁石全長をスキャンしながら磁場測定を行った。Table 2-3 は、各電流における直線部の磁場勾配と磁場長さについて、全 19 台の平均値とその標準偏差を示している。これらの磁場特性は全 19 台に渡って大変良く揃っており、 10^{-4} 以内の再現性を示していることが分かる。Fig. 2-15 に、各磁石の参照半径 17 mm における高調波成分（誤差磁場）を示す。上下の図は、それぞれ Skew (a_n) と Normal (b_n) の高調波成分に相当し、図中の誤差棒は、ビーム光学計算に基づいて許容される系統誤差と偶然誤差の合計を示す。式(1-1)で示したように、高調波成分（多極磁場係数）は主四極磁場で規格化しているが、元々小さな値であるため、10000 倍して表記されている。まず先に説明した 12 極 (b_6) 及

Table 2-3 MQXA 磁石の磁場特性 (磁場勾配と磁場長)

Current (A)	Gradient (T/m)		Magnetic length (m)	
	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.
392.3	12.445	0.0096	6.3632	0.0048
2011.3	63.475	0.0200	6.3642	0.0010
3207.9	101.01	0.0341	6.3642	0.0009
6134.4	186.53	0.0581	6.3670	0.0009
6677.3	201.73	0.0587	6.3675	0.0010
7227.9	217.07	0.0651	6.3679	0.0012

び 20 極 (b₁₀) 成分について見ると、1 m モデル磁石からの改良の成果が良く現れており、系統的に低く抑えることができた。その他の各高調波成分については、Normal 8 極成分 (b₄) を除くと、許容値よりも十分小さいことが分かる。一方 Normal 8 極成分は、許容値を大きく超えることは無いものの、最初の設計値よりも明らかに大きい値を示した。検討の結果、鉄ヨークを左右でキー留めする際に、上下方向に約 0.1 mm 楕円変形することが主な原因だと分かった。しかしながら、総じて MQXA 磁石の磁場性能は良好で、LHC で求められる仕様を充分満足することを確認できた。

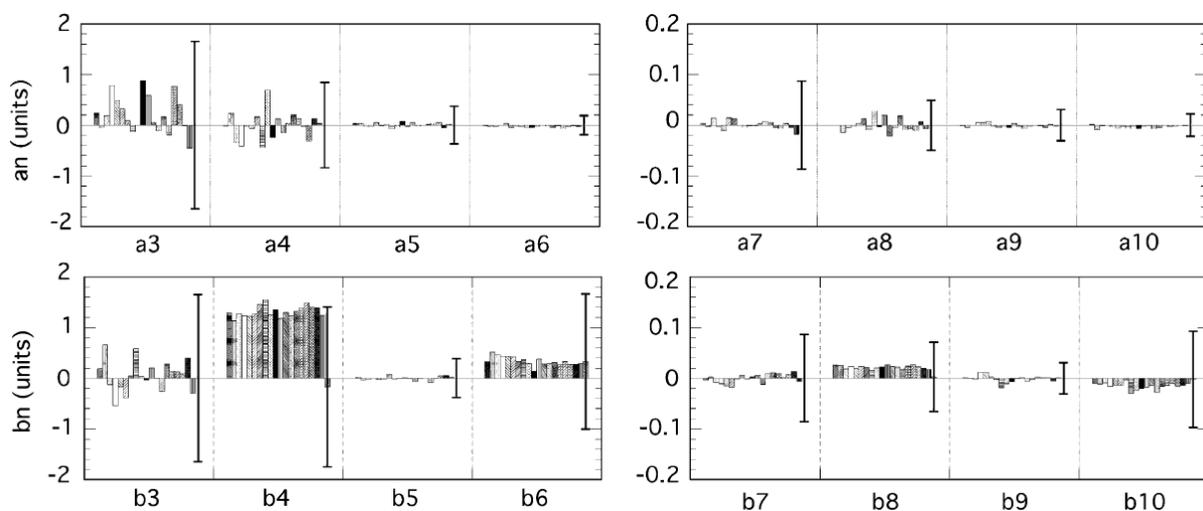


Fig. 2-15 MQXA 磁石の磁場特性 (高調波成分)。

3. J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石 SCFM^[4-8]

3.1. 概要

大強度陽子加速器 J-PARC では、長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) 施設が建設され、2009 年春からビーム運転が始まった。この計画では、未確認の『 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動』を発見して、ニュートリノ振動が 3 世代の間の振動現象であることを明らかにすることが大きな目的である。J-PARC とニュートリノビームラインの概観を Fig. 3-1 に示す。J-PARC メインリング (MR) から『速い取り出し』により大強度陽子ビームが取り出され、超伝導磁石システムを含む一次陽子ビームラインによりターゲットステーションまで導かれる。ターゲットで生成されたパイ中間子は、生成と同時にホーン電磁石により強力に収束され、直後のダイケイパイプ内でミュオンとニュートリノに崩壊する。こうして生成された、従来の K2K 実験と比較して約 100 倍の強度を持つニュートリノビームを、J-PARC 内にある前置ニュートリノ検出器 (Near Detector) と 295 km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデにおいて詳細に測定し、その性質を明らかにする。

ニュートリノビームラインの中で、一次陽子ビームラインのアーク部では、MR から内周側に取り出される最高 50 GeV (現状は 30 GeV) の陽子ビームを、曲率半径 100 m でスーパーカミオカン

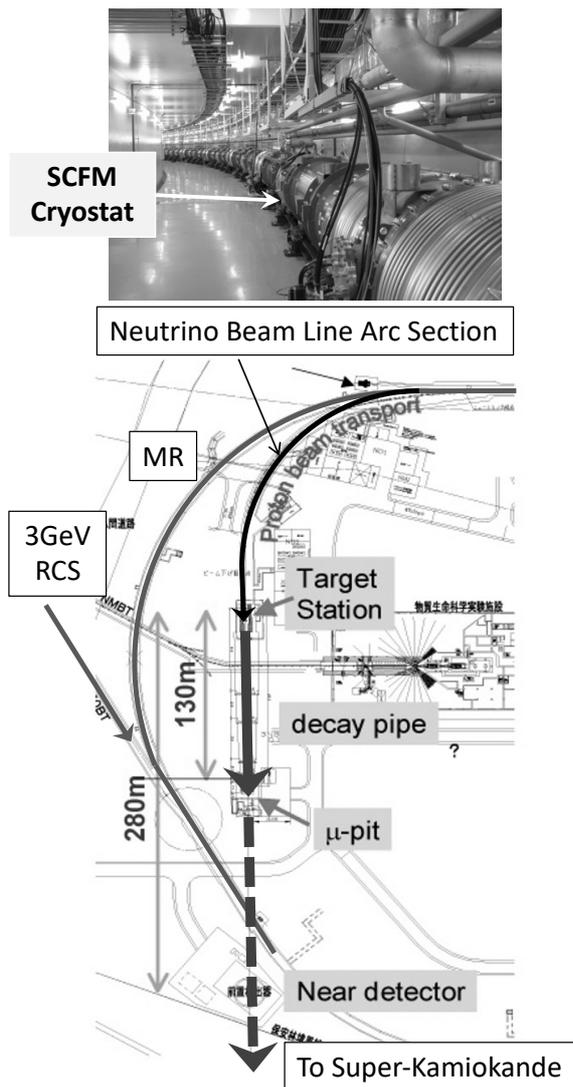


Fig. 3-1 J-PARC 加速器とニュートリノビームライン。MR から取り出した一次陽子ビームを SCFM 磁石により Target Station に導く。

デの方向に約 90 度曲げることが要求された。限られた狭い敷地内で他の J-PARC 施設建設との干渉を避けるため、ビーム内周側取り出しは不可避であったが、これは MR よりも小さい曲率でビームを曲げることを意味しており、必然的に高磁場が発生できる超伝導磁石システムが採用されることになった。検討の結果、ニュートリノビームラインには実際の加速器としては世界で初めて機能結合（複合磁場）型超伝導磁石（Superconducting Combined Function Magnet: SCFM）が採用された。

SCFM 磁石の所内開発は 2002 年に始まった。実機長プロトタイプ的设计、製作を行い、冷却励磁試験を含む性能評価の後、メーカー（三菱電機）での量産を 2005 年に開始した。最終的に冷凍機を含んだ超伝導磁石システムは 2008 年 12 月に完成し、2009 年 6 月までビーム運転を含む試運転を行った。4 月 23 日には初めてのニュートリノ生成を確認した。

3.2. 機能結合（複合磁場）型超伝導磁石 SCFM の開発

3.2.1. 背景

従来の加速器用超伝導磁石では、ビームの偏向と収束・発散の機能は分離させ、それぞれの役割を二極磁石と四極磁石のように機能を分離した単機能磁石に担わせていた。しかし、ニュートリノビームラインの超伝導磁石システムを考えた場合、必要な磁石台数がせいぜい数十台であり、二極磁石と四極磁石の 2 種類の超伝導磁石を開発・試作・性能検証した上で生産ラインを構築することは、コストとスケジュールの両方の観点から困難であると判断された。

検討の結果、1 種類の磁石で二極磁場と四極磁場の両方を同時に発生することができる SCFM が新たに提案された。ここでは、二極磁場と四極磁場を発生するそれぞれの電流分布を単層コイル上に重ね合わせ、左右非対称の超伝導コイルを形成する。2 台の SCFM 磁石について、それぞれを反対向きになるようにビームライン上に並べることで、ビームを偏向しながら、最初の磁石では水平方向にビームを収束させ、次の磁石では発散させる、いわゆる FODO ラティスを形成することができる。この SCFM 磁石を用いた新しいビーム光学設計では、当初の機能分離型の設計と比べてセル数を 10 から 14 に増やすことで、ビームサイズを減少させ、アクセプタンスを増やすことができた。逆に磁石の必要台数は 40 台から 28 台に削減できた。なお、陽子ビームが 1 パスするだけのビームラインで運用されるため、許容される誤差磁場は LHC 磁石のようにタイトではなく、おおよそ 10^{-3} 程度まで緩和されている。

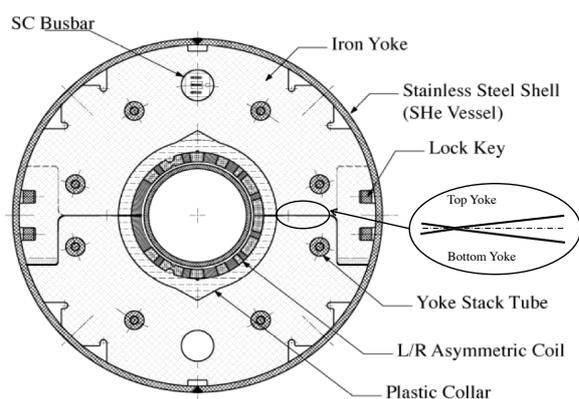


Fig. 3-2 J-PARC ニュートリノビームライン機能結合型超伝導磁石 SCFM の断面模式図。

Table 3-1 SCFM 磁石の主要設計パラメータ

Parameter	
Magnetic Length	3300 mm
Coil Inner Diameter	173.4 mm
Yoke Inner Diameter & Outer Diameter	204 mm, 550 mm
Shell Outer Diameter	570 mm
Dipole Field	2.59 T
Quad. Field	18.7 T/m
Peak Field in SC coil	4.7 T
Load Line Ratio	72 %
Nominal Current	7345 A
Operational Temperature	< 5 K
Inductance	14.3 mH
Stored Energy	386 kJ
Number of Turns	
Left (2 blocks)	35+6
Right (5 blocks)	6+5+10+13+7
Lorentz Force (ΣF_x & ΣF_y)	
Left of half coil	-618 kN/m & -360 kN/m
Right of half coil	434 kN/m & 114 kN/m

3.2.2. 磁石設計

Fig. 3-2 に、ニュートリノビームライン用 SCFM の断面模式図を示す。また、磁石の主要諸元（磁場等に関しては、50GeV 陽子ビームに相当する）を Table 3-1 にまとめる。超伝導コイル部は、鏡対称の 2 つのコイルを上下に組み合わせて円周構造となる。超伝導コイル部の周囲は、電気

絶縁とコイル位置決め役割を持つ、上下 2 組のガラス繊維強化フェノールプラスチック製カラー（実際はスペーサーとして機能）で囲まれている。さらに外側には磁束リターンと電磁力支持のための鉄ヨークが配置される。電磁力の支持構造としては、MQXA 磁石と同様に鉄ヨークそのものをキー留めすることで達成する。磁石中心のビームチューブと最外のステンレスシェルで囲まれた空間内部は、強制流冷却の超臨界ヘリウムにより満たされ、超伝導コイルは 5K 以下に冷却される。コイル口径は、定格 750 kW の大強度陽子ビームに起因するクエンチの可能性をできるだけ小さくするために、余裕をもって 173.4 mm に決定した。

超伝導ケーブルについては、CERN-LHC 主偏向磁石の外層コイルで用いられているラザフォード型 NbTi/Cu 超伝導ケーブルを、ほぼそのままの仕様で採用した。当時、CERN-LHC 向けの超伝導ケーブルが世界各地で量産されていたため、厳密に品質管理された高性能超伝導ケーブルを、極めて低コストで調達することが出来た。なお、前述の LHC-MQXA 磁石を開発した実績を基に、素線間接触抵抗制御の為に素線表面に Sn-Ag を被覆した点と、ユーピレックステープ 2 層巻きの外層表面に B ステージエポキシを塗布した絶縁システムを採用したことが、LHC オリジナルのケーブル仕様と異なっている。

コイルの電磁設計は、ROXIE^[3]によりモデル化し、汎用の Opera-3d(TOSCA)で検証した。その際、誤差磁場となる 6 極 (b_3) 以上の高調波成分を充分抑制しながら、コイルの部品点数、コイルブロックやウェッジの形状、実際のコイル巻き線での作業性なども考慮して、最終的なコイル配置を決定した。

Fig. 3-3 に、ROXIE で計算した直線部二次元断面での磁場分布を示す。磁場分布を見ると、ボア内部では一定磁場（二極磁場）に勾配磁場（四極磁場）を重ね合わされている様子が判る。コイルの磁極は中心から左側に約 20°傾いた場所があり、左側 2 つのコイルブロック周辺が最大磁場となっている。Table 3-1 にも示したが、左右非対称

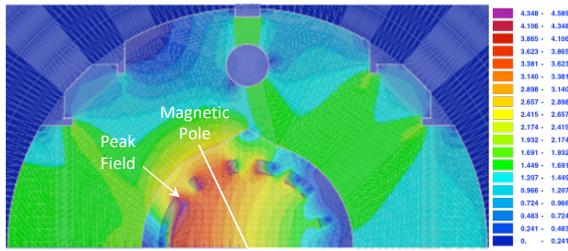


Fig. 3-3 ROXIE による 2D 磁場分布。二極コイルでは頂点の位置に磁極が存在するのに対し、SCFM では密に巻かれた高磁場側（左側）に磁極がシフトしている様子がわかる。

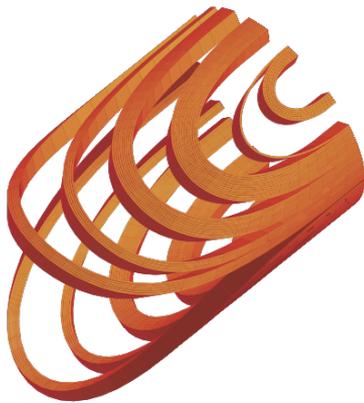


Fig. 3-4 SCFM 磁石の左右非対称コイルでのケーブルターンの様子。

な磁場分布のため、磁極左側 2 ブロック（高磁場側）と右側 5 ブロック（低磁場側）にかかる電磁力も左右非対称となるのが特徴的である。Fig. 3-4 は、コイル端部でのケーブルターンの様子を示す。

Table 3-2 に磁場計算結果をまとめる。表中の B_n は、磁場を参照半径 50 mm で多極展開したときのノーマル $2n$ 極成分を表している（例えば B_1 は二極磁場、 B_2 は四極磁場を示している）。直線部二次元断面での多極磁場成分 ($n > 3$) は、目標であった二極磁場の 10^{-3} 以下に抑えられていることが判る。一方、磁石全体の積分磁場を見ると、コイル端部の影響で 6 極磁場 (B_3) だけが突出して大きくなってしまった。しかし、計算で得られた誤差磁場を考慮してビーム光学計算を再度行ったところ、このままでも充分許容できることを確認した。ロードライン曲線と二極、四極磁場の電流依存性を Fig. 3-5 に示す。50 GeV 陽子ビーム運転時 (7345 A) は、磁石のロードライン比が

Table 3-2 SCFM 磁石の磁場計算結果（陽子エネルギー 50 GeV、参照半径 50 mm）。

Multipole Component	2D Field (T)	Field Integral (Tm)
B_1	2.591	8.712
B_2	0.940	3.120
B_3	-2.4×10^{-4}	-293.6×10^{-4}
B_4	13.0×10^{-4}	-20.1×10^{-4}
B_5	5.4×10^{-4}	-30.6×10^{-4}
B_6	-16.5×10^{-4}	-62.8×10^{-4}
B_7	-3.0×10^{-4}	-20.9×10^{-4}
B_8	-10.2×10^{-4}	-32.0×10^{-4}
B_9	-21.7×10^{-4}	-73.4×10^{-4}
B_{10}	-0.6×10^{-4}	-0.3×10^{-4}

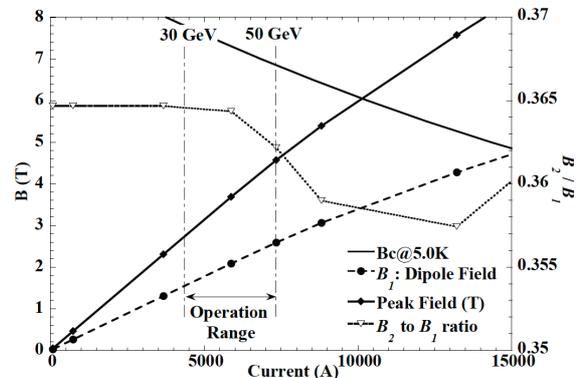


Fig. 3-5 SCFM 磁石のロードラインカーブと二極及び四極磁場の電流依存性。

72% であり、加速器用超伝導磁石としてはマージンの大きい設計になっている。参照半径 50mm における二極磁場に対する四極磁場の比を見ると (B_2/B_1)、鉄ヨークの透磁率の飽和の影響で、通電電流とともに微妙に変化している。しかし、運転が想定される 30 ~ 50 GeV の範囲では、 B_2/B_1 が 0.362 ~ 0.365 と充分小さい範囲に収まっており、ビーム運転に支障が無いことを確認している。

3.2.3. 製造方法

基本的な超伝導コイルの製作方法は、機能分離型の二極超伝導磁石のそれと良く似ているが、以下の点が大きく異なる。

- 1) 磁極位置が高磁場側に約 20° ずれている、
- 2) コイルが左右非対称である、
- 3) ペアとなる上下コイルは鏡対称となる、

- 4) コイル断面の半分を G11 製のウェッジ（セクター形スペーサー）が占める、
- 5) 通常コイルの位置決めのために磁極部に挿入される非磁性ステンレスカラーは無い。かわりにキーによりプラスチックスペーサーと位置決めされる。

巻き上がったコイルはマンドレルごとキュア用ブロックに挿入され、油圧プレスで規定寸法になるまで押し込まれる。そして 130 °C で 5 時間加熱され、ケーブル絶縁、ウェッジ及びエンドスペーサーの表面に塗布されていた B ステージエポキシが接着硬化することでコイル全体が一体成形される。冷却と励磁の際の電磁力を考慮すると、後で述べるヨークキングによる磁石組み立て後のコイル周方向の予備応力は、80~120 MPa の範囲に収まる必要がある。このため、磁極を境に左右コイルの機械特性（寸法、剛性、熱収縮）が異なることを考慮して、高磁場（左）側で 0.7 mm、低磁場（右）側で 1.0 mm オーバーサイズになるよう、キュア時には非対称にシムを入れて調整している。キュア後のコイルは、磁石組み立て後に相当する寸法まで圧縮した際の圧力測定を行い、上記の設計予備応力範囲に収まることを確認した。

超伝導コイルと鉄ヨークの間に挿入されるプラスチックカラー（長さ 104 mm、径方向厚さ 20 mm）は、ガラス繊維入りフェノールプラスチック（住友ベークライト製 PM9640）を圧縮モールド成型することによって製作した。プラスチックカラーはコイルの対地絶縁を保障するだけでなく、鉄ヨークに対するコイル磁極位置を決定する重要な役目を持つ。モールド成型及びポストベークキング時のパラメータの調整を繰り返し、寸法の絶対精度を ± 0.05 mm に抑えることができた。プラスチックカラーの採用は対地絶縁の大幅な簡略化を可能にし、磁石製造のコスト削減に貢献した。

鉄ヨークは、左右にキー用溝のある、突出した“爪”を持つ厚さ 5.8 mm の固定用ヨーク板と、逆に“爪”を収めるためにその分を削った 6.0 mm のスペーサーヨーク板の 2 種類から構成される。



Fig. 3-6 ヨークキング組立て中の SCFM 磁石

Fig. 3-2 では、上側が固定用ヨーク板、下側がスペーサーヨークとなっている。ヨーク板はファインブラッキング法により非常に精密に打ち抜かれ、その代表的な断面寸法精度は ± 0.05 mm である。Fig. 3-6 に、ヨークキングのために組み立て中の超伝導磁石の写真を示す。まず下側ヨークをプレス治具上に並べ、次に下側プラスチックカラー、下側コイル、ビームチューブ (SUS316L)、上側コイル、上側プラスチックカラーの順番に設置した後、最後に上側ヨークを設置する。このとき上下のヨーク同士は、櫛状の爪が交互に嵌め合うことになる。ヨークキング作業では、油圧プレスによりヨーク両肩を押し込み、上下ヨークが水平面上で点接触するまでコイルを圧縮する。Fig. 3-2 中の拡大図にあるように、ヨーク板の水平面はテーパ状になっているので、さらに荷重をかけるとヨークはバネの様に變形し、最初は互い違いだった上下ヨークのキー溝が平坦化されてロックキーが挿入可能となる。このように、キー挿入により上下の鉄ヨーク同士がロックされることで、油圧プレス解放後もコイルには必要な予備応力が保持され続けることになる。

最後に、鉄ヨークの外側から、ヘリウム容器となる厚さ 10 mm のステンレスシェル (SUS304L) が取り付けられる。シェルは半割れ構造になっていて、自動溶接機を用いて完全溶込みで突き合わせの縦継溶接される。

3.3. SCFM 実機磁石の量産・試験結果

プロトタイプ機を所内試作した後、冷却励磁試験を行ったが、50 GeV 定格の 105 % である

7700 A までクエンチなしで到達できた。また磁場測定の結果、多極磁場成分は計算結果と概ね一致することを確認した。ビーム光学からの要求仕様に対して十分な磁場性能であったので、コイル形状の再調整等を行わず、そのままの設計で実機量産に進んだ。

2005年度から2008年度末までに予備機も含めて32台全ての量産を完了した。磁石量産では、後述のクエンチ保護ヒーター(QPH)に問題の生じた磁石が2台(1台は使用可、他の1台は分解後再組み立て)あった他は、問題なく予定通りに量産された。

プロトタイプ機と同様に、全ての実機磁石について、トレーニング無しで目標電流に到達することができた。磁場特性の代表的な測定結果として、磁石32台分の多極成分積分磁場の平均値と標準偏差をTable 3-3に示す。Table 3-2の設計値と比較すると、6極(B_3)から10極(B_9)において系統的な不一致が目立つが、主磁場(B_1)で規格化すると 10^{-4} のレベルであり、1パスのビームライン用磁石として実用上全く問題ない。また標準偏差は一桁小さく、磁場特性の再現性が良いことが確認できた。

3.4. ニュートリノビームライン磁石システムの励磁回路

Fig. 3-7に、ニュートリノビームラインを構成するSCFMおよびビーム軌道補正磁石(コレクター磁石)の励磁回路を示す。SCFMは全て電氣的に直列に接続され、1台の電源(10V, 8kA)によって励磁される。励磁回路には20 mΩのダンプ抵抗が接続されているが、電流減衰時定数は約20秒と長く、基本的なクエンチ保護は、各磁石に取付けられたコールドダイオードとQPHによってなされる。

QPHは、発熱密度、コイルのカバー範囲、リード線の取り出し方法などを総合的に考慮して設計される。SCFMでは、磁石両端の専用カラー(G10製)の内周面に取付けられている。各端部に1セット(両端で合計2セット)取付けられており、各セットは2枚のポリイミドヒーター

Table 3-3 SCFM 磁石 32 台の多極成分積分磁場の平均値と標準偏差 (陽子エネルギー50 GeV、7345A)。

Multipole	Unit	Measured	
		Ave.	S.D.
B_1	Tm	8.72	0.023
B_2		3.07	0.002
B_3	1×10^{-4} Tm	-218.99	6.50
B_4		-7.55	4.55
B_5		-47.77	3.31
B_6		-68.18	1.90
B_7		-33.02	3.80
B_8		-59.11	5.14
B_9		-75.50	1.67
B_{10}		-10.57	1.41

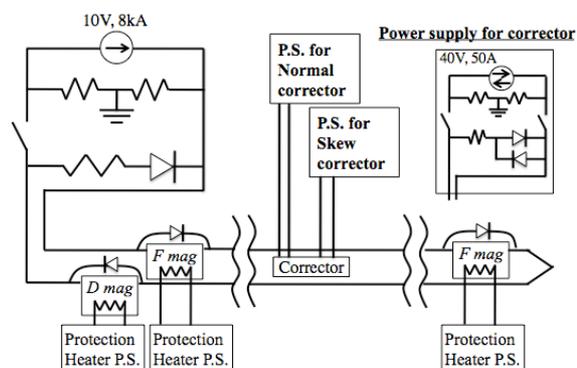


Fig. 3-7 ニュートリノビームライン磁石システムの通電回路。主磁石である28台のSCFM(F: 14台、D: 14台)と3台のコレクター磁石(1台に独立したNormalとSkewダイポールを含む)から構成される。

から構成される。このように独立した4回路にすることで、冗長性を確保している。

クエンチを検出したときに、各QPHにつながったコンデンサ放電回路(保護ヒーター電源)を動作させて磁石をクエンチさせることで、磁石発生電圧を速やかにダイオードのターンオン電圧より上昇させ、ダイオードへの電流バイパスを促すことで、磁石の局所的な温度上昇を防ぐ。

1台のコレクター磁石は独立したNormalとSkewダイポールコイルから構成されており、各コイルに専用の電源と遮断機が接続されている。クエンチ時には電源を遮断し、1Ωのダンプ抵抗にエネルギーを取り出す事で磁石を保護する。

クエンチ検出および QPH 回路や電源遮断回路などへのトリガー送信は、フランス CEA Saclay によって開発された Magnet Safety System (MSS)によってなされる。本システムにおいては、隣接する4台の磁石でクエンチ検出回路を組んでおり、1台の磁石がクエンチしたときには最低4台分の保護ヒーターにトリガーを送信するようになっている。その他、MSSには電源や冷凍機の運転状態も入力されており、超伝導磁石システムとしてビーム受入れ可能かどうかを判断する重要なシーケンス処理も MSS が受け持っている。

3.5. QPH のトラブル

SCFM で発生した大きなトラブルは、18号機磁石の冷却励磁試験の際に発生した QPH の焼損だった。分解して検証した結果、ヒーター抵抗とリード線の半田接続部付近において、コイルと G10 カラーに挟まれる部分で過度な応力集中により、一部で断線が発生していたことがわかった。そもそも、厚さ 0.2~0.3mm のヒーターを取り付けるために、カラー内周面に薄溝加工を施していたが、凹面であるために精度の達成が困難だった。また既製品のヒーター2枚を隣り合わせで取り付けていたため、ヒーターの取り付け作業が複雑で、リード線の取り回しにも無理があった。これらを改善するために、1) 2回路分を一体化したヒーターの新規開発、2) ヒーター用溝加工を廃止し代わりに厚さ補償用ダミーシートを導入、3) リード線用貫通孔の長穴化やハンダ接続



Fig. 3-6 焼損トラブル後に設計変更された QPH

部周りの逃げ溝拡大、4) QPH への入力電圧の変更 (350 V→300 V) などを実施した (Fig. 3-6)。入力電圧変更により QPH エネルギーが 100 J から 75 J へと減少したが、時間遅れは約 8 msec しか増えておらず、クエンチ保護性能としては問題がないことを実験的に確認した。以降、QPH のトラブルは発生していない。

4. LHC 高輝度化アップグレード向けビーム分離双極磁石 MBXF^[9-15]

4.1. LHC の現状と限界

2022年7月の時点での LHC 加速器は、2019年からの3年間の長期停止期間 (Long Shutdown 2: LS2) における機器メンテナンスや性能向上のためのアップグレードを終えて、いよいよ Run3 (2022年から2025年の3年間)でのビーム衝突実験を開始した。LS2でのアーク部主偏向磁石のトレーニングクエンチキャンペーンの進展により、ビーム衝突エネルギーを 13 TeV から 13.6 TeV まで増加させることに成功し、自身の持つビーム衝突エネルギーの世界記録を更新した。またピークルミノシティも、すでに Run2 までに LHC 設計値の2倍以上となる $2.05 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ を記録している。積分ルミノシティも 160 fb^{-1} を超え、順調に実験が進行しているといえる。高いルミノシティを維持したまま、Run3 でも安定した運転が期待されている。

一方で、最近の順調なルミノシティを維持したとしても、統計精度の改善度合いは鈍化していく。このため、LHC をさらにアップグレードし、飛躍的にルミノシティを向上させて統計量を増加させる必要性について、既に 2010 年代から議論されてきた。実は $2 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 以上のルミノシティでは、現行のコリメータやヘリウム冷凍機の許容能力を超えてしまい安定した運転が不可能になる。またトンネル内の電源やクエンチ保護システムなどの電子機器類が放射線に耐えられなくなり、故障が頻発することになる。

また、Run3 では積分ルミノシティが 300 fb^{-1} に達する計画だが、最終ビーム収束用超伝導磁石システム (つまり MQXA 磁石) への積分吸収線

量は最大 30 MGy にまで達してしまい、有機材料の劣化のため磁石の運用ができなくなってしまう。このため、Run3 終了後には、アップグレードとは関係なく磁石システムを更新する必要がある。

以上のような背景から、2026 年からの長期運転停止期間 LS3 に大規模な改修を行い、ピークルミノシティ（実際には後述するようにレベリングして） $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、最終的な積分ルミノシティ 3000 fb^{-1} を目指す『LHC 高輝度化アップグレード(HL-LHC: High Luminosity LHC)』計画が進められている。

4.2. HL-LHC 計画の概要

LHC におけるビーム衝突ルミノシティ L は、以下の式で表すことができる。

$$L = \gamma_r \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\epsilon_n \beta^*} R \quad (4-1)$$

$$R = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_s)^2}{4\epsilon_n \beta^*}} \gamma_r \quad (4-2)$$

ここで、各パラメーターは以下の通りである。

- γ_r : ローレンツ因子
- N_b : バンチ当り陽子数
- n_b : バンチ数
- f_{rev} : 1 秒当りの周回数(=11.2 kHz)
- β^* : 衝突点での β 関数
- ϵ_n : 横方向規格化エミッタンス
- R : 交差角による幾何的損失係数
- θ_c : ビーム交差角
- σ_s : 縦方向ビームサイズ(R.M.S.)

となる。ルミノシティを増大するためには、ビーム強度を増強 (N_b , n_b を大きく) し、衝突点でのビームサイズを絞り (ϵ_n , β^* を小さく)、 R をできるだけ大きく維持できるように設計すれば良い。しかし、レイアウト上の制約 (例えば、加速器リングの大半を占めるアーク部の超伝導磁石は変更できない、衝突点検出器と最終ビーム収束用磁石システムとの距離は変更できない、など) を考慮した結果、次の設計方針が採択された。

- 1) ビーム強度を増強しながら、エミッタンスは現状以下に低く抑えるため、LHC 入射器 (Linac4, PSB, PS, SPS) をそれぞれアップグレードする、
- 2) LHC 衝突点でのビームサイズを絞り込むために、 β^* を 0.55 m から 0.15 m にまで減少させる。そのため ATLAS と CMS の衝突点周りの挿入部 (IR1, IR5, それぞれ長さ約 300 m) には、新たに大口径かつ高磁場の磁石が必要となる。Fig. 4-1 に現行 LHC と HL-LHC での最終ビーム収束部磁石システムの配置図を示す。
- 3) 挿入部でのビームサイズが大きくなるので、ビーム交差角 θ_c も大きくせざるを得ない。結果としてそのままでは幾何的損失係数 R を大きく保つことができない。このため、KEKB で実用化されたクラブ空洞技術を陽子加速器として初めて導入し、係数 R を現行 LHC と同程度にまで回復させる。

特に 2) については、最終ビーム収束用超伝導磁石システムが非常に重要な役割を担う。衝突点でのビームサイズを細く絞り込むために、衝突点での β^* を小さくするが、そのトレードオフで衝突点から約 20 m 離れた最終ビーム収束部での β は逆

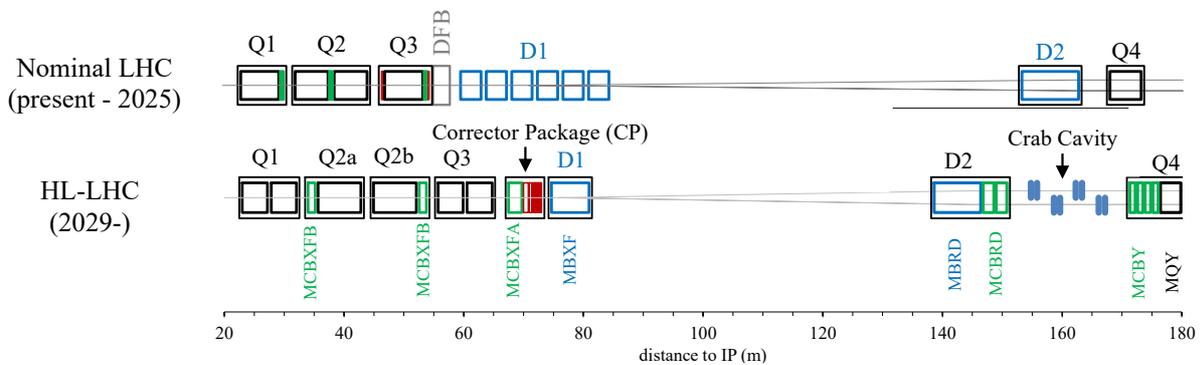


Fig. 4-1 HL-LHC 最終ビーム収束超伝導磁石システムのレイアウト (下図)。上図は現行 LHC でのレイアウト。

に大きくなり、ビームサイズも今よりも大きくなる。衝突点からの二次放射線（デブリ）を防ぐためのボア内部のタングステンシールドのスペースも確保する必要があり、最終ビーム収束用磁石（Q1 から D1 まで）の口径は、現行の 70 mm から 150 mm に広げる必要がある。その一方で、挿入部において磁石に与えられるスペースはほとんど変更できないため、これまでと同様の積分磁場を維持するためには、磁石を高磁場化する必要がある。つまり磁石の『大口径化』と『高磁場化』を両立させなければならない。

最終ビーム収束用磁石特有の問題としては、ビーム衝突点からの二次放射線による影響が非常に大きい。Q1 から D1 までのコールドマス（全長約 60 m）への放射線による入熱は約 1 kW と予測されている。超伝導性能の向上だけでなく、甚大な放射線入熱を効率的に冷却するため、全ての超伝導磁石は超流動ヘリウム冷却により 1.9 K において運転される。莫大な熱負荷に対応するため、最終ビーム収束用磁石専用のヘリウム冷凍プラン（1.8 K での冷凍能力が 3 kW）を IR1 と IR5 に新設する。超伝導ケーブルやコイルの構造にも除熱の観点からの設計が必要となる。放射線による影響としては、入熱だけでなく吸収線量についても注意が必要である。HL-LHC の目標積分ルミノシティ 3000 fb⁻¹ に到達する頃には、超伝導コイル内の最大吸収線量は 40 MGy を超えることが予測されており、耐放射線特性に十分配慮した磁石材料を採用する必要がある。

4.3. ビーム分離用大口径超伝導双極磁石 MBXF

4.3.1. 概念設計

最終ビーム収束用磁石システムの中で、KEK が D1 ビーム分離用双極磁石の開発・建設を担当している。Fig. 4-1 に示すように、low-βトリプレット超伝導四極磁石（Q1-Q3）の延長に加え、D2 と Q4 との間にクラブ空洞のためのスペースを新たに確保するため、HL-LHC での D1 から D2 までの距離は、現行 LHC よりも 15 m 短い 70 m になってしまう。このために D1 と D2 には強いキック力が必要となり、磁場長を 26 Tm から 35 Tm に増強させることになった。D1 については、現行 LHC 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）を NbTi 超伝導磁石（5.6 T、7 m、コイル口径 150 mm）にアップグレードする。

D1 磁石の名称は、MBXF と呼ばれる。MBXF の設計に際しては、いくつか制約があった。KEK で実機の性能評価試験を行うことを考えると、縦型試験用クライオスタットのサイズから MBXF の機械長は 7 m 以下に抑える必要があった。したがって直線部の定格磁場を 5~6 T 程度に設定する方針となった。同様に縦型試験用クライオスタットの制約から磁石の外径も 570 mm に収めることが求められた。大口径 150 mm に 6 T 級の双極磁場を発生させることを考えると磁束リターンのための鉄ヨークの幅が不足し、漏れ磁場の影響が心配される。また鉄ヨークから超伝導コイルまでの距離を短くせざるを得ないため、局所的な鉄の磁化飽和による相当量の誤差磁場も予想された。従って鉄の飽和や漏れ磁場を十分考慮した電磁設計が必要だった。また放射線や除熱の観点からは、磁石全体の入熱量 135 W、超伝導コイルへのピーク入熱 2 mW/cm³、3000 fb⁻¹ に相当する吸収線量 25 MGy が設計値として与えられた。

以上を考慮して、次のような設計方針を立てた。

- ・超流動ヘリウム冷却による 1.9 K において、ロードライン上 75 %程度で運転する。
- ・NbTi 超伝導ケーブル単層コイルとすることで、鉄ヨーク幅を最大化できる。またコイル内径面のみからの冷却で効果的に除熱できる。
- ・NbTi 超伝導ケーブルには、除熱特性を確認済みの LHC アーク部主双極磁石用超伝導ケーブル（電気絶縁は自己融着性ポリイミドテープ PIXEO）を採用する。
- ・電磁力支持構造として、カラーの幅を最小化し、鉄の量をできるだけ増やすため、MQXA 磁石や SCFM 磁石と同様に鉄ヨークをキー留めする方式を採用する。
- ・鉄ヨークの外径を 550 mm とすることで KEK で開発した J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導磁石（SCFM）の製作治具を再利用する。
- ・新たに耐放射線 GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）を開発し、超伝導コイル部品に用いる。

Fig. 4-2 に D1 向け MBXF 磁石の断面模式図とコイル端部モデルを示す。また主要な設計パラメータを Table 4-1 にまとめる。1.9 K 冷却において、定格電流 12 kA で 5.60 T の双極磁場を発生する。MQXA 磁石と比較して磁場は下がったものの大口径であるため、MBXF 磁石の磁気エネルギー（約 2.1 MJ）は MQXA 磁石のそれとほぼ等

しく、単位長さあたりでは NbTi 超伝導磁石の中で世界最高レベルである。

以下の節では、MBXF 磁石の設計上、特にユニークな（注意すべき）点について、解説する。

4.3.2. 電磁設計： 鉄の磁化の影響

MBXF 磁石での電磁設計は、基本的にこれまでに述べてきた MQXA 磁石や SCFM 磁石と同様に、コイルを含む二次元断面を最適化した後、端部のコイルブロックを調節して、積分磁場を最小化する手法を用いた。しかし、MBXF 磁石の特徴である『大口径コイル』と『鉄の磁化（飽和）』の影響により、その磁場特性は複雑な振る舞いを示すことになる。

Fig. 4-3 に定格通電（12 kA）時の MBXF 磁石とクライオスタットの磁場分布計算結果（ROXIE2D）を示す。磁束がリターンする領域は 2 T を超えており完全に磁化が飽和していることがわかる。低電流時の分布とは大きく異なることから、ボア内部の磁場特性は強い電流依存性を示すことになる。Fig. 4-4 に b_3 の電流依存性を示す。4 kA までの低電流領域では、コイル断面形状で誤差磁場が決まるため、 b_3 も一定の値を示すことになる（アップランプとダウンランプの違いは超伝導フィラメントの遮蔽電流による影響）。4 kA を超えると次第に鉄ヨークやクライオスタット内部での磁化の飽和分布が複雑に変化するため、電流に依存して b_3 は大きく上下することになる。次に OPERA3D で計算した b_3 の長手方向分布を Fig. 4-5 に示す。飽和の度合いが小さい 3 kA においては、 b_3 のピークはコイル端部に限定されている。しかし、12 kA では飽和する領域が 3 次的に変化するため、磁石直線部の約 2 mu 内側まで b_3 が侵食するようになる。

これらの結果を見てもわかるように、MBXF 磁石の磁場特性は、鉄の飽和の影響が強く反映される。このため多極成分を正確に予測、制御するためには、コイル配置だけでなく、周囲の鉄の形状やその磁化特性、空間占有率（パッキングファクター）などを考慮して設計する必要がある。

詳細は割愛するが、この他にも、次節でも述べるように、大口径コイルでの特徴（デメリット）

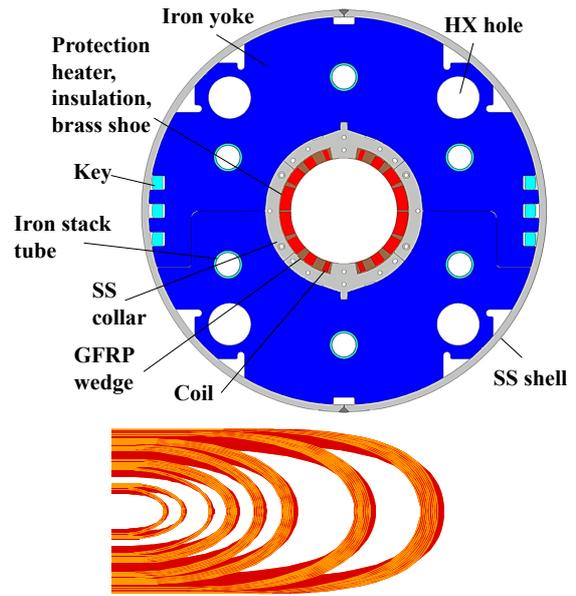


Fig. 4-2 HL-LHC ビーム分離用大口径双極磁石 MBXF の断面模式図とコイル端部モデル。

Table 4-1 MBXF 磁石の主要設計パラメータ

	Series Production	2-m Models
Coil aperture	150 mm	
Field integral	35 Tm	9.5 Tm
Field	5.60 T (Nom.), 6.04 T (Ult.)	
Peak field	6.58 T (Nom.), 7.14 T (Ult.)	
Current	12.1 kA (Nom.), 13.2 kA (Ult.)	
Operating temperature	1.9 K	
Field quality	$<10^{-4}$ wrt B_z , ($R_{ref}=50\text{mm}$)	
Conductor	NbTi (LHC-MB outer cable)	
Number of Turns	44 (4+8+13+19)	
Load line ratio	76.5 % (Nom.), 83.1 % (Ult.)	
Differential inductance	4.0 mH/m (Nom.)	
Lorentz force ΣF_x & ΣF_y	1.53 & -0.64 MN/m	
Stored energy	340 kJ/m	
Magnetic Length	6.26 m	1.67 m
Coil mech. L	6.58 m	2.0 m
Magnet mech. L	6.73 m	2.15 m
Heat load	135 W, 2 mW/cm ³	
Radiation Resistance	25 MGy	

である電磁力の積み重ねによるコイルの変位や、コイル断面の縦楕円変形の影響も考慮した設計が必要となる。

4.3.3. 機械構造： コイル予備応力

MBXFは大口径であるためターン数が44ターンにも達する。定格磁場は5.6 Tとはいえ、1本1本の超伝導ケーブルに印加される電磁力がそのまま積み重なり、コイル全体の電磁力は甚大になる。しかも単層コイルであるため、励磁の際に磁極からMedian Planeに向かって発生する圧縮応力は非常に大きい（コイル断面も変位し、磁場特性にも影響があるほどである）。このため、組み立て時にコイルをオーバーサイズにすることで十分な予備圧縮応力を与え、冷却や励磁においても常にコイルがカラーから機械的な拘束を受ける状態を維持することが重要になる。ただし、組み立て時に十分な予備圧縮応力を与えるため、キー留めする鉄ヨークの弾性変形も無視できなくなる。同様の機械支持方式を採用したMQXA磁石と同様に、MBXF磁石の断面にも縦楕円変形が生じており、コイル内周面の半径測定によると、縦に+0.1 mm、横に-0.1 mm変形していることがわかっている。

Fig. 4-6は、ANSYSによる磁極(Pole)とMedian Plane(MP)と接するコイルの圧縮応力計算結果を示す。モデル磁石1号機MBXFS1では組み立て時のコイル予備応力が小さかったため、冷却、励磁により磁極でのコイル圧縮応力が完全に抜けてしまった。このため、機械支持が不安定となり、十分なトレーニングクエンチ性能が得られなかった。この反省からモデル磁石2号機MBXFS2では磁石組み立て後の予備圧縮応力を増加させ、冷却、励磁後にも安定して機械支持されるように改善を図った。この改善は、後述するように、試験結果に大きな違いとなって表れた。

カラーに用いられるステンレス材（~200 GPa）と比較して、超伝導コイル（NbTi/Cu ケーブルとポリイミドテープ）のヤング率はその1/10程度と“柔らかい”。磁石組み立てでは、カラーにより正確に磁極の位置決めを行い、コイルを“バネ”

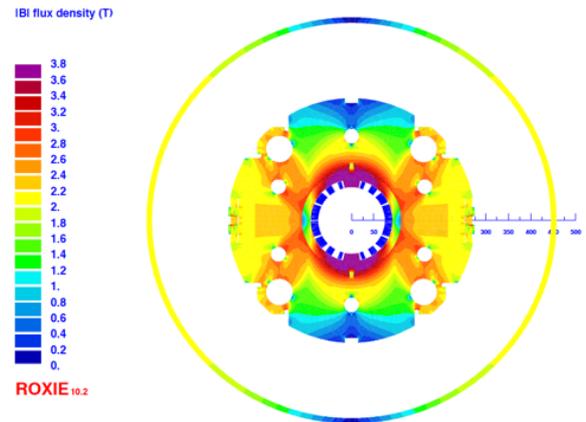


Fig. 4-3 定格通電時に鉄の磁化が飽和の様子。外部にあるクライオスタットまで磁束が漏れていることがわかる。

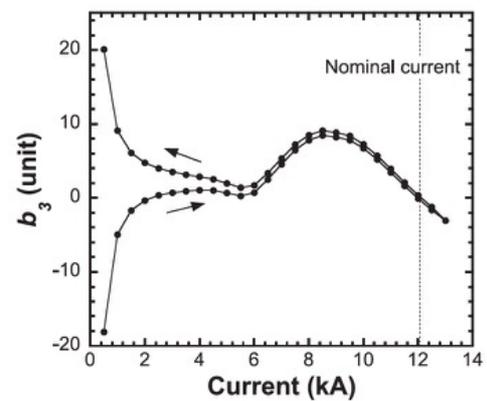


Fig. 4-4 ROXIE2Dによる b_3 の電流依存性。4 kAを超えると鉄ヨークの局所的な磁化の影響により b_3 が大きく上下する。

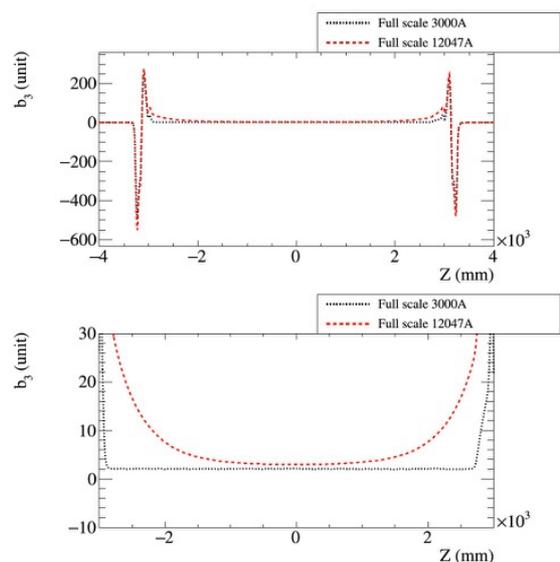


Fig. 4-5 OPERA3Dによる b_3 の長手方向分布。下図は磁石中心付近の拡大図。

として閉空間に押し込める。コイルのオーバーサイズ量を正確に予測、制御することで必要な予備圧縮応力を得ることになる。実際に測定したケーブルスタック（超伝導ケーブルを 22 層重ねてキュアしたもの）の圧縮応力とケーブルサイズ（厚さ）の関係を Fig. 4-7 に示す。ラザフォードケーブルと電気絶縁テープから構成される試料は、非線形性を示し、また载荷と除荷を繰り返すと大きなヒステリシスを示す。高い圧縮応力を経験することで、クリープによりケーブルサイズが徐々に小さくなることもわかる。このような複雑な振る舞いを実験的に検証した上で、MBXF コイルに必要なオーバーサイズ量及びウェッジ寸法を決定した。

直線部だけでなく、磁石端部における超伝導コイルの機械支持も重要である。Fig. 4-8 に励磁試験後に分解したモデル磁石 1 号機のコイル端部の様子を示す。コイル端部の機械支持が不十分だったため、電磁力によりコイルブロックごと 3 mm 以上もボア側に変位している。この反省からモデル磁石 2 号機以降では、コイル端部の予備圧縮応力を増加させるため、GFRP 製エンドスペーサーの周方向寸法をオーバーサイズさせている。

4.3.4. 放射線対策： 除熱性能及び耐放射線性能

4.2 節でも述べたように、HL-LHC におけるピークルミノシティは $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ （現行 LHC の設計値の 5 倍）、積分ルミノシティは 3000 fb^{-1} （現行 LHC の設計値の 10 倍）となる見込みである。前者は超伝導線材へのビーム入熱量、後者は超伝導磁石材料への吸収線量と比例することになる。ビーム衝突点からの二次放射線の影響を低減するため、ビームチューブ内部にタングステンシールドが導入されるが、それでも MBXF コイルでのピーク入熱は 2 mW/cm^3 、吸収線量として 25 MGy が予測される。MBXF 磁石には、放射線対策を考慮した設計が必要となる。

超伝導コイルの温度上昇を防ぐため、放射線入熱は超流動ヘリウムにより速やかに除熱される必要がある。超流動ヘリウム熱交換器 (1.9 K) をできるだけ熱源に近づけるため、磁石内部に直接

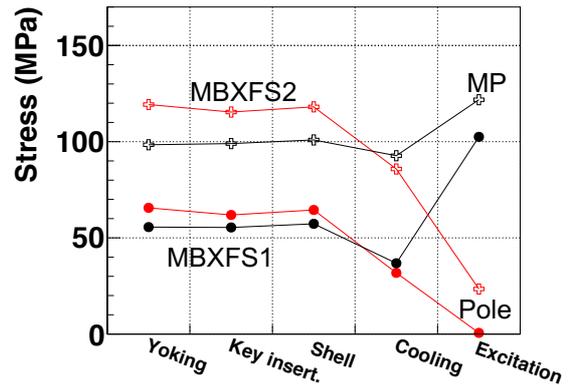


Fig. 4-6 ANSYS による MBXF コイルの磁極 (Pole) と Median Plane (MP) での応力計算結果。モデル磁石 1 号機 MBXFS1 と 2 号機 MBXFS2 の比較。

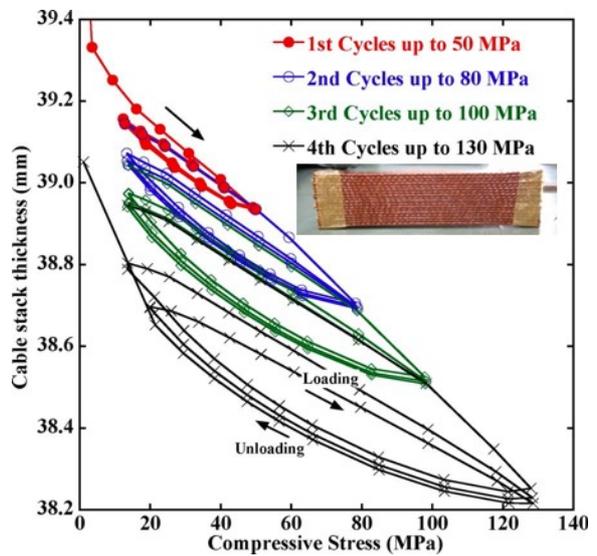


Fig. 4-7 ケーブルスタック (22 層) の圧縮応力とケーブルサイズの関係。



Fig. 4-8 励磁試験後のモデル 1 号機のコイル端部。コイルブロックが 3 mm 変位している様子がわかる。

2本配置する設計になっている (Fig. 4-2 参照)。また超伝導コイルから熱交換器に至る冷却経路は、十分なコンダクタンスを得るために一定の割合で空隙であることが求められる。例えば MBXF 磁石の場合、ステンレスカラーや鉄ヨークは薄板を積層した構造だが、占有率 (パッキングファクター) をそれぞれ 96% 及び 98% に制御することが求められた。カラーや鉄ヨークはファイブランピング (精密打ち抜き) 法により製作するが、金型を改良して 0.2 mm 厚さのエンボス加工を同時に施すことで上記の占有率を実現した。なお、鉄ヨークの占有率は磁場特性に強く影響するため、ヨーク板厚と磁石全長を含めた管理、制御が必要となる。

Fig. 4-9 は LHC 超伝導磁石に採用された超伝導ケーブル毎の除熱特性を示す。ケーブル内部をヒーターで発熱し、周囲を超流動ヘリウムで 1.9 K に冷却したときの内外の温度差を示している。MBXF 磁石に採用した LHC 主偏向磁石 (LHC MB) 用超伝導ケーブルは、 2 mW/cm^3 程度の入熱ではケーブル内外でほとんど温度差は発生しないことがわかる。さらに MBXF 磁石は単層コイルを採用したので、全ての超伝導ケーブルは内周面 (ボア側) で常に大量の超流動ヘリウムにより冷却されることになる。

従来の超伝導コイルには電気絶縁と機械強度を合わせ持つガラス繊維強化プラスチック (GFRP) が頻繁に使用されてきた。しかし通常の GFRP はエポキシ樹脂とホウ素を含む E ガラスを主成分としているため、条件によっては数 MGy 程度の線量や中性子で劣化してしまうことが知られていた。このため、過酷な放射線環境下で運転される HL-LHC 超伝導磁石への応用を目指して、2011 年から数種類の耐放射線 GFRP の開発を行ってきた。中でもビスマレイミドトリアジン樹脂と S ガラス繊維 (ホウ素を含まない) からできた BT-GFRP は優れた性能を示しており、Fig. 4-10 に示すように、 γ 線を常温で 100 MGy まで照射した場合でも、3 点曲げ強度に大きな変化が見られないことを確認している。この BT-GFRP が MBXF 向け超伝導コイル部品 (ウェッ

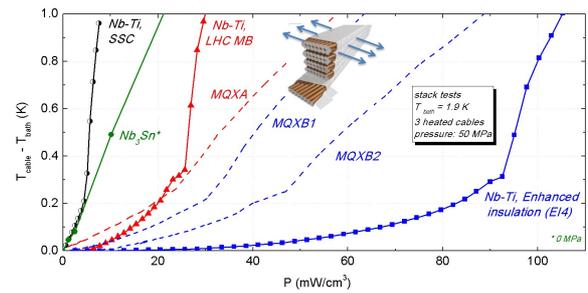


Fig. 4-9 超流動ヘリウム 1.9 K による冷却下での超伝導ケーブルの除熱特性。電気絶縁により特性が大きく異なることがわかる。

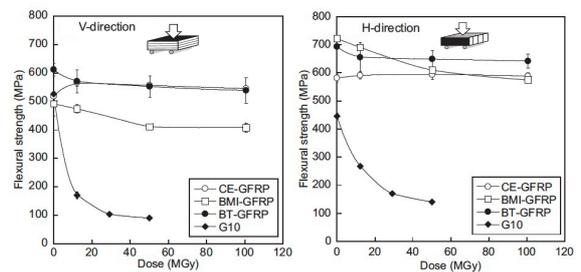


Fig. 4-10 γ 線照射した耐放射線 GFRP の 3 点曲げ強度。

ジヤエンドエスペーサーなど) に使用されている。

4.4. MBXF 磁石の励磁試験結果

2m 長モデル磁石 3 台 (MBXFS1~3) の所内試作を経て、2019 年から 7m 長実機長プロトタイプ磁石 (MBXFP1) の製造 (日立製作所) を開始した。Fig. 4-11 にモデル磁石とプロトタイプ磁石のトレーニングクエンチの結果を示す。モデル磁石 MBXFS1 の結果を見ると、クエンチ電流は不安定で、目標電流 ($I_{ultimate}$) まで到達できなかった。Fig. 4-12 に、ステンレスカラー (磁極) に組み込んだ歪ゲージにより測定した、励磁中のコイル圧縮応力の変化を示す。横軸は通電電流の自乗であり、コイルにかかる電磁力と比例している。先述したように、MBXFS1 では組み立て時での予備圧縮応力が 65 MPa と十分ではなかったため、8 kA 程度 (60 kA^2) でコイルの圧縮応力が変化しなくなる、つまり磁極とコイルが離れてしまっていることがわかる。このため MBXFS1 磁石は分解再組み立てを行い、コイルシムを挿入することで予備応力を増加させることになった。改造した

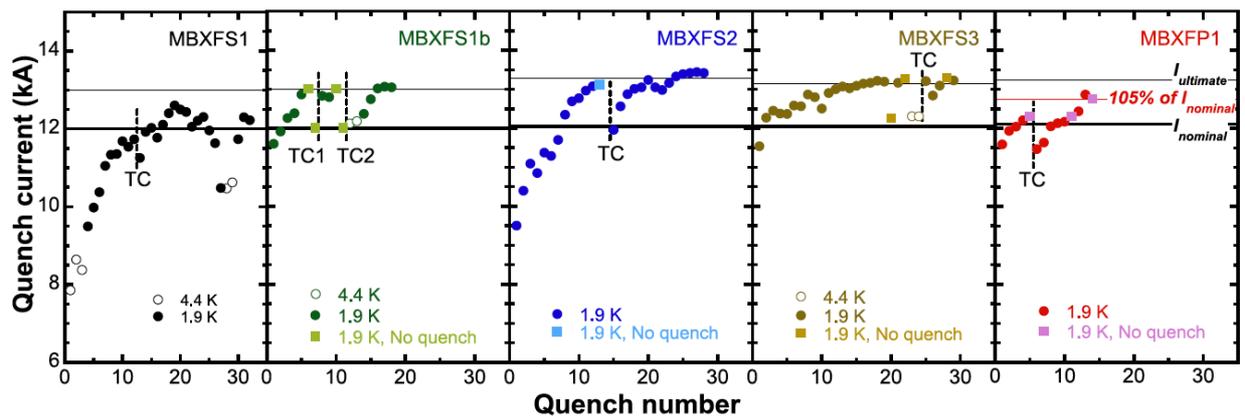


Fig. 4-11 2m 長モデル磁石 1~3 号機 (MBXFS1~3) と実機長プロトタイプ (MBXFP1) のトレーニングクエンチの結果。MBXFS1b は、MBXFS1 を分解再組み立てたもの。

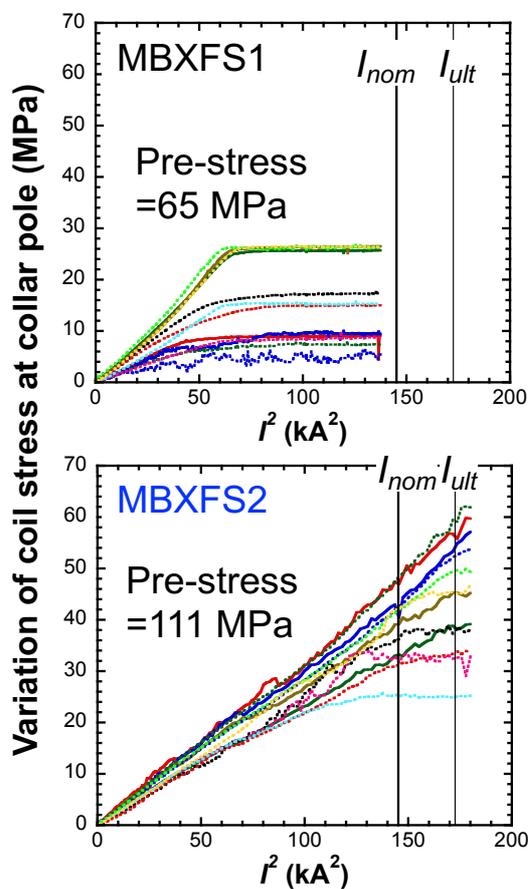


Fig. 4-12 励磁中の磁極付近のコイル圧縮応力の変化

MBXFS1b 磁石では、Fig. 4-11 に示すように明らかにトレーニングクエンチ特性が向上し、目標電流に到達することができた。この結果を踏まえてコイル設計をやり直した MBXFS2 磁石では、組み立て時の予備応力は 111 MPa に増加され、目標電流到達後もまだ圧縮応力が残っていること

がわかる (Fig. 4-12)。良好なトレーニングクエンチ特性を確認することができた。以降の磁石では組み立て時の予備応力 115 MPa を目標として、超伝導コイルのオーバーサイズを管理している。

Table 4-2 にプロトタイプ磁石の定格電流 12 kA での磁場測定結果を示す。OPERA3D による計算結果も併せて示す。4.3.2 節でも述べたように、6 極 (b_3) 成分は鉄の飽和の影響を強く受ける。7m 長磁石での磁場測定は今回が初めてであり、3 次元的な鉄の飽和の影響をどこまで正確に計算できているのか、OPERA3D の計算精度を検証することが非常に重要だった。結果を見ると、磁石中心において計算は 3.6 unit、積分磁場では 6.1 unit の過大評価になっている。Fig. 4-5 下図でも見られる磁石端部の大きな b_3 が磁石中心に向かって侵食する影響を計算で正確に予測することが困難であることがわかる。一方 10 極 (b_7) 成分を見ると、 b_3 より小さいものの 2 unit 弱の不一致が残っていた。14 極 (b_7) 以上の多極成分では、すでに十分な精度での一致が確認できる。実機磁石製造にあたっては、MBXF 磁石の b_3 と b_5 を 1 unit 以下に抑える要請があったため、計算との不一致をキャンセルするように目標値を設定し、コイル断面を再設計した。

MBXF 実機磁石の製造は 2021 年 11 月から開始され 2022 年秋には最初の冷却励磁試験を実施する計画である。

Table 4-2 MBXFP1 磁石の磁場測定結果と OPERA3D 計算の比較。単位は unit。

	Magnet Center		Integral	
	Cal.	Meas.	Cal.	Meas.
b_3	-4.92	-8.51	-6.54	-12.66
b_5	4.88	6.68	4.77	6.45
b_7	0.75	0.98	0.30	0.50
b_9	0.98	1.35	0.46	0.75
b_{11}	0.04	-0.06	-0.17	-0.24
b_{13}	-0.78	-1.03	-0.80	-0.96
b_{15}	-1.33	-1.52	-1.30	-1.38

5. まとめ

以上、KEKにおいてこれまでに開発した3種類の加速器用超伝導磁石についてケーススタディを行った。なるべく分かりやすい記述を心がけたつもりだが、一部に説明が不十分な項目があることも自覚している。どうか、ご容赦いただきたい。

KEKで運用する加速器用超伝導磁石は、基本的に所内での設計、試作、性能評価を経て、いわゆる”Build to print”による契約でメーカーが実機製造を担当するケースがほとんどである。逆に市場規模や要求される性能の厳しさ、特殊さのため、自社で設計開発製造を行っているメーカーは(著者の知る限り)存在しない。将来『失われた技術』とならないためにも、今後もKEKとして超伝導磁石技術を維持、発展させていくことが非常に重要となる。そのためには、新しいプロジェクトで研究者や技術者がうまく世代交代していくことが望まれる。

参考文献

[1] Y. Ajima et al., "The MQXA Quadrupoles for the LHC Low-Beta Insertions", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol A 550, 499-513, 2005

[2] 寺島昭男ら, "LHC ビーム衝突点用・超伝導四極磁石の基礎開発", KEK Report 2001-23, 2002

[3] S. Russenschuck, "ROXIE: routine for the optimization of magnet x-sections, inverse field

calculation and coil end design," CERN 99-01 (1999).

[4] T. Nakamoto et. al., "Design of Superconducting Combined Function Magnets at the 50 GeV Proton Beam Line for the J-PARC Neutrino Experiment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, 616-619, 2004.

[5] T. Nakamoto et. al., "Development of a Prototype of Superconducting Combined Function Magnet for the 50 GeV Proton Beam Line for the J-PARC Neutrino Experiment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, 1144-1147, 2005.

[6] T. Okamura, "Test Results of Superconducting Magnets for the J-PARC Neutrino beam Line", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, 1125-1130, 2009.

[7] T. Ogitsu et al., "Status of superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, 1081-1086 2009.

[8] K. Sasaki et al., "Commissioning results of superconducting magnet system for the neutrino beam line," and T. Nakamoto et al., "Construction of superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, 242-245, 2010.

[9] E. Todesco et al., "A First Baseline for the Magnets in the High Luminosity LHC Insertion Regions", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 24, NO. 3, JUNE 2014, 4003305.

[10] T. Nakamoto et al., "Model Magnet Development of D1 Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, Issue 3, 2015, 4000505.

[11] M. Sugano et al., "Fabrication and Test Results of the First 2 m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 27, No. 4, 2017, 4002409.

[12] M. Sugano et al., "Training Performance with Increased Coil Pre-stress of the 2-m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 28, No.3, 2018, 4000805.

[13] K. Suzuki et al., "Magnetic Field Design of a Full-scale Prototype of the HL-LHC Beam Separation Dipole with Geometrical and Iron-saturation Corrections", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 30, No.4, 2020, 4002706.

- [14] K. Suzuki et al., “Magnetic Measurements of a Full-Scale Prototype of the HL-LHC Beam Separation Dipole”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 32, NO. 6, SEPTEMBER 2022, 9000407.
- [15] M. Sugano et al., “Test Result of a Full-scale Prototype of Beam Separation Dipole Magnet for the High-Luminosity LHC Upgrade”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 32, NO. 6, SEPTEMBER 2022, 4003407.