

LHC ビーム最終収束超伝導四極磁石の開発とコミッションング

高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター

中本 建志 佐々木 憲一

tatsushi.nakamoto@kek.jp ken-ichi.sasaki@kek.jp

2008 年 8 月 22 日

1. はじめに

CERN LHC 加速器は、陽子を世界最高エネルギー $7+7\text{TeV}$ で衝突させ、ピークルミノシティが $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ にまで達する世界最高水準の加速器である。LHC は旧 LEP 加速器用地下トンネル(深さ約 100m) を再利用して建設されているが、陽子を 7TeV にまで加速するには、 8T を越える超伝導磁石が必要不可欠となる。加速器の周長は 27km にもなるため、おもだったものだけでも 1232 台の主双極磁石(長さ 15m) ならびに 386 台の主四極磁石(長さ 3.5m) が設置される。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 5T の磁場を発生するものだった(SSC では 6.6T だったが、計画自体がキャンセルされた)。一方、LHC では磁場を 8T 以上に飛躍的に増加させる必要があった。検討の結果、NbTi 超伝導線の性能を極限まで発揮させるため、超流動ヘリウム(He II)により 1.9K まで冷却する方法を採用した。つまり LHC は 8T 級の高磁場 + 高精度超伝導磁石の量産のみならず、周長 27km にもわたって、 34000 トンを超える加速器磁石を 1.9K まで冷却するという、超伝導・低温技術の観点からは途方もない大型プロジェクトといえる。

日本政府は 1995 年に LHC 計画に参加協力することを決定した。それに伴い、加速器建設や物理実験に大学や研究所、また企業などが様々な形で参加、貢献してきた。KEK においても、LHC にある四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。図 1 に LHC 加速器全体、また図 2 に Low-Beta Insertion System の概略図を示す。Low-Beta Insertion System の Inner Triplet(Q1, Q2, Q3)を構成するビーム最終収束四極磁石は、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)をわれわれ 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。すべ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、磁石の挿入組立を行った。この他に、超伝導磁石システムに超流動ヘリウムや励磁用バスラインを供給するための容器(DFBX)は LBNL が開発を担当した。このように Low-Beta Insertion System の開発は、CERN, Fermilab(と LBNL), KEK の三極が力を一つにした国際協力プロジェクトといえる。

KEK での MQXA 磁石開発は、超伝導低温工学センターを中心として、機械工学センターや加速器研究施設が参加して、1996 年からスタートした。磁石の設計、 1m モデル磁石の開発、性能評価はすべて KEK の所内開発で進められた。これらの成果を基に、メーカー(東芝)において 1999

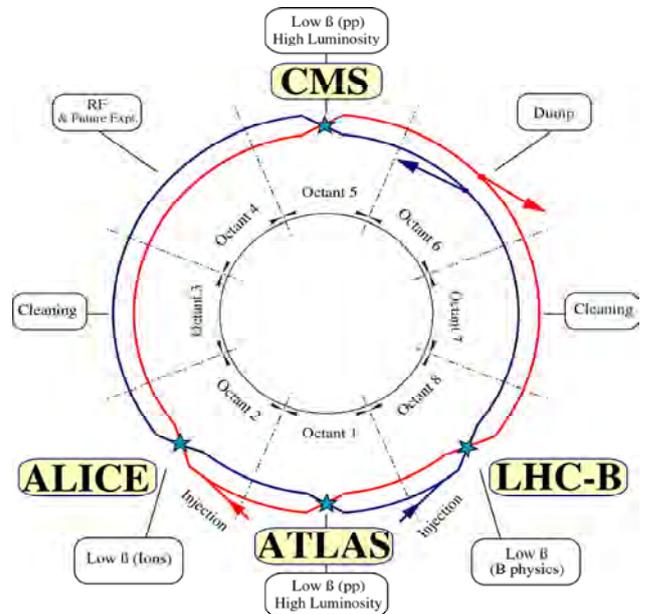


図 1 LHC の概略図

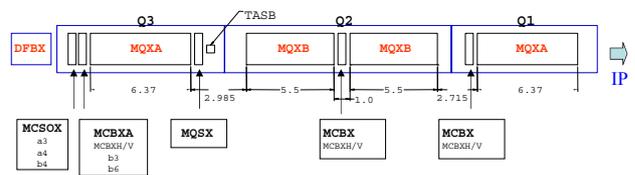


図 2 Low-Beta Insertion System の概略図

から 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。製造された実機磁石は, 順次 KEK において冷却, 励磁試験を行った。2004 年までにスベア機を含む全 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, クライオスタットに組み込まれた後, 最終的に CERN に輸送された。2006 年からは LHC トンネルへの組み込みが始まり, 2007 年からはハードウェアコミッシングが始まった。

2006 年 10 月から 2007 年 9 月にかけて, コミッシングに参加するために筆者(中本)は CERN に常駐した。しかし残念ながら, 4 章で述べるように多くのトラブルが発生したため, MQXA 磁石の励磁が始まる前に帰国することになってしまった。しかし, 入れ替わりに佐々木が MQXA の最初の励磁に参加することができた。

本稿では, MQXA 磁石開発の経緯や概要, 磁石性能のまとめ, 現地でのコミッシングの様子などについて紹介する。先に述べた理由で, 中本が 2~4 章の磁石開発から初期のコミッシングまでを, 佐々木が 5 章の現地での励磁成功について報告する。

なお, MQXA 磁石の設計, 製作, 磁石性能の詳細については, 文献[1]に報告されている。

2. 1m モデル磁石開発

1m モデル磁石開発は KEK の所内開発で進められ, 設計製作の詳細は文献[2]に報告されている。本稿では概要を紹介するにとどめる。

図 3 に磁石の断面図, 主要設計パラメータを表 1 に示す。

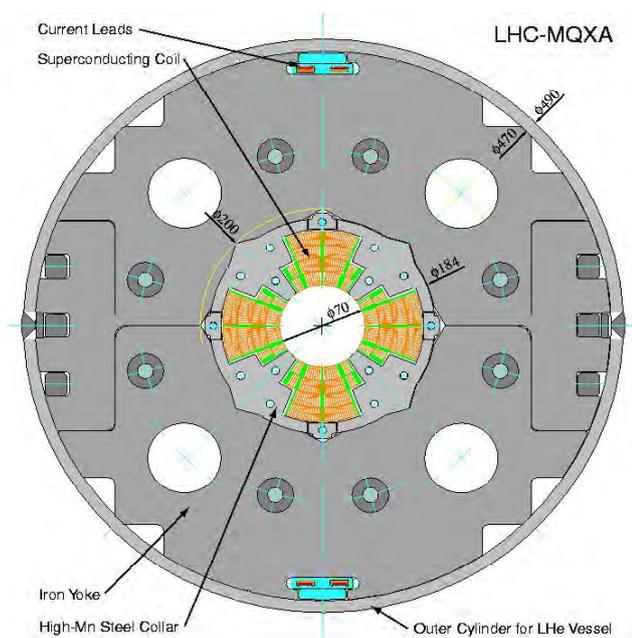


図 3 MQXA 磁石の断面図

この磁石に求められたおもな仕様は以下の通り。

- 1 He II 冷却下 1.9K において, コイル内径 70mm で定格 215 T/m の四極磁場勾配を発生すること。
- 2 高調波成分の誤差磁場を, 参照半径 17mm で 10^{-4} 以下に抑えること。
- 3 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。

大口径で高磁場勾配を発生するため, コイルのピーク磁場は 8.6 T に達することになる。これらの条件は, LHC の超伝導磁石の中でももっとも厳しいものだった。KEK の所内開発は, 超伝導低温工学センターの新富, 山本, 土屋を中心に, 1996 年から開始された。ここでは, SSC, LHC 用超伝導双極磁石モデル開発や, KEK の 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, ノウハウが注ぎ込まれた。

この MQXA 磁石の設計上の特徴は,

- (1) 4 層コイル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。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。

表 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)	1.19 (radial) 1.37 (azimuthal)

よ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り数百トンにも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。

常伝導磁石においては、導体は起磁力のみを担当し、ピームポア内の磁場分布は鋼板(磁極)の形状、電磁特性で決定される。一方、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、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 $50\mu\text{m}$ 程度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。

NbTi超伝導線(ケーブル)に求められるものは、第一義的にはもちろん電気的特性だが、日本のメーカーは世界的にもトップレベルにあり、仕様を充分満足する製品を安定して供給して頂くことができた。一方で、自身が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応力(プリストレス)や磁場精度に影響してくる。このため、約1.4mm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。なお、ケーブル絶縁には、ポリミドテープを2層にラップしたが、最外層はギャップを設けて、超流動ヘリウムが透過してコイルから除熱できるように工夫した。

常温での磁石組み立て段階で、超伝導コイルには適切なプリストレス(具体的には、コイル周方向で70MPa程度)が掛けられる。もし磁石を冷却、通電した際に、プリストレスが不足していると、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。また設計した電流分布からコイルの形状や位置がずれることで誤差磁場が誘発されることになる。一方で、過剰なプリストレスは、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、プリストレス制御(=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)際にはほとんどプリストレスは与えられず、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パネに見立て、スロットにキーを挿入することで、コイルにプリストレス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1.9K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。

設計の段階では、磁場分布を決定する最適な超伝導コイルの形状を求め、並行して機械構造的には、四極磁石対称性を保ちながら(図3を見ると 45° 対称性が保たれている様子が分かる)各部品の安全強度を越えない様な注意深い設計がなされた。ANSYS構造計算により、たとえば、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2mm,ヨーク:厚さ6mm)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。MQXA磁石設計では、その他にも、クエンチ保護、電気絶縁、圧力容器コード、溶接方法など、様々な観点から設計検討が行われたが、ここでは説明を割愛する。

1mモデル磁石開発はKEK第3低温棟で進められた。開発の肝となる製作治具、部品などの製図は、もちろんすべて開発グループで行った。磁石製作は、(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(インナーおよびアウトターコイル巻き線、図4)、



図4 1mモデル磁石開発の様子：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時間で反応させる成形(キュアリング)、(3)インナーおよびアウトターコイルの一体化(第二次キュアリング)、(4)1/4コイルを4個とも縦に立てた状態で電気絶縁シートを取付け、カラーを油圧プレスでピン留め装着(カラーリング、図5)、



図5 1mモデル磁石開発の様子：カラーリング

(5) 鉄ヨークでカラーコイルを上下から挟み込んだ状態で油圧プレスし、キーの挿入(ヨーキング, 図6),



図6 1mモデル磁石開発の様子：ヨーキング

(6)ステンレスシールの溶接,(7)リード部のハンダ接続, という流れで進む。これらすべての製作工程を, 実際に自分たちの手を動かして行い, 重要なポイントは入念にチェックし, 問題が発生すればその一つ一つを解決していった。例を挙げると, 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もっと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($\sim 100\text{MPa}$)を掛けて機械特性を測定し, コイル毎の再現性や傾向を把握した。また, 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 $125\mu\text{m}$)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(組立時に過剰なプリストレスとなりコイルを傷めてしまう)防止などに, 大変気を遣った。

なお, モデル磁石には, 各種センサー(クエンチ場所同定用の電圧タップ, コイルプリストレス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挙動を観察した。1mモデル磁石は全部で5台製作し, KEKの縦型超流動ヘリウム冷却試験用クライオスタットで 1.9K 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な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, 四極の他に, 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。また, この3号機の製作には, フルスケールプロトタイプおよび実機量産を担当するメーカー(東芝)の技術者が実際に参加し, KEKから技術移転を行った。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, 高精密打ち抜き金型などがKEKから支給, 貸与された。

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, メーカーでのプロトタイプ製作を開始した。プロトタイプでは, コイル直線部の長手方向長さのみを実機相当まで延長しているが, 直線部断面や両端部の形状はそのままである。プロトタイプでは, コイルエンドでのエンドスペーサー部品設計に不具合が見つかり, 励磁試験中にコイル層間で電気ショートが発生するトラブルに見舞われた。しかし, 適切に設計改善を行い, 実機では同様のトラブルは発生していない。なお, 次章で述べる実機製造に際しては, 1mモデルおよびプロトタイプで系統的に現れた12極成分を改善するため, インナーコイルのポール部に調整用シムを追加した。この結果, 実機では12極成分を系統的に改善することができた。

3. MXQA 実機磁石の量産

MQXA 実機磁石は東芝京浜事業所で製造されたが, このために工場内に新しく専用製造ルームが建設された。KEKにおける1mモデル磁石開発の成果を継承しつつも, 長尺化(実機磁石は7m余り)のために, 半自動巻き線機, カラーリング治具, ヨーキング治具などが東芝で開発された。

実機長プロトタイプ開発による製作技術のバグ出し、確認を経て、実機製造は2001年6月から始まり2004年6月まで続けられた。多少のトラブルはあったが、生産はほぼ計画通りのペースで進めることができ、スベアを含め20台が完成した。工場で完成した実機磁石は、順次 KEK に送り、性能評価試験を行った。なお、CERN とは当初、2台のスベアを含む18台の実機を納入することで合意していた。しかし、製造と試験が比較的順調に進んだため、予算やスケジュールに若干余裕を持たせることに成功し、最終的に20台の実機磁石を製造し、うち19台を冷却試験した。

KEK では、実機試験の準備として、超流動ヘリウム冷却試験用9m縦型クライオスタットを新たに製作した。またクライオスタットを地下に格納し、磁石の起立や吊り替え作業が可能な揚程を有する新しい実験棟(第4低温棟)も建設した。一方でコストを抑えるため、TRISTAN AMY 実験で使用されていたヘリウム冷凍機を第4低温棟に移設し、MQXA 試験専用の冷凍機として再整備した。このようにして、実機磁石試験のための環境を整えた。

KEK での性能評価試験は、大別すると1.9K 縦型クライオスタットでの冷却励磁試験(図7)と、その前後に行う常温試験の2種類に分けられる。常温試験では、微小電流(1~10A)を通电して磁場測定を行い、冷却前後での主磁



図7 MQXA 実機磁石の励磁試験準備
クライオスタットに縦吊りした磁石を挿入している。

場や高調波成分の異常や変化をチェックした。また試験ベンチに設置した磁石を光学測量し、磁場性能に影響する磁石の形状(直線性、ねじれ、たわみ)を確認した。

1.9K での冷却励磁試験は、(1)磁場勾配230T/m までトレーニングクエンチ、(2)定格磁場勾配215T/m での全エネルギーダンプ試験(磁気エネルギーをすべて磁石内部で吸収させる)、(3)磁場測定、(4)220T/m までの最終確認励磁などといった試験内容だった。ちなみに、Fermilab のMQXB 実機磁石についても同様の試験が行われた。磁石1台を試験するには、循環精製運転から1.9K までの冷却、そして励磁試験のために約2~3週間必要だった。この間は24時間運転となり、1日2交代制で、2名のシフト(励磁試験担当と冷凍機運転担当)を組んで試験を行った。もともと超伝導低温工学センターのスタッフ数は少ないため、シフト当番に当たる頻度は高く、苦労が多かった。常温への昇温や磁石吊り替え作業なども考慮すると、磁石1台当り冷却試験に約1.5ヶ月必要だった。しかも、冷却試験の前後に常温試験も行っていたため2001年春からの3年間は、明けても暮れてもMQXA 磁石の試験を行っていたことになる。

試験中、様々なトラブルも経験した。図8に、冷却試験を行ったMQXA 磁石19台すべ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回程程度のクエンチで定格電流を超えており、その後も230T/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230T/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230T/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。冷却中にも常温部から磁場測定用プローブを磁石ボア内に挿入できるように、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付けら

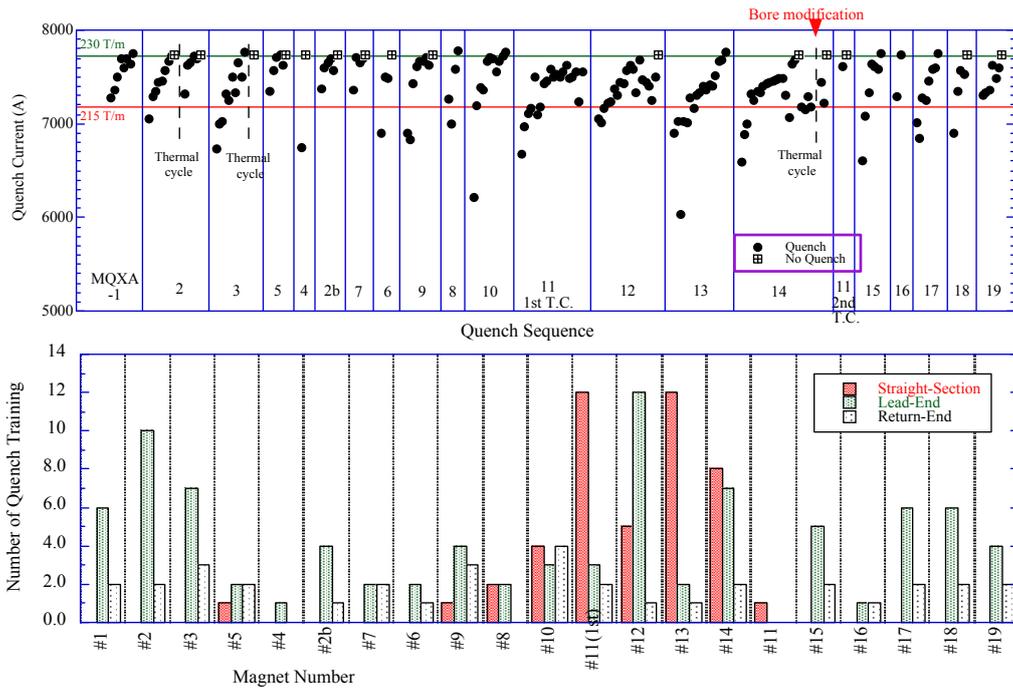


図8 MQXA 実機磁石のトレーニングクエンチ：各磁石毎のクエンチ電流（上）と発生場所（下）

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たわみ、接触してしまった。このため、常温の外部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。

その他にも、2号機において、磁石ボア内にフラップ状に突き出た電気絶縁シートが、クエンチ発生時の突発的なヘリウムガスにより引き裂かれてしまうトラブルにも見舞われた。フラップに等間隔で孔を開けることで、コイルとウォームボアの狭い空間からヘリウムガスの逃げ道を作る工夫をした。その場合でも、必要な耐電圧性能を保持することは実際に確認した。本施工後は、電気絶縁シートが破れるトラブルは起きていない。

MQXA 磁石の磁場測定では、コイル半径21mm、長さ25mmと600mm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。表2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台にわたって大変よく揃っており、 10^{-4} 以内の再現性を示していることが分かる。図9に、各磁石の参照半径17mm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 と normal 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。高調波成分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、さらに10000倍して表記されている。まず先に説明した12極および20極成分について見ると、1mモデル磁石からの改良の成果がよく現れており、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ないものの、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0.1mm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。

表2 MQXA 磁石の磁場特性
直線部の磁場勾配および磁場長

Current (A)	Field Gradient (T/m)		Magnetic Length (m)	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
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

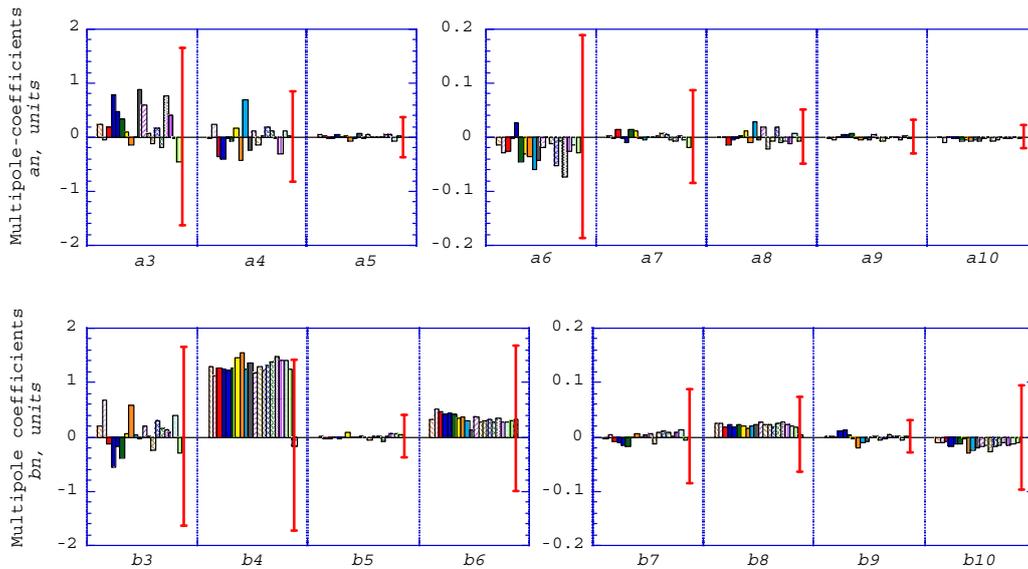


図9 MQXA 磁石の磁場特性：高調波成分

4. コミッショニングでのトラブル

MQXA 磁石は、高エネ研での励磁試験に合格すると東芝へ一旦返送され、出荷準備を経て Fermilab へ輸送された。Fermilab でのクライオスタット組立後、磁石はようやく CERN に輸送され、2006 年からは、いよいよ LHC トンネルへの設置作業が始まった。LHC トンネル内に設置された、Inner Triplet クライオスタットの写真を図 10 に示す。

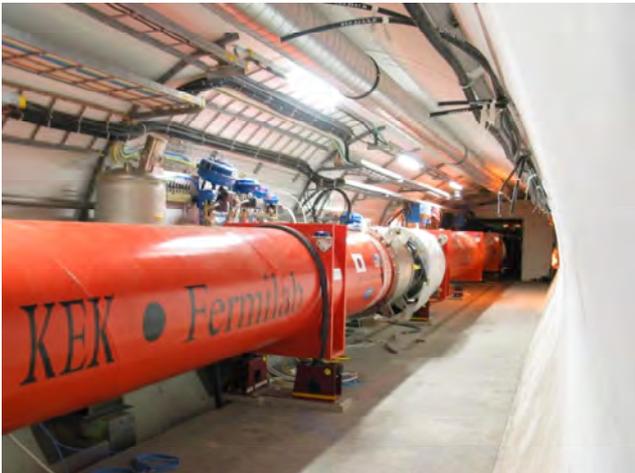


図 10 LHC トンネルに設置された Inner Triplet
写真右奥がビーム衝突点

LHC 加速器は、8 セクターから構成されており、磁石の冷却、励磁の際は、それぞれのセクターが独立に運転される。2006 年 11 月末からは、セクター 7-8 に含まれるすべての超伝導磁石に対して、LHC 加速器としても初めてのハードウェアコミッショニングが始まった。通常、超伝導磁石や冷却配管は、溶接箇所の安全性を確認するため、初めての冷却の前に必ず圧力試験を行う。しかし、その圧力試

験において、8L(LHC 中心から見て Point 8 : LHC-B 実験の左側)に設置された Inner Triplet クライオスタット内の超流動ヘリウム熱交換器の一部が座屈、破断するトラブルが発生した。Fermilab において純銅製コルゲート管の端部にステンレスフランジをロウ付けした際に、接合部以外の広い範囲がバーナーで炙られてアニールされてしまい、純銅の機械強度が急激に低下したことが主な原因だった。Fermilab と CERN は協力して設計を見直し、強度を増すために厚さやピッチを変更した純銅製コルゲート管を新規製作し、またフランジとの接合には電子ビーム溶接とロウ付けを組み合わせる方法を採用して、新しくすべての熱交換器を作り直した。事前の単独での圧力試験では、熱交換器の外側から水圧を掛けて、八十数気圧まで破壊されないことを確認した。トラブル発生時点で既に LHC トンネル内への Inner Triplet の設置は完了していたため、新しい熱交換器への交換作業はすべてトンネル内で行った。交換作業は無事終了し、全体のコミッショニングスケジュールにも大きな遅れが出ないだろうと、この時点では予想された。

ところが、2007 年 3 月末に 5L(LHC 中心から見て Point 5 : CMS 実験の左側)の Inner Triplet において、熱交換器を交換してから初めての圧力試験を行ったところ、20 気圧まで加圧した際に、大きな破裂音とともに Q1 と Q2 の接続ペローズが破断してしまった。事故直後の観察では、圧力上昇とともに磁石に長手方向へ荷重が掛かり、クライオスタットから磁石を支持する『スパイダー』と呼ばれる GFRP 製部品が耐えきれず破断され、最終的に磁石が 10cm 以上も動いたためと判った。ただし、上記の熱交換器には異常はなかった。その後の詳細な調査の結果、磁石に接続された冷却配管と超流動ヘリウム熱交換器容器の構

造上, もともと磁石の前後方向への荷重は不平衡で, 定格の圧力試験を行うとスパイダーは確実に破断することが判明した。このことは Fermilab の設計に本質的な問題があったことを意味し, 関係者に大きなショックを与えた。Fermilab では Director General が自ら陣頭指揮を執って, 問題の解決のためにあらゆる努力を惜しまないことを宣言し, 実行した。Fermilab のホームページではトラブルの責任を認め, 調査結果はもちろんのこと, 改修案の説明やその後の経過についても, きちんと報告された。

LHC トンネルに既に設置された 8 セットの Inner Triplet を地上部に移動して修理することは, 実験開始スケジュールの大幅な遅延を意味した。このため, 事故発生直後から, どうにかしてトンネル内に磁石を置いたままで改修できないか, Fermilab と CERN は協力してあらゆる方法を検討した。事故から 1 ヶ月後には CERN 内外から専門家を招いて公式なレビューを開き, 事故の原因調査や再発防止, 今後の改修方法について協議した。その結果, 新たに『カートリッジ』方式と呼ばれる支持構造を採用することが決まった。『カートリッジ』は, アルミパイプの内側にインバー棒を挿入して片端で機械接続した構造になっていて, アルミパイプのもう片方の端部を磁石端部と, インバー棒の片端を真空容器フランジ面と固定する。こうすることで, 冷却に伴う磁石の長手方向の熱収縮も考慮しつつ, 真空容器フランジ面から直接磁石端部を固定することができる。

まず地上部において, スペアの Inner Triplet にカートリッジを取付けて荷重試験を行い, 基本的なコンセプトや機器の状態に問題がないことを確認した。次にトンネル 8R の Inner Triplet にカートリッジを取付け, 本番同様の圧力試験を行った。試験は成功し, 関係者はようやく安堵することができた。これが 7 月中旬で, 3 月の事故発生から如何に素早くアクションを起こして問題を解決したかが判る。引き続き, 他の Inner Triplet についても同様の改修が施され, 9 月中旬にはすべての改修を完了した。

筆者は熱交換器とスパイダーの両方の改修に参加したが, 起こってしまったトラブルはトラブルとして, 情報をオープンにしながら, 如何に問題に対して冷静に対処し, 迅速に行動することが大切なのか, 学ぶことが出来た。Fermilab と CERN の協力体制も見事だったが, 特に感心したのは, それぞれの研究所にいる構造解析や機械設計のプロフェッショナルたちで, 限られた時間の中で適切な解析結果や改修案を出して見せた。翻って KEK を顧みると, 安全面から最重要であるにもかかわらず, この分野の専門家は充分とはいえない。

さて, このように Inner Triplet はトラブル続きだったが, LHC 加速器の大部分を占めるアーク部に目を向けても, 初期のコミッショニングは一筋縄にはいかなかった。特に問

題だったのは, コールドリークだった。磁石や冷却配管は溶接接合されているが, 常温では見つからなくても, 極低温になって初めて漏れ(コールドリーク)が生じる場合があった。溶接の施工や常温でのリーク検査を適切に行っても, 溶接箇所は何千ヵ所にもものぼり, 完全にリークを防ぐことは難しい。一旦コールドリークが見つかり, 修理するとなると, セクター全体の磁石を室温に戻す必要が生じ, 月単位でスケジュールが遅延することになってしまう。最初に述べた様に, 『周長 27 km に渡り 34000 トンを 1.9K に冷却する』ことが如何に難しいことが, 実感した。

5. MQXA 磁石の励磁成功

2008 年 4 月, Low-Beta Insertion System の初めての励磁試験が行われた。今回初めて励磁が行われたのは図 1 に示された概略図において 5R, つまり CMS 実験装置の右側にあるシステムである。

図 11 は Inner Triplet の電源接続図およびクエンチ検出のための電圧信号を示したものである。すべての磁石は直列に接続されているが, Fermilab が開発した MQXB の定格運転電流は 12000 A であり, KEK 開発の MQXA とは運転電流が異なる。そのため, 電流供給部は三つの電源から構成される。すべての磁石と直列接続されている電源 RQX によって MQXA の定格運転電流が供給され, MQXB の定格運転に足りない電流(約 4600 A)は電源 RTQX2 によって供給される。電源 RTQX1 は, トリム電源と呼ばれ, 衝突点側の Q1(MQXA)にのみ ± 550 A のトリム電流を供給する。

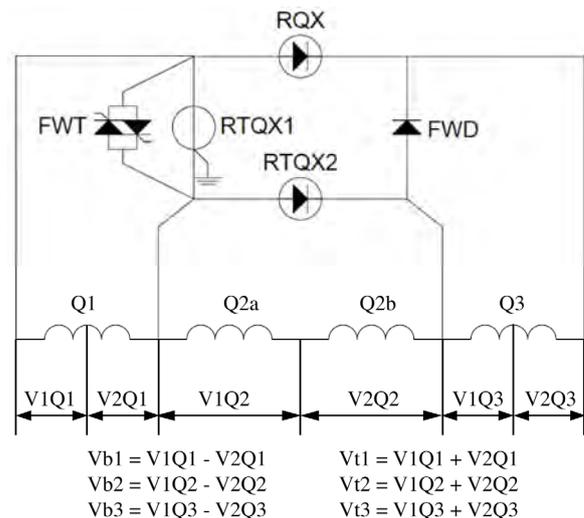
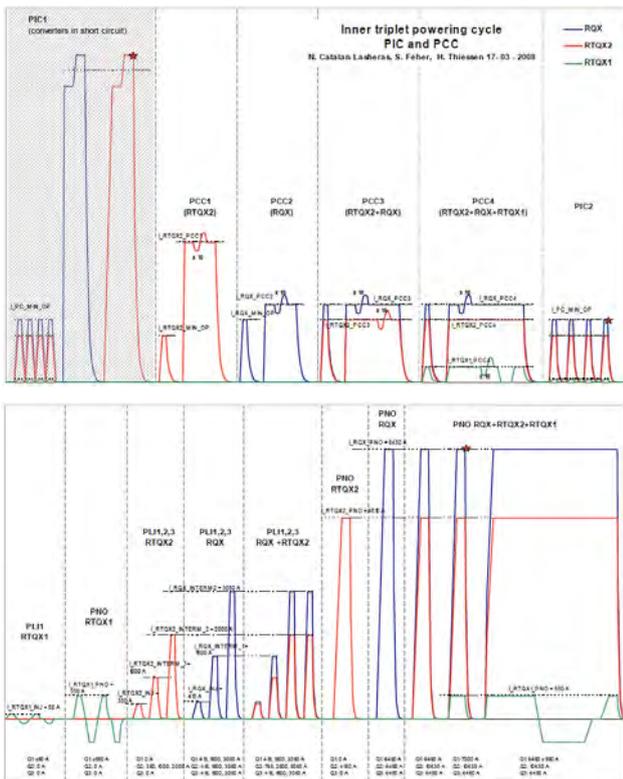


図 11 電源接続図およびクエンチ検出用電圧信号

基本的なクエンチ検出はバランス信号 $Vb1$, $Vb2$, $Vb3$ によって行われる。これら電圧が 0.1V 以上になると磁石がクエンチしたと見なされ, 磁石に取付けられているクエンチ保護ヒータが作動する。その他, クエンチ検出システムの冗長性を確保するため, 各磁石の全電圧 $Vt1$, $Vt2$, $Vt3$

が5V以上になった場合にも磁石クエンチが発生したと見なされる。これはビーム起因によって磁石が均一にクエンチした状況を想定したもので、すべてのシステムが完成した後で追加された機能である。

前述のように複雑な電源構成のため、実際のコミッショニングにおける電流励磁は慎重に行う必要がある。図12にInsertion Systemの通電試験プランを示す。この手順は大きく四つに分けられる。まずシステムのインターロックをチェックするPIC試験(Power converter Interlock Control)、電源による電流制御の可否をチェックするPCC試験(Power converter Control Check)、電流通電と遮断またはスローダウンを繰り返すPLI試験(Power converter current(I) Loop)、最後に電流を定格値まで上げるPNO試験(Power converter Nominal Operation)である。これらについて、三つの電流源を様々に組み合わせて上記試験を行うため、一つのシステムに対するコミッショニングとしては、試験項目の数はLHCの他の磁石と比較しても多い。しかし実際には以下に述べる問題のために、いくつかの試験を今回はスキップした。



4月23日の夕方にはPIC2が行われた。この試験の主な目的は通電時におけるクエンチ保護ヒータとその他インターロック信号入出力の確認である。冷却システムへの余分な負荷を減らすことで通電試験を円滑に進めるため、クエンチ保護ヒータによって磁石がクエンチしない電流値(RQX: 150 A, RTQX2: 100 A)でテストが行われ、問題がないことを確認した。その次に行われたのはPLI-RQXである。PLI-RTQX2については、インターロック動作についてはすでに確認済みであり、磁石に1000 A以上通電するという観点からはPLI-RQXとほぼ同等なため、スキップされている。このPLI-RQXにおいては3050 Aまでの通電およびスローダウンで問題がないことが4月24日の午前中に確認された。

PLI-RQX+RTQX2は4月24日の午後に行われた。RQX・RTQX2の電流値がそれぞれ415 A・350 A, 1500 A・1000 Aの組み合わせで遮断試験, 3050 A・2000 Aにおいてスローダウン試験が行われた後、中央制御室からクエンチ保護ヒータへの放電リクエストが正しく出力されているかどうかを調べる試験が行われた。余計なクエンチは起こさないように、実際には技術者が放電回路への信号をトンネル内でブロックし、放電リクエストが出力されたかどうかのみを確認した。

4月24日夕方、今回の通電試験でもっとも重要となる定格運転電流までの通電が行われた。このInsertion Systemにおける7 TeVでの定格運転電流はMQXAが6778 A, MQXBが11315 Aであったが、今回の目標値はそれを若干上回る6800 Aと11400 Aにした。図13に、この励磁試験の電流プロファイルを示す。現地時間4月24日19時50分に、いったんRQX: 150 A, RTQX2: 100 Aまで上げた後、同19時53分に目標電流までの励磁を両電源同時に指示、同20時12分にRTQX2に若干遅れてRQXが目標電流まで無事到達し、中央制御室で様子を見守っていた関係者の中で拍手が起きた(図14)。その後約10分間電流を保持してから、スローダウンしている様子が図13にプロットされている。この成功に引き続き、同20時53分から再度目標電流値まで通電, 10分間の保持の後、クエンチ保護ヒータを用いて磁石をクエンチさせた。クエンチ時の信号解析の結果、問題となるような異常信号はなく、磁石システムが安全に保護されていることが確認された。翌日4月25日の朝、確認のためもう一度目標電流まで励磁, 約1時間保持して各部の温度などに問題がないことを確認し、5RのInsertion Systemにおける今回の通電試験は終了した。

今回、KEKが開発した磁石のLHCでの初励磁という大きなマイルストーンに筆者(佐々木)が立ち会うことが出来たのは、かなり幸運であったと思う。2008年3月の出張では様々な要因によりスケジュールが遅れ、2度目の出張の

帰国間際で何とか通電成功のシャンパンを味わうことができた。LHCという大プロジェクトにおいて、コミッショニングにおける組織運営や、多くの優秀なスタッフが様々な問題を対処していく様子を直接現場で見聞し、とても貴重な経験をさせていただいた。

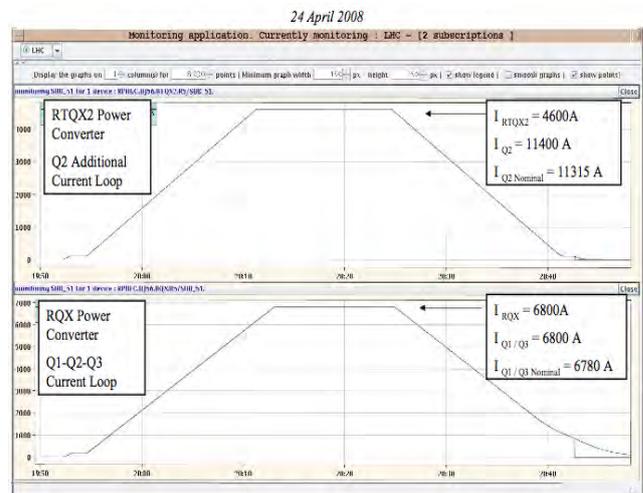


図13 初めて定格電流まで通電した時の電流プロファイル
上 RTQX2, 下 RQX



図14 CCC(CERN Control Centre)で定格通電を祝う
スタッフ

今回のコミッショニングにはKEKとFermilabから関係者が参加したが、中でもSandor Feher氏は1年半以上前からCERNに常駐し、コミッショニングを成功させるために様々な尽力をしてきた。特に最終段階にあたる通電試験では正に陣頭指揮を執られ、帰国日が刻一刻と近づいている一部関係者(筆者を含む)のために、他のコミッショニンググループとスケジュールについて協議・折衝し、機器の不具合などにもかかわらず、なんとかタイムリミットである4月25日までに定格通電試験まで漕ぎ着けていただいた。この場を借りて感謝の意を表したい。

6. おわりに

マイナートラブルは相変わらずだが、LHC 加速器のハードウェアコミッショニングは順調に進行している。この原稿を書いている 2008 年 8 月現在、すべての超伝導磁石が 4.5 K 以下にまで冷却されており、各部での通電試験の完了を急いでいる。また、8 月 8 日には初めてのビームがセクター 2-3 に入射されて、いよいよ LHC のビームコミッショニングも開始された。今秋に予定されている最初のビーム衝突が待ち遠しい。

文献

- [1] Y. Ajima *et al.*, “The MQXA Quadrupoles for the LHC Low-Beta Insertions,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A550**, 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

LHC ビーム最終収束超伝導四極磁石(MQXA)の開発においては、関係諸機関ならびに多くの方々に御支援、御協力をいただきました。心から感謝申し上げます。

本プロジェクトには、以下のスタッフ、学生が参加しました(順不同)。

新富孝和, 山本 明, 土屋清澄, 大内徳人, 荻津 透,
木村誠宏, 中本建志, 佐々木憲一, 寺島昭男, 安島泰雄,
東 憲男, 菅原繁勝, 田中賢一, 大島洋克, 飯田昌久,
平野裕之, 杉田 圭