

LHC用強収束超伝導四極電磁石の開発

寺島昭男¹、東 憲男²

高エネルギー加速器研究機構

共通研究施設、工作センター、技術部工作課

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

高エネルギー加速器研究機構では、欧州共同原子核研究機構 (CERN) における、ラージ・ハドロン・コライダー (LHC) 計画への技術協力として、ビーム衝突点用超伝導四極電磁石の開発が推進されている。その基礎開発として、低温工学センターと工作センターが中心となり、加速器研究施設、素粒子原子核研究所の協力を得て、1 mモデルマグネットがインハウスで試作された。

NbTi 成形撚り線を用い、1.9K 超流動ヘリウムにより冷却されたコイルの 70mm の口径内に 240T/m (@ 8029A)の磁場勾配が要求された。衝突型加速器実験の最終ビーム収束に用いられることから、高磁場勾配、且つ高磁場精度が求められ、LHC 用超伝導電磁石の中でも高度な技術レベルが必要とされた。本報告では、著者らが責任を持った 1m モデルの試作開発と、その間に蓄積された技術について報告する。

1. はじめに

1.1 ビーム衝突点用・超伝導四極電磁石

LHC 加速器の四箇所（図 1）のビーム衝突点には、大型の粒子検出器システムが設置されるが、粒子の衝突頻度を高め、衝突時のビーム輝度（ルミノシティ）を高めるため、強力なビーム収束システムが必要となる。この要となるのがビーム衝突点用超伝導四極電磁石である。70mm のポア（口径）内に、運転磁場勾配として、215T/m が求められた（図 2）。

リングに 4 箇所あるビーム衝突点の直近に 2×4 台の磁石が一組となって配置され、複合レンズ系が構成される。4 箇所のビーム衝突点で合計 32 台が必要となる。日本 (KEK) とアメリカ (FNAL) が、それぞれ独自の設計で、半数にあたる 16 台づつを分担して開発することになった。

ビーム衝突点からの強いビーム散乱により、1 台当たり数十ワットのビーム入熱照射にさらされる。このための温度マージンを確保するとともに、過酷な環境下での長時間 (> ~10 年) に亘る安定した運転を確保するため、磁石の基本設計は、240T/m を目標値として進められた。磁石コイル内での磁場は 10T に迫る高磁場勾配、高磁場精度の電磁石が求められた [1~5]。ビーム蓄積型加速器のための特有の

最先端技術が求められ、機構内での技術開発が不可欠であった。

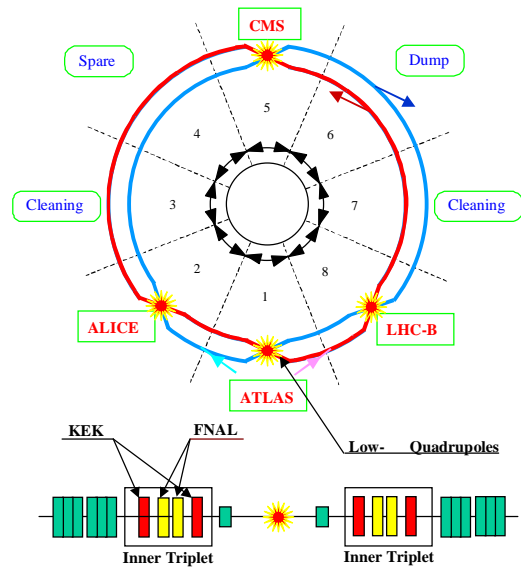


図 1: CERN / LHC 加速器計画
加速器レイアウトとビーム衝突点用
超伝導四極電磁石の配置

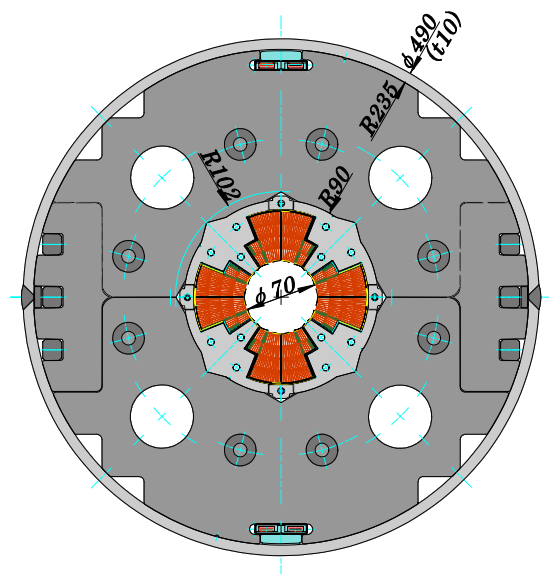


図 2: KEK で開発された LHC ビーム衝突点
用超伝導四極電磁石断面

¹ E-mail : akio.terashima@kek.jp

² E-mail : norio.higashi@kek.jp

基本設計、試作を通して製作技術を蓄積するため、1996年の開発計画スタート時から、工作センターが参加し、以下のことを担当した。

- ・マグネットの機械構造設計、製作図面の作成。
- ・製作工程の立案と部分モデルの試作による検証。
- ・製作治具の設計、製作。
- ・コイルエンドスペーサ、ランプボックス等の重要な構成要素の試作。
- ・モデルマグネット(有効長さ 1.07m)の試作。
- ・モデル製作で得たノウハウと整備した図面による実機設計への貢献。
- ・実機製作担当企業への製作技術の移転。

第一次の設計による 1m モデルの 1 号機、2 号機、および 1 号改良機の開発、試験結果を踏まえ、特に磁場精度の向上を目指して設計の改善が図られた。1m モデルの 3、4 号機が製作され、目標とする電磁石性能が達成された。マグネットの最終設計パラメータを表 1 に示す。

3 号機の開発では、実機サイズ・プロトタイプ製作を担当することとなった製造メーカから技術者が参加し、KEK での共同作業を通して、実際の製作方法に対する迅速な技術移転が図られた。この結果、製造メーカにより製作された 5 号機(有効長さ 1.07m モデル)においても、性能に再現性のあることが確認され、基礎開発を完了することができた[6~9]。

2. 1m モデルマグネットの開発

2.1 超伝導線材

LHC ビーム衝突点用超伝導四極電磁石では、設計磁場勾配として 240T/m が定められ、コイル内での最高磁場は ~10 テスラに達した。超伝導線材には、この高磁場環境における超伝導特性はもとより、コイルエンド部における、極めて小さな曲率半径 (~7mm) での巻き線が可能となる強くしなやかで、約 400 気圧に相当する電磁圧力に対しても、機械的に十分安定であることが求められた。これらの要求を満たすものとして、工業的に技術が確立した NbTi 超伝導線材が、超流動ヘリウム温度(1.9K)で用いられた。このことにより、超伝導線材としての限界条件(臨界点)に対し、設計条件で ~90%、ビームロスによる熱吸収を伴う加速器での定格運転時において ~80% の条件となるよう、超伝導線材(ケーブル)の設計パラメータが決定された[1、2]。

実用超伝導線の設計では、曲率の厳しいコイル巻き線に耐え、高い占積率を実現できるラザフォード型成形燃線が採用され、絶縁には極低温で機械的にも強靱で、電気絶縁特性の安定した多重ポリイミドフィルムが採用された。

2.2 マグネット構造

コイル構造は高磁場勾配、高磁場精度の要求を共に十分に満たせるように、2 層連続巻き(ダブルパンケーキ巻き)されたシェル型コイルを二つ重ねた 4 層コイルとなっている。また、高磁場勾配を求めて鉄

表 1 ビーム衝突点用四極超伝導電磁石設計パラメータ

磁場勾配 (G_0)	240	T/m
電流	8,057	A
ピーク磁場	9.64	T
負荷曲線比(@1.9K)		
内側ケーブル	91	%
外側ケーブル	88	%
コイル内径	35	mm
コイル外径	81.1	mm
コイル有効磁場長さ	6.3	m
コイル全長	6.53	m
コイル巻き数		
1st-Layer	8+4	
2nd	12+4	
3rd	15	
4th	18	
ヨーク内半径	92	mm
ヨーク外半径	235	mm
シリンダー外半径	245	mm
シリンダー全長	6.7	m
蓄積エネルギー	425	kJ/m
インダクタンス	14.4	mH/m
電磁力(octant)		
Fx	1.40	MN/m
Fy	-1.67	MN/m

磁場高調波成分(参照半径 17mm)

(design/unc./sigma)

12 極 $b_6 < 0.13/0.94/0.48 \times 10^{-4}$

20 極 $b_{10} < 0.001/0.06/0.03 \times 10^{-4}$

ヨークの寄与(~10%)を得るため、鉄ヨークがコイルに非常に近接した構造となっている。その結果、カラーはコイルに必要とされる予圧力を保持するには十分な強度を持ち得ず、精密な非磁性スペーサとしての役割に徹した設計となり、電磁力はカラーを通じて鉄ヨークに伝達され保持される。また、機械構造の単純化と、量産時の生産性・設備効率、再現性を追求した結果、四極電磁石でありながら、鉄ヨークは上下 2 分割構造が採用されていることが大きな特徴である。

要求される磁場精度(高次成分 / 四極成分 10^4 @ $r=17\text{mm}$)を満たすためには、各極には四極対称となる、均等な予圧力(50Mpa @RT)を発生させることが不可欠であり、機械構造設計、組立て方法に工夫が求められた。加速器実験での長期にわたる運転に供されることからサーマルサイクルの後においても、クエンチ(超伝導状態が崩れること)することなく、定格運転電流(7149A)に励磁できることが要求されている。冷却・励磁の際にも予圧力が、一定量保たれることが決定的に重要なことである。したがって、それらの基礎となる均一なコイル剛性を確保することも不可欠である。

開発された製作技術は企業へ技術移転され、実機(有効長さ 6.3m)の生産に生かされる。したがって、ここで開発される製作技術、製作治具は、すべて実機の工業生産に適用可能なものでなければならない。迅速な技術移転のため、製作技術は可能な限り適格に図面化される必要がある。マグネット構成部品はもとより、治工具の全ての図面が電子ファイルにより企業に交付されることになるので、図面は細部に亘る正確さと併せて、検索利用が容易となるように体系的に整備されることが求められた。

2.3 150mm 機械モデルによる検証

このマグネットの特徴である、上下2分割ヨークによる電磁力保持構造(ヨークによる予圧力の発生)の健全性確認と、上下加圧ヨークングの方法を確立するため、図3に示す『150mm 機械構造モデル』を試作して検証した。

1mモデルおよび実機の製作では、カラー、鉄ヨークは、ファインブランキングと呼ばれる精密打ち抜き法によって製作される必要があるが、これらの打ち抜き型は非常に高価であり、初期投資を効率的に行なうため、ここではカラー、鉄ヨークとも150mmを構成できる枚数が、ワイヤカット放電加工機で製作された。絶縁ラップ等、他の部品は計画されたものを忠実に再現し、コイルにはエンドスペースの最適化のために試巻きされたコイルが分割利用された。

冷却後の機械構造の安定性を検証するため、キャパシタンス型の応力ゲージを用いて、室温および液体窒素冷却下でのコイル予圧の測定が行われた[8]。冷却時にも各極に必要な均一なコイル予圧力が保たれていることが確認され、この構造の妥当性が検証された。

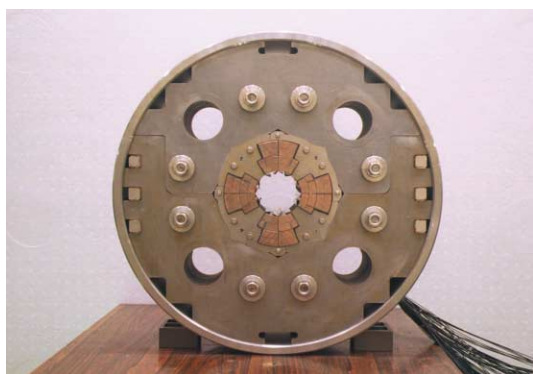


図3：150mm機械構造モデル

2.4 マグネットの試作、治工具開発

2.4.1 マグネットの製作工程

加速器用超伝導電磁石の開発は、

- (1) 電磁・構造設計
- (2) 構成部品図の作成

- (3) 製作工程と治工具の企画・開発
- (4) モデルマグネットの試作
- (5) 試験結果のフィードバック
- (6) 試作の繰り返し

のステップを踏むことにより、実用に耐える実機の製作が可能となる。なかでも治工具開発の占める比重は大きく、本開発においても、全てのプロセスで、一貫して治工具の製作と改良を重ね、バラツキの無い製作方法が確立された。また、マグネットの製作を行なうものが、その経験に基づいた治工具の開発・改良を行なうことは、円滑なマグネットの開発に非常に有効、且つ大切なことであった。図4にマグネットの製作プロセスを示し、各工程の様子を、図5(a~i)に示す。

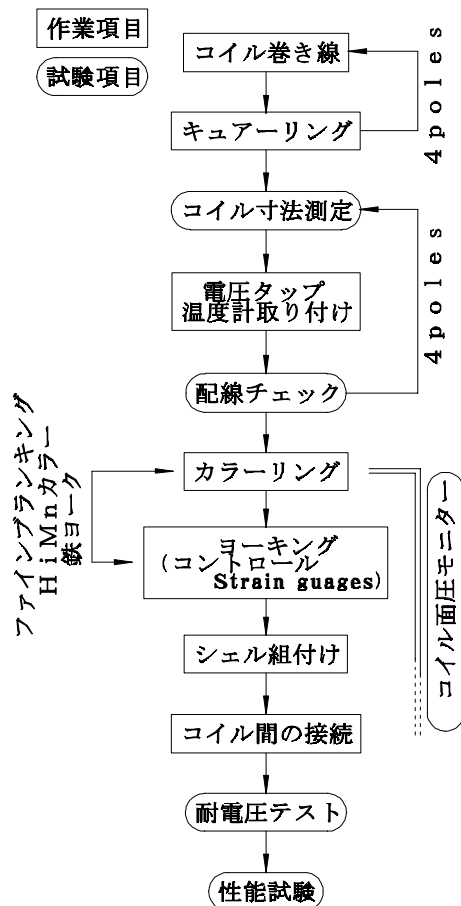


図4：マグネット製作フローダイアグラム



図5(a)：スペーサとランプボックス



図 5 (b) : コイル巻き線

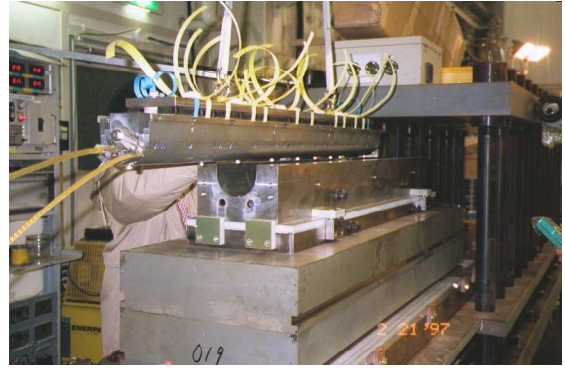


図 5 (c) : コイルの加圧成形(モールド)



図 5 (d) : モールド後のコイル

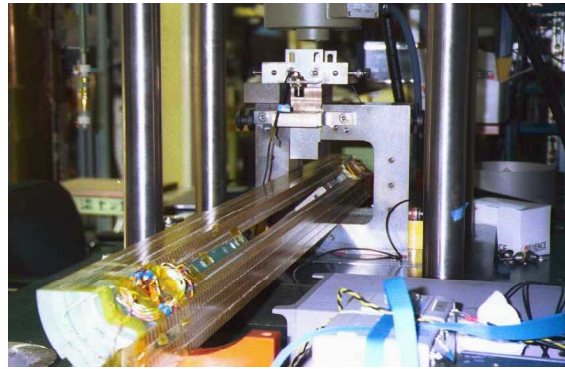


図 5 (e) : コイルサイズ、ヤング率測定

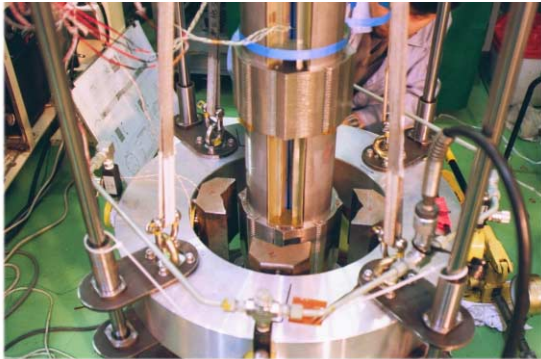


図 5 (f) : カラーリングプレス

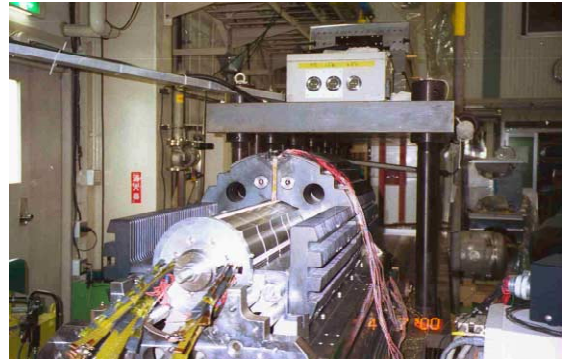


図 5 (g) : ヨーキング

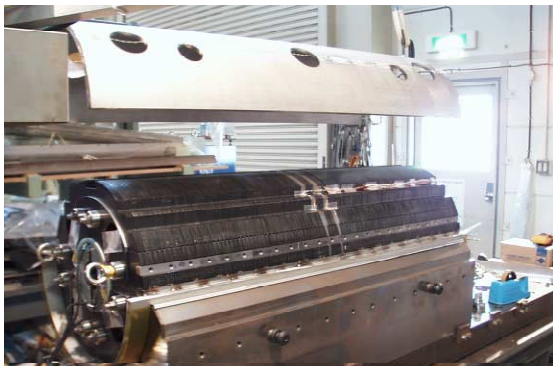


図 5 (h) : シェルの組付け

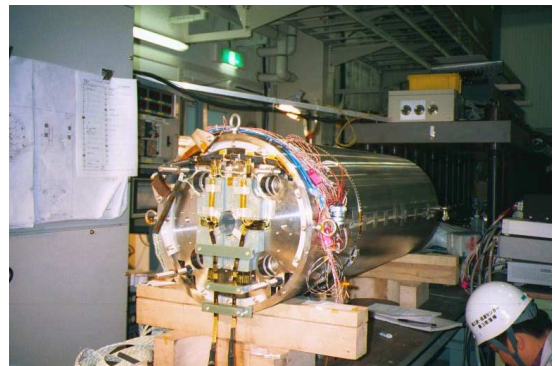


図 5 (i) : コイル間の接続

2.4.2 エンドスペーサとランプボックスの試作・製作

コイルエンドに用いるスペーサは、加速器用超伝導電磁石において、最も構造設計、機械加工の最適化が困難な要素であり、成形撚り線の加撓性を確認しながら、最終形状を決定するまでに多くの試作が必要となった。このスペーサの基本設計は、CERNで開発された磁場設計スペーサ・デザインプログラム“ROXIE”[10]により等周条件を基本として行われた。図6にROXIEが与えるコイルエンドのケーブル配置を示す。複雑な三次元曲面を持つこのスペーサは、CAD/CAMによって具象化・チェックされ、傾斜式NC円テーブルを附加した同時5軸制御MC（マシニングセンター）による加工を行なった(図7)。

試作したスペーサに巻き線を行ない、専用に製作した真空含浸装置によりエポキシ含浸を行なった後、カット断面を観察することで、超伝導線とスペーサとのフィッティング状態を確認した。ROXIEは設計の有力な手段であるが、汎用性を持たせるためCAD/CAMとのインターフェースを含んでいない。ROXIEデータを直接CADに取り込み、平面図・側面図・展開図・アイソメトリック図の自動作図を行なうマクロ言語プログラム、CAMに転送するためのプログラムをそれぞれ整備した。これにより、作図ミスと入力ミスを防止するとともに、試作・形状決定への速いフィードバックを可能にした。

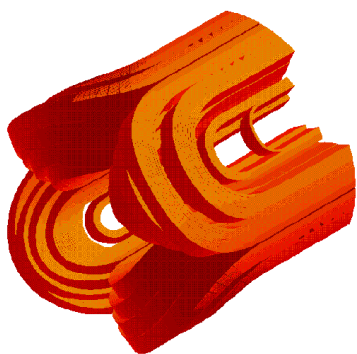


図6：ROXIEにより計算されるコイルエンドの線材配置

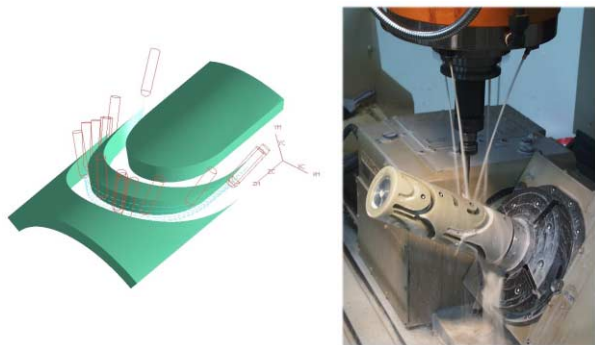


図7：CAMによるモデリングと同時5軸MC加工

インナーコイル(1-2層)、アウターコイル(3-4層)はダブルパンケーキ巻き線となっているので、線材は3次的に層間をわたっていく。構造的な不安定を生じ易く、従来クエンチを頻発する部分であった。3次元CADを用いた設計を行ない、線材にクエンチの原因となるような、無理な応力のかからない最適形状を得た(図8)。

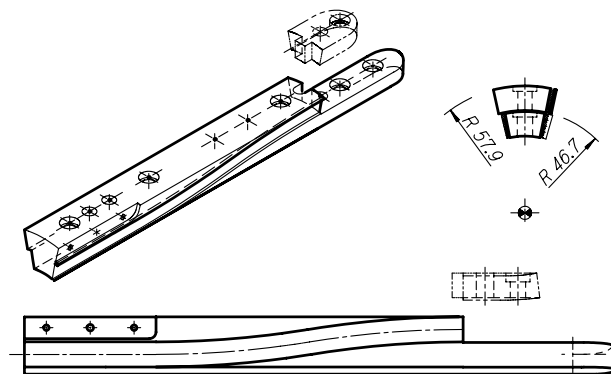


図8：1~2層間で超伝導ケーブルをスムーズに移行させるためのランプボックススペーサ

2.4.3 コイル内での超伝導線接続

磁場設計の要請から、2層目コイルは4ターンまではインナー用ケーブルを用い、5ターン目からはアウター用ケーブルを用いている。コイルの中にハンダ接続箇所を有することになるが、この付近は磁場が強く、詳細な設計と寸法管理された施工が不可欠であった。

4~5ターンの間にあるウェッジスペーサの中で、線材のストランドピッチ90mmを超える100mmをハンダ長さとした。線材表面に処理されているステブライト(5AgSn)の劣化を防ぐため、ハンダには銀入りハンダを使用した。ストランドの崩れを防ぐには、両ケーブルに予備ハンダを行ない、さらに、専用のハンダ治具を用いて施工した。

ハンダ接続後の絶縁回復に工夫を要した。GFRPのスペーサを用い、沿面距離で絶縁を確保することにより、線材が独自に持っていた絶縁フィルム以外、新たなフィルムの追加を不用にした。また、ハンダ接続の状態と、絶縁ラップ回復後のサイズ検査のため、各々ゲージを用意して簡略な判定が行なえるようにした。

2.4.4 2層連続巻き線と4層一体モールド

ダブルシェル構造の4層コイルで、均一な精度のよいコイルサイズを得るため、4層同時の一体成形を行なうことにした。従来、各層毎に行なっていた加圧加温成形に4層同時成形を含めると、1台あたりの成形回数は20回になってしまう。このモールド工程は加圧、昇温から成形終了まで、約8時間を要する作業であり、この回数・時間を節約するため、奇数層はモールドせずに、連続して偶数層を巻き線し、その後2層同時に成形することとした。巻き線され

た状態の奇数層の上に偶数層の巻き線が可能となるように、巻き線治具に新たな工夫を行なった。

コイル押え治具は、線材を半径方向と周方向から常に保持し、巻き線中にコイルが緩むのを防ぐ構造とした。これにより奇数層の成形工程を省略し、インナーコイル(1-2層)、アウターコイル(3-4層)は各々連続して巻き線が行なえるようにした。4層同時成形により、コイルの寸法管理がより正確となった。

2.4.5 コイル対地絶縁

対地絶縁用グランドラップにはポリイミドフィルムを使用した。4層構成を基本とすることで、コイル直線部とエンド部での絶縁接続箇所、1~4極の周方向の接続箇所でも、最低 $125\mu\text{m} \times 2$ 層の確保を原則とした。絶縁沿面距離は 15mm を基本とした。

$25\mu\text{m} \sim 125\mu\text{m}$ のフィルムで構成された、長さ 1000mm を超えるグランドラップの沿面絶縁距離を含む図表示に苦心した。紙による模型を作り、アイソメ図を作成して設計を補った。最終組立て時において、実機の要求仕様である $5\text{KV} @ \text{Air}$ 、 $1.5\text{KV} @ \text{GHe}$ DC の耐電圧が確認できた。

2.4.6 カラーリング

カラー材には、高マンガン非磁性鋼を用いた。一般的にカラー材に要求される特性は、高耐力と低比透磁率である。加えて、このカラー材の積分熱収縮率は、鉄と同等の 0.19% となっている。このマグネットはヨークによって電磁力を支持しているため、冷却によるカラーの収縮が大きいと、コイル位置が不安定な状態となり、磁場性能を損なうことになる。 $300\text{K} \sim 4\text{K}(1.9\text{K})$ での積分熱収縮率を同等にすることによって、冷却時にもヨーク/カラーの組立て精度を保つことができた。収縮率の大きな SUS316LN 等では達成できなかった設計である。

モールドされた四極のコイルは、カラーリングプロセスによって一体化された。組立てマンドレルを芯として仮組立てしつつ、グランドラップ等を読み、さらに絶縁保護用のポールシューを被せ、予め 150mm の長さにスタックされたカラーモジュールを、コイル全長にわたり4方向から組み付けた。四極対称性を保ちながら、順次カラーモジュールを加圧し、すべてのモジュールに真鍮製のカラーピン4を挿入することによってカラーリングを完成した。本マグネットのヨーク/カラー構造では、カラーリング時点での予圧力は、所定の 50MPa の $1/10$ であり、非常に容易なカラーリング作業となり、簡便なカラーリングプレスで行なうことができた。

2.4.7 ヨーキング

ヨーキングでは、予めファインブランキングで打抜かれたヨーク材を、 150mm の長さにスタックしたサブモジュールを組立てた。その際、スタックチューブと呼ばれるピンを液体窒素冷却による、冷し嵌めではめ込み、クリアランスゼロでのサブモジュールの組立て精度を実現した。カラーリングされたコイルは、上下2分割のヨーク内に組み込まれ、上下の

ヨークはキーを挿入することによって強固に固定された。このヨーキングは 100MPa 、 1000トン/m の圧縮力を加えて行われた。ヨークの2分割構造の採用によって、組立て工程が単純化され、量産時の工数削減に役立った。このヨーキング法による組立て、上下加圧の既存プレスを活用することにより、四方締めヨーキングプレスを新設することなく、四極マグネットが実現できたことは、前項の簡易型カラーリングプレスと併せ、エンジニアリングの立場から、大きな成果であった(図9)。

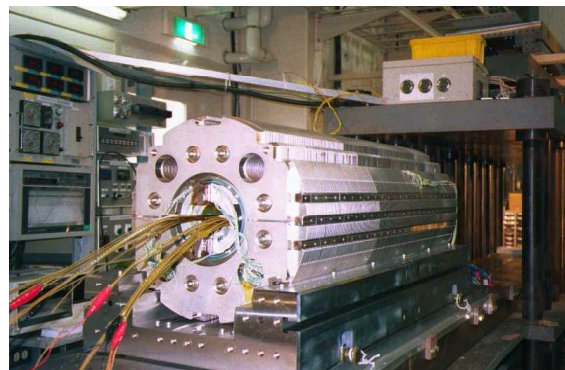


図9: ヨーキングを終えた#1号機

2.4.8 コイル間の接続

四層四極マグネットでは、ダブルパンケーキ巻き線を採用していても、コイルの線材端は16本となり、コイル間の接続は7箇所にもぼる。この接続による本体磁場への悪影響、接続スペースの最小化のため、トリスタンQCSで採用した戻しターン法を用いることとした[11]。しかし、今回はコイルの内半径が小さいという、線材のアスペクト比が大きくて、エッジワイズ曲げに対する可撓性が十分でなく、単純な採用はできなかった。そこで、時計周りのノーマル巻き線と反時計周りのミラー巻き線を行なう、2対のコイルを製作する設計とし、戻しターンをコイルの内半径が大きくなる、2層目に用いることで解決した。この結果、マグネット端部での各コイル間の接続は図10に示されるように整然とした設計が実現した。

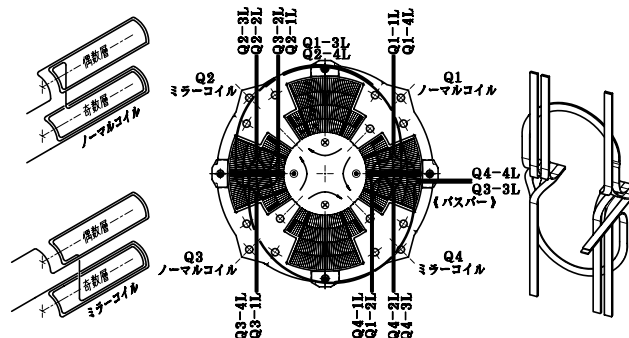


図10: 水平面に整列されたポール間の接続

3. 開発された電磁石の特性

3.1 コイルの剛性・寸法制御

コイル剛性は、マグネットのクエンチ特性、磁場精度に影響する。すなわち、コイル剛性が小さいと電磁力によるコイル変形が大きくなり、コイル予圧力が設計通りかけられなくなる。また、コイル間で剛性のバラツキが大きければ、コイルを組立てたときに、各々の変形量が異なることから、磁場精度が落ちる。成形時の応力とコイル剛性の関係を実験的にあらかじめ確認することにより、#4号機では、インナーコイル $8.41\text{GPa} \pm 0.32\text{GPa}$ ($l = 18\ \mu\text{m}$)、アウトターコイル $8.09\text{GPa} \pm 0.44\text{GPa}$ ($l = 19\ \mu\text{m}$)に制御することができた。

コイルの周方向寸法は、主として磁場高次成分に影響する。ケーブル断面寸法他に、絶縁テープに塗布したエポキシ樹脂量にも密接に関係する。コイルの試巻き線を行ない、成形時の加圧力、エポキシ樹脂塗布量とコイル寸法の実測され、規定応力下で、規定寸法になるように制御された。コイルサイズの計測は、コイルサイズ測定装置を新たに開発して行われた。コイルの周方向に沿ったサイズを圧力の関数として計測し、設計値からのずれ、およびコイル間のばらつきが計測された。最終的にコイルサイズのばらつきは、標準偏差値で ~ 20 ミクロン以内に制御できた。1mモデル3~5号機のコイル寸法とコイル剛性の履歴を図11に示した。3、4、5号機と開発が進捗するにつれ、コイル寸法が目標とした予備圧力(50 MPa)で、コイルの設計サイズに対して、 $50\ \mu\text{m}$ の範囲に近づいていることが判る。

製作精度は、コイル巻き線、成形、ヨークングなどの各工程においてチェックされたが、最終的には組み上がった電磁石の磁場の高次成分を測定することで確認された。

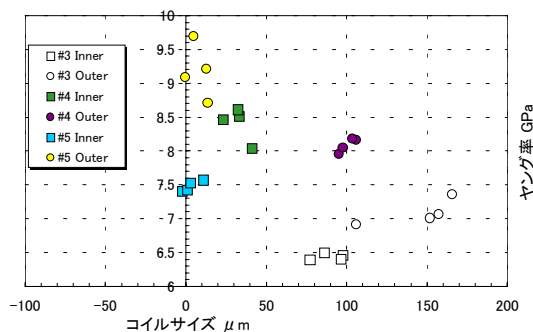


図 11：コイルサイズとコイル剛性のチューニングの進歩。
(測定には、(株)東芝殿の御協力を頂いた。)

3.2 励磁特性・磁場測定試験結果

モデル1号機では、設計磁場勾配の251T/mに達した。その励磁トレーニング特性を図12に示す。また、3~5号機における初期クエンチ特性を図13に示す。各電磁石の最初のクエンチは、ほぼ運転時の

の定格電流値(7149 A)あるいはそれを超えており、十分に要求に応える結果を得た。モデル3~5号機の磁場測定の結果を図14に示す。この結果に見られるように、磁場の高次成分は各々標準許容範囲内に収まり、電磁石が設計寸法の許容範囲内で製作されていることを示している。

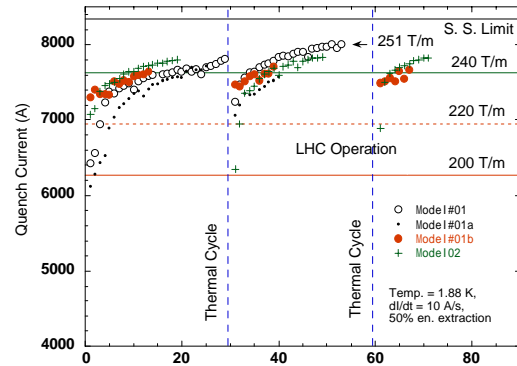


図 12：モデル1~2号機のクエンチ特性

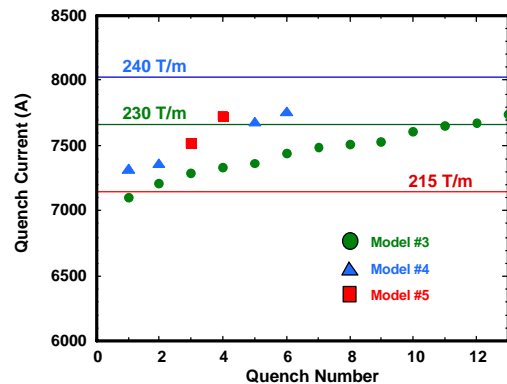


図 13：モデル3~5号機のクエンチ特性

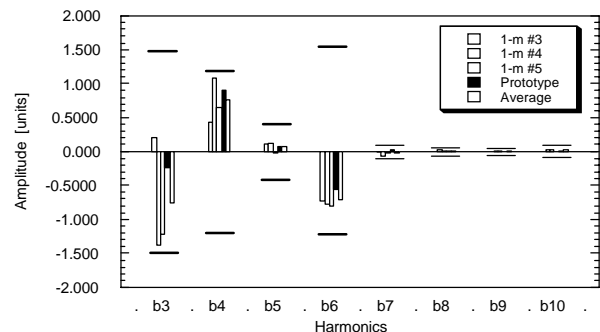


図 14：モデル3~5号機の磁場高次成分の測定結果

4. 開発成果

この開発を通し、以下の技術的な成果を得た。

- ・#1、#2号機の試作結果を踏まえた設計を経て、実機製作の最終デザインを得た。

- ・高磁場勾配：トレーニングなしで定格運転電流を超えるマグネットを実現できた。
- ・高磁場精度：要求される高磁場精度（磁場勾配均一度 $<10^{-4}$ ）を満足することができた。
- ・#3、#4、#5(TSB)号機の製作、試験を通じ、再現性（ $<10^{-5}$ ）の良い製作方法を確立することができた。
- ・設計、試作をインハウスで行ない、短期間でのフィードバックを可能にした。
- ・設計と製作の有機的な結合により、基盤となる多くの技術図面を蓄積できた。
- ・図面とともに蓄積された技術、ノウハウを迅速に技術移転することができた。

なお、これらの開発の詳細な記録は[12、13]に述べられている。現在、移転された技術により、実機の製作が企業において進められている。

5. まとめ

CERNでのLHC加速器への技術協力として1996年度にスタートしたビーム衝突点用超伝導四極電磁石の開発は、3ケ年のモデルマグネットの試作開発を経て、目標とする電磁石性能を得ることができた。この技術をもとに、1999～2000年度にフルスケール・プロトタイプ製作・試験、そして2001年度から実機生産開始へと順調に進行している。実機1号機は2001年11月に性能評価のための一連の試験を完了した。

励磁特性、磁場特性、マグネット保護に関して目標性能が確認され、クライオスタットへの組み込みのため、国際協力のパートナーである米国フェルミ研究所に搬送された。このようにモデルマグネットの基本設計、試作、試験評価に至るまでを一貫して機構内において行なうことが出来たことにより、その後、スムーズな企業への技術移転、実機製造の開始ができたものと考えられる。開発された技術とノウハウが伝承され、今後、同様の超伝導電磁石の開発に生かされていくものと信ずる。

謝辞

LHC ビーム衝突点用超伝導四極電磁石の本基礎開発においては、多くの方々の励ましと御支援を頂きました。特に、菅原寛孝機構長、木村嘉孝物質構造科学研究所長には、計画当初からの変わらぬ励ましと暖かいご支援を頂きました。ここに深謝申し上げます。近藤健次郎共通研究施設長、三国技術部長、人見宣輝工作センター長には、本開発の推進にあたり多くの励ましを頂きました。心より感謝申し上げます。LHC マグネット開発グループの皆様方に励ましと御支援を頂きました。長期間、継続的にこのような機会を与えて頂いた、工作センターの各位に感謝致します。

本計画はCERNとの共同開発研究として行われたものですが、特に共同研究のまとめ役としてご尽力頂

いたTom Taylor氏、1号機の機械設計を分担頂いたGlyn Kirby氏には大変お世話になりました。他のCERNのスタッフ、特にRanko Ostojic氏、Stephan Russenschuck氏には種々技術的なアドバイスを頂いております。ここに、感謝いたします。

またクウエンチプロテクションヒータの開発では、Flex Rodriguez Mateos氏をはじめ関係者の方々に大変お世話になりました。

開発された技術の移転がスムーズに行われたことは、プロトタイプならびに実機マグネットの製作担当会社である(株)東芝殿及びスタッフの方々の熱意と御協力の賜物です。ここにお礼申し上げます。最後に平成13年度KEK技術賞に御評価頂きましたことに、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. Yamamoto, et al., "Design Study of a Superconducting Insertion Quadrupole Magnet for the Large Hadron Collider", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, (1997) 747 - 750
- [2] A. Yamamoto, et al., "Development of a Superconducting Insertion Quadrupole Model Magnet for the Large Hadron Collider", Proc. of MT-15, Beijing, China, 1998, pp. 59 - 62
- [3] G.A. Kirby et al., "Mechanical Design and Characteristics of a Superconducting Insertion Quadrupole Model for the Large Hadron Collider", Proc. of MT-15, Beijing, China, 1998, pp. 63 - 66
- [4] A. Yamamoto et al., "Analysis of Mechanical Tolerances of a Low- Quadrupole Magnet for the LHC", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, (2000) 131 - 134
- [5] K. Tsuchiya et al., "Magnetic Design of a Low-beta Quadrupole Magnet for the LHC Interaction Regions", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, (2000) 135 - 138
- [6] Y. Ajima et al., "Development and Test Results of a Low- Quadrupole Model for the Large Hadron Collider", Proc. 6th European Particle Accelerator Conf., Stockholm, 1998, p. 2047 - 2049
- [7] N. Ohuchi et al., "Magnetic Field Measurements of a 1-m Long Model Quadrupole Magnet for the LHC Interaction Region", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, (1999) 451 - 454
- [8] T. Nakamoto et al., "Quench and Mechanical Behavior of an LHC Low- Quadrupole Model", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, (1999) 697 - 700
- [9] T. Shintomi et al., "Progress of LHC Low-Beta Quadrupole Magnet at KEK", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, (2001) 1562 - 1564
- [10] S. Russenschuck, "ROXIE: Routine for the optimization of magnet X-section, investigation and coil end design", CERN 99-01, 1999.
- [11] K. Tsuchiya et al., "Performance of the Eight Superconducting Quadrupole Magnets for the TRISTAN Low-Beta Insertions," IEEE Trans Magn. MAG-27, pp.1940-1943(1991)
- [12] 寺島昭男 他. "超伝導四極電磁石の製作 - 四極・四層マグネットのコイル間接続" 2000年度 東北大学技術研究会
- [13] 寺島昭男、東憲男 他., "LHC ビーム衝突点用・超伝導四極電磁石の基礎開発" KEK Report 2001-23