I-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石システム

荻津 透*1·木村 誠宏*2·安島 泰雄*2·荒岡 修*2·藤井 芳昭*2・ニック ヘイスティング*2 東 憲男*2・飯田 真久*2・小林 隆*2・槙田 康博*2・中平 武*2・中本建志*2 大畠 洋克*2. 岡村 崇弘*2. 坂下 健*2. 佐々木 憲一*2. 柴田 政宏*2. 鈴木 祥二*2 田中 賢一*2·寺島 昭男*2·都丸 隆行*2·山本 明*2·市川 温子*3·角野 秀一*4

Superconducting Magnet System for J-PARC Neutrino Beamline

Toru OGITSU*1, Nobuhiro KIMURA*2, Yasuo AJIMA*2, Yasuo ARAOKA*2, Yoshiaki FUJII*2, Nick HASTING*2, Norio HIGASHI*2, Masahisa IIDA*2, Takashi KOBAYASHI*2, Yasuhiro MAKIDA*2, Takeshi NAKADAIRA*2, Tatsushi NAKAMOTO*2, Hirokatsu OHHATA*2, Takahiro OKAMURA*2, Ken SAKASHITA*2, Ken-ichi SASAKI*2, Masahiro SHIBATA, Shoji SUZUKI*2, Kenichi TANAKA*2, Akio TERASHIMA*2, Takayuki TOMARU*2, Akira YAMAMOTO*2, Atsuko ICHIKAWA*3 and Hidekazu KAKUNO*4

Abstract

A superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line had been under construction since 2004. The system consists of 14 doublet cryostats; each contains 2 combined function magnets (SCFM). The SCFM uses two single layer left/right asymmetric coils that produce a dipole field of 2.6 T and quadrupole of 19 T/m. The SCFMs had been developed by 2004, mass-produced since 2005, and completed by summer 2008. The system has been installed since Feb. 2008 till the end of 2008. The commissioning of the system has been carried out in Jan. to Mar. 2009. The paper summarizes the magnet development and system overview including cryogenics. The paper also reports the production, installation and commissioning status.

1. はじめに

大強度陽子加速器 J-PARC1)では、次期ニュートリ ノ振動実験計画(T2K²⁾)のためのビームライン施設 が建設され、運転が始まっている. この計画で一次 ビームラインは、メインリングから射出される最高 50 GeV (現状は 30 GeV) の陽子ビームを曲げ半径約 100 m で 90 度程度曲げることが要求された. これを 限られた予算とスケジュールで実現する為に 2.6 T の 2極磁場と19T/mの4極磁場を同時に発生できるコ ンバインドファンクション型超伝導電磁石(SCFM: 図1)を28台用いたビームラインが採用された.シ ステムは2008年の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. このシステムの開 発は KEK 素粒子原子核研究所から依頼を受けて超伝 導・低温工学センター,機械工学センター,そして素

粒子原子核研究所低温グループが協同で行った. 特に SCFM については細部にわたるまでの開発を KEK イ ンハウスで行い、実際に実機と同等のプロトタイプ磁 石を製作し、その性能を確認した上で量産を請け負っ たメーカーに技術供与を行った. 本解説ではこの磁石 の概念に至るまでの道のり、磁石の設計及び構造、お よび製作技術についてまとめるとともに、システムの 設計、建設、システム試運転、およびビーム試運転に ついて報告する.

2. ビームライン設計

2.1 機能分離型

従来の加速器用超伝導磁石は、機能分離型の強収束 型シンクロトロンへ用いられることがほとんどで、結 果的に2極4極をそれぞれ別個の磁石が担う単機能 型のものが主流であった. ニュートリノビーム用一次

^{*1} KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: toru.ogitsu@kek.jp)

^{*2} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{*3} Kyoto University

^{*4} Tokyo University

陽子ラインでも当初,4Tの2極磁石と36T/mの4 極磁石各20台で設計された. 単機能型の超伝導磁石 では、 $\cos(n\theta)$ 分布を模擬した電流分布を、ラザフ ォードケーブルと呼ばれる長辺同士に僅かな角度のつ いた平角形状のケーブルをアーチ状のコイルに構成す ることによって、2n極の単機能磁石を構築する設計 が主流である. この設計手法においては、コイルの対 称性が保たれるため目的の多極成分以外の磁場成分を 抑える設計がしやすく、また機械構造的にも安定であ る. 一方, ビームライン建設を考えると;2種類の磁 石を作らなければならないため治具を含めて製造ライ ンを2種類用意しなければならない、4極磁石は構造 が相対的に2極磁石より複雑である,等コストアッ プにつながる要因が多い. 特にニュートリノビームラ インの様に数十台程度の磁石しか必要ない場合は2 種類の製造ラインは大きなコストアップ要因となる.

2.2 複合磁場型

ニュートリノビームラインではコストダウンに対して非常に強い要請があった。これに答えるため、2極磁石のコイルの内側に4極コイルを内包する形での複合磁場磁石がBNLから提案された³⁾.しかしながら2極コイルと4極コイルの間の強い反発力に対する支持構造や、複雑な構造ゆえの経済性等に対する懸念からこの案は、断念された。

その後、荻津他によって提案された FFAG 用の超 伝導磁石の概念4,5)を基に、単層の左右非対称コイル を用いて複合磁場を構築するアイデアが出され、ニ ュートリノビームラインへの適応が検討された. この 検討の中でビームサイズ、磁石内でのビームサジッタ、 2極と4極の磁場強度の比率、そしてコスト等につい て最適化を行った. その結果としてセル数は 10 から 14に増え、複合磁場磁石への要求磁場は2極磁場 2.59 T, 4 極磁場 18.6 T/m, で磁場長 3.3 m となっ た. また要求磁場精度は2極と4極の比が(1/100, その他の多極成分は5cmの参照半径での積分値で2 極に対する比率で1/1000以下程度を目指すこととな った6,7). この変更によって磁石の種類は2種類から 1種類に、磁石数は40台から28台に減った。また磁 石の構造は後述する様に基本的には2極磁石に近い 構造となったため製造コストは大きく最適化された. それにもかかわらず、セル数は増えたのでビームサイ ズは縮小されアクセプタンスは増えた.

3. 超伝導複合磁場磁石⁷⁻¹⁰⁾

3.1 基本構造

磁石の基本構造を図1に示す.

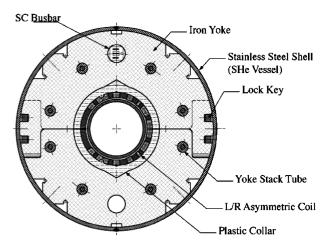


図1 J-PARCニュートリノ用複合磁場型超伝導磁石 断面

磁石の中心は2極/4極複合磁場を発生する,上下 鏡対称の単層左右非対称コイル2本(内径173.4 mm) で、SUS316L 製のビームチューブを挟むように配置 されている. これをガラス繊維強化フェノールプラス チック製のプラスチックカラーを介して,鉄ヨークが 挟み込むようにして機械的な支持を与えている. ヨー ク組み立てされた磁石の外側には、厚さ 10 mm のス テンレスシェル上下2枚が溶接により取り付けられ る. 磁石は強制対流の超臨界へリウムによって直接冷 却されるが, このシェルはヘリウム容器としての機能 を果たす.シェルの外側には、ヨークを基準にしたア ライメント用のマーカーが取り付けられる. また端部 にコイル端部を拘束するエンドプレートや, 上部と下 部コイルのリードを接続するスプライス等が組み込ま れ、完成する. この構造はコイルが左右比対称である 以外は、超伝導2極磁石(特にRHICの物)と同等 である.

3.2 電磁設計

電磁設計では、まず2次元形状で要求仕様を満たす磁場設計をした後、端部の設計を行った.設計の結果得られた各多極成分(50 GeV,7345 A)を表1にまとめる.2次元形状では十分に仕様の範囲内で設計磁場を発生できたが、端部を含めた積分磁場では目標値(1/1000以下)から外れる高次の多極成分(特に6極)が存在する.これは単層コイルである為に端部設計の自由度が少なく設計の最適化に限界がある為に生じたものである.ここからさらに設計を行い、直線部と端部でお互いに各多極成分を打ち消し合うように最適化を図ることも可能であった.しかしながらこの磁石においては、表1の磁場精度でビーム計算を行ったところ、ビームアクセンプタンスの十分な確保を確認

表1 参照半径5cmでの磁場精度

女 「多灬「臣 o s くりぬめ作及			
	2D (T)	$\textit{Integral}\ (T\!\cdot\! m)$	
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	$-0.6*10^{-4}$	$-0.3*10^{-4}$	

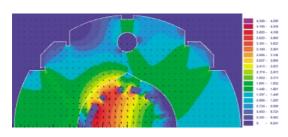


図2 2次元磁場強度及び磁束ベクトル図

でき、最終的にこの設計を採用した.

超伝導磁石の電磁設計として重要なのは、超伝導ケーブル上での磁場の強さと方向になる. 図2に磁石断面における磁場強度と磁場のベクトル図をまとめる. ケーブル上での最高磁場は4.7 Tとなり、運転条件(超伝導運転限界への比率)は運転温度4.5 Kで約72%であった. また磁場の向きからケーブルにかかる電磁力を求めたところ、全てのケーブルで角度方向ではポールからミッドプレーンに向けて力がかかり、半径方向では外側に向けてかかった. これは通常の2極磁石にかかる電磁力と基本的には同じ向きである. また角度方向の電磁力によって引き起こされるプリストレスの減少は約30 MPaである. また磁石のインダクタンスは14.3 mHで50 GeV 運転時の蓄積エネルギーは386 kJである.

3.3 コイル設計及び製作

コイルには、CERN-LHC の ARC 部 2 極磁石外層 コイル用の NbTi 超伝導ケーブルを使用した. これは 同時期に大量生産され、コストが最適化されており、なお且つ品質が厳密に管理されているケーブルであったことから選定された. ケーブルはラザフォードタイプで厚さ約 $1.5~\mathrm{mm}$, 幅約 $15~\mathrm{mm}$, キーストンアングル $0.9~\mathrm{g}$ で,直径 $0.85~\mathrm{mm}$ で銅比 $1.95~\mathrm{o}$ 超伝導素線



図3 成形後コイル

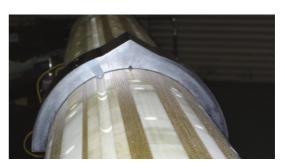


図4 コイルに乗るプラスチックカラー



図5 ヨーク組み立て



図6 シェル溶接

36 本で構成されている. コイルは高磁場側が35 及び6 ターンの2ブロック,6,5,10,13,及び7 ターンの5 ブロックからなり,各コイルブロックの間にはG11製のスペーサーが配置されている. 図3に成形後のコイルを示す. コイルは成型時に角度方向に高磁場側で

0.7 mm, 低磁場側で 1 mm オーバーサイズになるように設計されていて後述するヨーキングによって規定のサイズまで押された時にはプリストレス目標値 80 MPa まで圧縮されるようになっている.

実際の製作においてはコイルサイズにばらつきが出ないことを確認するため、コイル成型後には必ず規定のサイズまでコイルを押した状態でコイルプリストレスを測定して、コイルの寸法管理を行った。その仕様値は冷却によって失う20 MPa と励磁によって失う30 MPa から最低値を50 MPa とし、コイルの絶縁やプラスチックカラーのアライメントタブの機械強度等から最高値を120 MPa に設定した.

3.4 プラスチックカラー

プラスチックカラー(図4)は住友ベークライト製のガラス繊維補強されたフェノールプラスチック PM9640 を圧縮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, 鉄ヨークに対する非対称コイルのポール位置精度を決定する重要な役目を持つ. 圧縮成型及びポストベーキング時のパラメータの調整を繰り返し, 絶対精度で±0.1 mm 以下を達成している. 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, 磁石製造の経済性の最適化に貢献している.

3.5 鉄ヨーク

鉄ヨークの1単位は、厚さ6mmの固定用ヨーク と 5.8 mm のスペーサーヨークを 2 枚おきに交互に積 み重ねて厚さ約240 mmのスタック状にし、精度良 いスタックチューブ4本で冷やし嵌めして組み立て た構造をしている.磁石1台には、これらヨークス タック上下15組が必要となる. 固定用ヨークには キーを差し込む溝のついた爪がついていてこれがスタ ックに組んだ時には櫛上にスタックから突き出る. 上 下のヨークはこの櫛上の爪が交互に差し込まれるよう に組んであり、ヨークをコイルに組み付ける際には交 互に差し込まれた爪のキー溝が直線状に並びそこに キーを差し込んで上下のヨークを固定する. この工程 ではヨークを仮組されたコイルは、プレスの中で上下 ヨークを押すことで圧縮され最終的にヨークが固定さ れた状態で規定サイズまで押し込まれてプリストレス がかけられる. ヨーク組み立て時の写真を図5に示す.

3.6 シェル溶接及び最終組み立て

磁石には、ヘリウム容器外層となる厚さ 1 cm のシェル (SUS304L) をヨーク外側に取り付けられる. 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がなされる (図 6) 11 . 溶接部の X 線検査を行った後、磁石両端には

コイル端部を拘束する端板及び端板を固定するエンドリングが取り付けられる。またリードエンド側の端板には上下のコイルリードを接続するスプライスボックスが取り付けられる。シェル表面にはヨーク肩を基準に0.1 mm の精度でアライメントマーカーを取り付け、磁石の直線度の確認及び、クライオスタット組み込みの際の磁石位置基準として用いられる。完成後の磁石の直線度は0.3 mm で、これはビームライン要求からは十分なものである。

3.7 耐放射線性

この磁石は 0.75 MW と非常に大強度の陽子ビームを輸送するため磁石の耐放射線性が重要になる. ビーム光学的には大口径のビームアパーチャーを確保することで前段の常伝導磁石によるプリパレーション部と比較して 2 倍以上のアクセンプタンスをとった. またビームロス仮定を 1 W/m と仮定し,このロスで磁石各部への照射量を計算して 30 年の運転でもコイル周辺でも 1 MGy を超えないことを確認した. その上でコイル周辺の有機材料に対して照射試験を行い 1 MGy の照射に対して機械的特性,脱ガス特性ともに問題ないことを確認した12,13 照射は原子力機構高崎研究所の協力を得て,1300% 線照射施設で行った.

4. 量産および試験

製作された試作機は縦型クライオスタットで励磁試験を行い、50 GeV 定格の105%である7.7 kAまで自発的クエンチなしで励磁された.これは磁石が運転電流の中で十分なマージンがあり機械的にも安定であることを示す.また磁場測定も行われた.測定方法及び結果の詳細は参考文献¹⁴⁾に譲るが、高次多極成分は2極磁場の1/1000の範囲ではおおむね計算結果と合致した.これは新しい概念に基づく最初の試作機であることを考慮すると良く一致していると評価される.またこの結果は、ビームラインの要求からは十分な磁場性能であったのでコイル形状の再チューニング等のフィードバックは行わず、この設計で実機の量産に進んだ.

4.1 磁石量産

磁石は2004年初頭までにプロトタイプの開発をKEK内部で終了した。その後、KEKで開発された製造技術に基づいた構造仕様による実証機および量産機の入札がそれぞれ行われ、三菱電機が量産の契約を取った。量産は2005年度から始まり2008年度末までに予備機も含めて全ての量産を終了している。量産の履歴を図7にまとめる。磁石量産は、保護ヒーターに問題の生じた磁石が2台(1台は使用可、他の1台

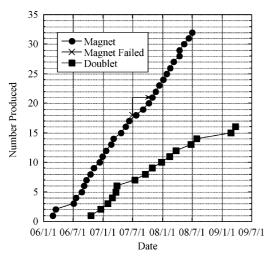


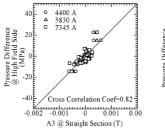
図7 磁石量産履歴. 18 台目 (図中の Magnet Failed) は分解再組み立てされた後, 21 台目に納入 (矢印)

表 2 室温磁場測定結果

Multipole	Integral Field@50 mm (Tm/kA)			
	Computed	Average	Std. Dev.	
B_1	-1.189	-1.184	22.56 • 10-4	
B_2	0.4280	0.4278	33.69 • 10-4	
B_3	$41.27 \cdot 10^{-4}$	$27.82 \cdot 10^{-4}$	$0.89 \cdot 10^{-4}$	
B_4	$-12.06 \cdot 10^{-4}$	$-10.84 \cdot 10^{-4}$	$0.85 \cdot 10^{-4}$	
B_5	$7.33 \cdot 10^{-4}$	$7.24 \cdot 10^{-4}$	$0.50 \cdot 10^{-4}$	
B_{6}	$-8.23 \cdot 10^{-4}$	$-7.65 \cdot 10^{-4}$	$0.65 \cdot 10^{-4}$	
A_1		$-42.22 \cdot 10^{-4}$	17.25 • 10-4	
A_2		$-1.45 \cdot 10^{-4}$	$2.57 \cdot 10^{-4}$	
A_3		$0.18 \cdot 10^{-4}$	$1.41 \cdot 10^{-4}$	
A_4		$-0.14 \cdot 10^{-4}$	$0.47 \cdot 10^{-4}$	
A_5		$0.08 \cdot 10^{-4}$	$0.49 \cdot 10^{-4}$	
A_6		$-0.12 \cdot 10^{-4}$	$0.58 \cdot 10^{-4}$	

は分解再組み立て:27 中 Magnet Failed)出た他は、問題なく予定通りに量産された 15).

全ての量産磁石は磁石磁場性能にとって重要なコイル長やコイルプリストレス等の機械特性について測定を行い仕様範囲であることを確認している。また全ての量産磁石は KEK で開発された磁場測定装置¹⁶⁾を用いて室温で低電流での磁場測定を行い、磁場性能が十分に仕様を満たしていることを確認してから出荷されている。この際、磁場測定プローブはレーザーを用いてアライメントを行い、磁場測定結果の座標系が磁石表面のアライメントマーカーから 0.1 mm の精度で定義される様にした。表2に室温磁場測定の結果をまとめたものを示す。



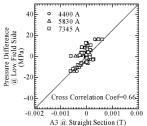


図8 磁場測定とコイルプリストレスの相関

4.2 磁石試験

全ての量産磁石は低温工学センターの第4低温棟にある縦型クライオスタットを用いたテストスタンドで試験された後、三菱電機に送り返されてクライオスタットに組み込まれた. 試験は定格の105%までの励磁、クエンチ保護ヒーターの検査、および磁場測定が主なものである. 測定結果の詳細は参照文献^{15,17)}に譲るが、代表的な測定性能を示すものとして磁場測定結果とコイルプリストレスの測定結果の相関を示すプロットを図8に示す¹⁵⁾.

ここで磁場測定結果はスキュー6極磁場を、プリストレスは上下コイルの差をとっている。結果はコイルサイズの制御が磁石磁場性能に大きく影響することを示している。ここで、スキュー6極で測定された値はビーム光学の観点からは全く問題ない量であった。これは、コイルプリストレスおよび磁場の測定はこの磁石に必要とされる磁場精度を制御する上では十分な精度があったことを示す。また、他の磁場成分も十分に仕様の範囲内に入っており、磁石の製作精度は十分に精度の高いものであった。

5. 超伝導システム

5.1 ビームライン構成

ビームライン構成を図9に示す.2組の磁石をそれぞれ,リードエンドをクライオスタットの出口側に向けておくことによって2極磁場は同じ向きだが4極磁場は極性が反転する様にしてある.これによって1つのクライオスタットで光学的なダブレットが構築される.ビームラインはこのダブレットを14台並べて構成される.ダブレットの間にはインターコネクトと呼ばれる短いクライオスタットを挟み,ここは場所によってクエンチ放出弁,ビームモニター,または補正磁石といった個別の機能を持っている.

5.2 励磁回路

励磁回路を**図10**に示す.全ての磁石は1つの電源(8kA,10V)によって直列に励磁される.超伝導磁

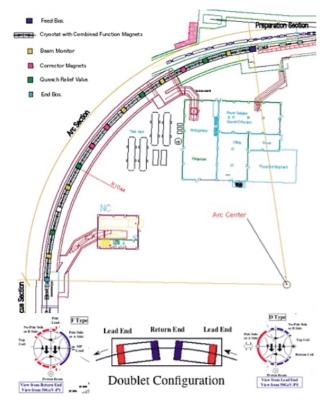


図9 ビームライン構成

石はクエンチによるオーバーヒートから保護される必要があるがそれはコールドダイオードによる励磁電流のバイパスと、そのバイパスを補佐するクエンチ保護ヒーターによってなされる^{14,15)}. クエンチ検出はフランス CEA Saclay で開発された Magnet Safety System (MSS) を用いていて、ここからのトリガーでクエンチ保護ヒーターや電源遮断回路が起動される. またビーム受け入れに必要な条件の検出も MSS によってなされ、必要に応じて Beam Abort や Beam Inhibit が MSS から発報される.

5.3 クライオスタット

超伝導磁石システムを構成するクライオスタットは、前述のダブレットクライオスタット(Two in One Cryostat)が主となる。その他にはダブレットの間にビーム位置補正用コレクター超伝導磁石、ビームモニター、並びにクエンチリリーフ弁などの補機類を設置するインターコネクトクライオスタットが13台設置される。またシステムの両端には地上部冷凍機から極低温へリウムを輸送するトランスファーライン(TRT)の接続点でなおかつ上流部常伝導磁石との接続点となるフィードボックス、並びに冷却系の戻り配管を内包し下流部常伝導磁石との接続点となるエンドボックスがある。

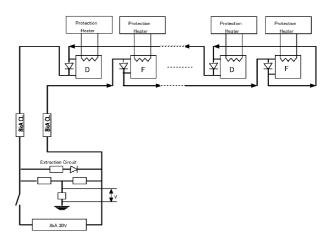


図10 励磁回路とクエンチ保護

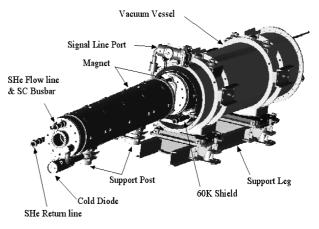


図11 クライオスタット鳥瞰図

超伝導磁石システムの主要なコンポーネントである ダブレットクライオスタットの鳥瞰図を図11に示 す¹⁸⁾. クライオスタットの基本構造は LHC のアーク のダイポールクライオスタットの設計を踏襲し、極力 同じ部品を使用した. これは、同時期に5000台以上 のクライオスタットを量産している LHC の量産効果 を期待し, クライオスタットの主要部品の経済性を最 適化するためである. LHCと共通化したクライオス タットの部品は、磁石を支持する FRP 製サポートポ スト, 輻射による熱侵入を軽減するための輻射シール ド用アルミ製押し出し材, 断熱真空層を構築する真空 容器、真空容器を相互に接続するためのコネクション ベローズ、超伝導磁石のプロテクションダイオードユ ニットの5点である. サポートポスト, コネクショ ンベローズ,プロテクションダイオードの3点は KEK と CERN との協力関係に基づき、 CERN が製 造会社に発注し受け入れ検査が終了した機材が KEK に引き渡された.一方,輻射シールド用押し出し材並 びに真空容器の2点については、CERNから提供された図面を基にKEKの責任において設計変更を行い、KEKがコンポーネントを製作している製造会社に発注を行った。受け入れ検査はCERNの協力を得てKEKの担当職員が行った。

ダブレットクライオスタットは、超伝導磁石1台を内包する長さ約3.7 m、直径約1 mの2つの真空容器が2.88 度の相対的な曲げ角を持って接続されている.2つの真空容器はベローズ含む長さ約1.1 mの中間接続部でつながれていてお互いに±1 mm程度の範囲で独立にアライメントできる様になっている。全てのダブレットクライオスタットは同一の構造を持ちスペアを効率的に用意できる様にしている.

磁石は真空容器内で2台のサポートポストによって支持され、真空容器内壁との間が断熱真空層となっている。この際に磁石は真空容器の外側につけられているアライメントターゲットに対して、精度よく設置されると同時に、冷却時の熱収縮に対応できる必要がある。熱収縮は室温 $300~\rm K$ から $4~\rm K$ の間で、サポートポスト間が約 $6~\rm mm$ 縮み(ダブレット全長では配管も含めて約 $36~\rm mm$)、磁石中心は約 $1~\rm mm$ 下がる。このためクライオスタット内の超伝導磁石の設置方法に関して次の対策を行った。

- (1) 超伝導磁石1台を支持する2個のサポートポストについてダブレット中心側を固定支持点,端部側をスライド支持点とし,磁石の収縮を吸収できる様にする.また磁石を連結する低温配管にもベローズを入れて熱収縮を吸収.
- (2) 固定支持点側に室温で磁石を設置する際に熱収縮分を考慮にいれたオフセットをとって設置.
- (3) 高さ方向(y方向)については、室温設置時に 冷却時沈降量1mmをオフセット値として考慮.

(1)~(3)については、超伝導磁石の圧力容器を構成するシェル表面上に取り付けられたアライメントマーカーを利用して真空断熱容器への設置を行った。この設置のため、真空容器表面には LHC の基本設計には無い設置観測用フランジがクライオスタット 1 台につき周方向 0 度、90 度、270 度の位置に各 2 箇所計 6 箇所取り付けられている(ダブレットクライオスタットでは計12箇所となる)。設置時にはこの窓を用いて磁石を ± 0.1 mm の設置精度で設置した。また製作したダブレットの最初の 2 台は KEK 超伝導低温工学センターで冷却試験を行い、窓からアライメントマーカーを直接光学的に測量することによって冷却による移動量が想定の範囲内であることを確認した(図 12)。

インターコネクトクライオスタットについては,

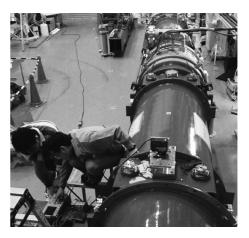


図12 レーザー距離計による冷却中磁石の相対位置測定

KEK 独自の設計を行っている。インターコネクトクライオスタットには前述したように補機類が個別に設置される。その数量は、コレクター超伝導磁石ユニットが3台、ビームモニターユニットが4台、クエンチリリーフ弁ユニットが4台、ダミーユニット1台の計13台である。ここでも各ユニットに使用する機構部品についてコストダウンを計るために可能な限り共通化した設計を行っている。インターコネクトとダブレットの間の接続はビームライントンネル内で行われ、特に真空容器は長さ約1mのコネクションベローズによって接続される。

5.4 冷却系

冷却系のフローを図13に示す.冷凍機は1.2kW,4.5 K の冷凍パワーを持ち,サブクーラーの超臨界ポンプで圧力0.4 MPa 流量300 g/s 温度4.5 K のヘリウムを強制対流させて磁石を冷却する.冷凍機と地下トンネルの磁石システムは長さ約100 m のトランスファーラインでつながれている.トランスファーラインは4重管になっていて,超臨界へリウムおよびシールド用の中間温度へリウムガスを循環させる.またトランスファーラインの往きラインには超伝導ブスバーが設置され磁石への電流供給を担っている.

磁石クエンチ時にはインターコネクトのクエンチリリーフ弁からヘリウムを放出ラインに逃がし圧力上昇を 1.4 MPa 以下に抑える. 放出されたヘリウムは地上部のバッファータンクに回収され, 再冷却時に利用される.

クエンチリリーフ弁は、本超伝導ビームラインの建設にあたって開発されたもので、外部からの設定用ガス圧により開閉動作圧力が任意に設定可能である.これは、高放射線環境下でのメンテナンスが最小になるよう従来の弁類が内包している半導体部品やゴム部品

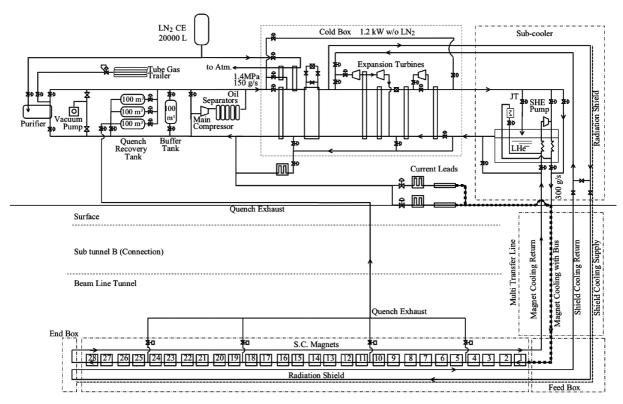


図13 冷却フロー図

を排除した設計が行われている.

6. 建設および試運転

6.1 建設

設置作業は 2007 年の夏から始まり、メインリングの試運転を挟み、2 期に分けられた工程計画により進められ、2008 年の 12 月には終了した.

この作業期間中に, ダブレットクライオスタット, インターコネクトクライオスタット, エンドボックス 並びに 10 台のユニットに分割されたトランスファー ライン並びにダブレットクライオスタットとトランス ファーラインのインターフェースであるフィードボッ クスと呼ばれるクライオスタットが設置された. また 超伝導ブスバーのハンダ付け, 低温配管の溶接接続, 接続部の輻射シールドの組み立て、コネクションベ ローズによる真空容器間の接続も期間内に行われた. 設置が完了したダブレットクライオスタットとイン ターコネクトクライオスタットは、適宜レーザートラ ッカーによる設置アライメント作業を行なわれ、その 設置位置の確認を行っている. アライメントはトンネ ル内の基準点を基に設置精度 0.1 mm を目標に行われ た. 図14は2008年夏にアライメントを行っている ときのトンネル内での様子である.

各機器の設置作業が終了した同年12月には、冷凍

機単体での性能試験が行われ、仕様性能である冷凍能力 1.5 kW/4.5 K を十分に満たすことが確認された.

6.2 冷却系試運転19,20)

超伝導磁石群とトランスファーラインも含めた総合 試運転は 2009年1月初旬から行われた. 図15 は冷却開始から完了までを時間に対して磁石の温度でプロットした冷却カーブである. 図から, 地下の超伝導磁石群が約10日間で冷却完了したことが判る. この間, 大きなトラブルも無く, 順調に冷却が行われた. この冷却が終了した後, 超伝導磁石群の性能確認試験に必要な冷凍機制御系のインターロック確認試験を行い, 磁石群の性能確認試験に移行した.

6.3 複合磁場磁石試運転^{20,21)}

冷却終了後は、磁石の各種安全確認を行いながら、 励磁電流を徐々にあげていき、30 GeV 運転での定格 電流である 4400 A を達成した後、4400 A でのクエ ンチ試験を行った。図 16 はクエンチ時の磁石電流(I _Mag)と磁石の両端電圧(QDXXX)をプロットし たものである。QDF03、QDF04、QDD03、QDD04 は クエンチ保護ヒーターによって強制的にクエンチさせ られた磁石で、QDD01(およびそれ以外の全ての磁 石)はクエンチしていない。

プロットはクエンチした磁石でダイオードによるバイパスが起きていることを明確に示していて, その時



図14 トンネル内設置作業

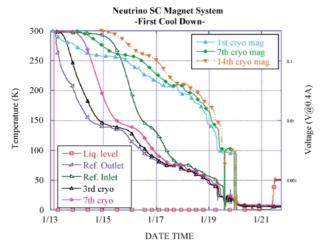


図15 磁石冷却カーブ

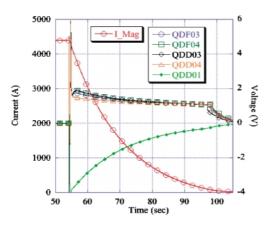


図16 クエンチ時磁石電圧

のON電圧、クエンチ後の順電圧、バイパスのタイ ミング全てが期待通りで磁石が十分に保護されている ことを示している.

図17はクエンチ後の磁石の再冷却の様子を示すも ので、磁石電流(赤ヘシンボル)が 4400 A まであが った後ヒーターによるクエンチで急速に立ち下がって

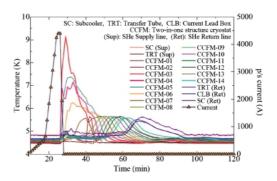


図17 クエンチ後再冷却カーブ、クエンチ後のシステム 各部の温度変化を示す. 電流が 4400 A から急激 に下がっている時間がクエンチしたした時間

いる. その後, クエンチした磁石の下流の磁石が順々 に加熱されては再冷却していく様子が分かる. クエン チ後の再冷却には4台クエンチでは約2時間程度で あることがわかる. 通常のクエンチにおいては4台 ずつのパッケージでクエンチを検出して保護ヒーター を焚くので、4台ずつのクエンチが通常のクエンチと なる.

クエンチ試験は全数磁石のクエンチに関しても行っ ていてクエンチ保護的には温度上昇も圧力上昇も問題 ないことは確認している. ただしクエンチ復帰は約6 時間かかった.

6.4 補正磁石試運転

補正磁石はビーム上流から数えて3,7,8番目イン ターコネクトにそれぞれノーマルとスキューの2極 が設置されている. 磁場強さは積分値で $2.3\,\mathrm{mT/m/}$ A である. 定格最大積分磁場は 0.1 T/m でその時の 電流値は43 Aである。それぞれの補正磁石について 定格最大磁場までの励磁を試みたが、残念ながら全て の磁石が13A前後の電流値でクエンチと思われる現 象によって遮断されてしまった. 原因は現在究明中で ある.

ビームコミッショニング 7.

7.1 ビーム特性の複合磁場磁石電流依存性22)

ビーム試験は MR からの 30 GeV の陽子ビームを 用いて行われた. ビームはほとんどの場合に於いて単 発での入射が行われ、その強度は約1.8kJ相当であ った. ビーム試験に於いてはビームの中心位置および サイズの複合磁場磁石電流依存性を調べた. ここでは 複合磁場磁石の運転電流を 4436 A から段階的に下げ ながらビームを通して、それぞれの電流値でビームの 中心位置およびサイズが超伝導部に於いてどう変化し たかを測定した. 図 18 にビーム位置,図 19 にビーム

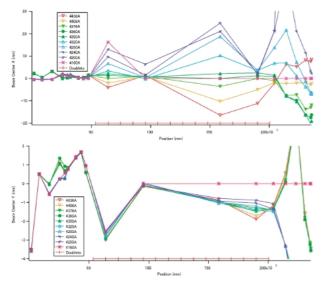


図18 ビーム位置の複合磁場磁石電流依存性.赤い軸が超伝導部を、その目盛りがダブレットの境界を示す

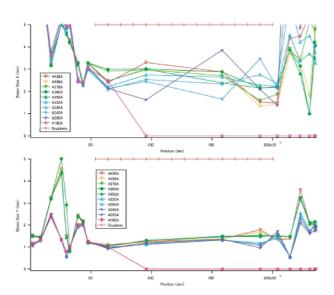


図19 ビームサイズの複合磁場磁石電流依存性

サイズの複合磁場磁石電流依存性を示す.

図 18 から水平方向(X)でのビーム位置は運転電流約 4360 A でほぼ軌道の真ん中を通っていることがわかる. また図 19 から運転電流 4360 A 付近では超伝導部でのビームサイズが比較的一定で、収束磁場のマッチングがとれていることを示唆している. これらの結果から複合磁場磁石の偏向磁場と収束磁場の比率は光学的に望ましい値をとっていると推測される.

7.2 ビーム特性の補正磁石電流依存性

ビーム試験では $\pm 5 A$ の範囲でビームの応答を確認した。補正磁石をそれぞれの位置で $\pm 5 A$ に設定し、

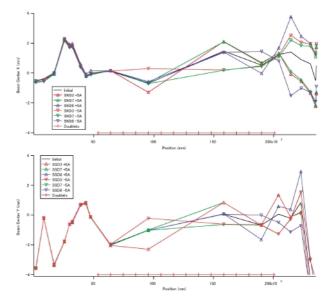


図20 ビームサイズの複合磁場磁石電流依存性

ビームの中心軌道の変化を測定した結果を20 に示す.軌道補正は5 A で約1 mm 程度で,ほぼ計算通りであった.現状のアライメント精度は年間の変動幅を考慮にいれても ± 1 mm 程度には十分収まっているので10 A まで励磁できれば,現状での運転には大きな支障にはならないと考えられる.将来的には定格運転を目指して補修を行っていく予定である.

7.3 ビームロスによるクエンチ試験22)

上記試験は複合磁場磁石の運転電流を下げていって、最終的にはビームが超伝導部でビームチューブにあたって完全に失われるまで行った。ビームが完全に失われた電流は $4160\,\mathrm{A}$ で、ロスモニター等からビームロスは 2 番目のダブレットの収束磁石部(下流側)で約 $400\,\mathrm{J}$ 程度、3 番目のダブレットの収束磁石部で1.2 kJ 程度と推定された。またビーム計算からビームはどちらも磁石の高磁場側に近いサイドでビームチューブにあたったと考えられる。このビームロスによって 3 番目のダブレットの収束磁石がクエンチした。ここから $30\,\mathrm{GeV}$ 運転では磁石クエンチに必要なビームロスは $400\,\mathrm{J}$ から $1.2\,\mathrm{kJ}$ の間と考えられる。この値は計算から推定された値 23 と矛盾しない。

8. 結論

ニュートリノビームライン超伝導複合磁場磁石システムは2008年末に予定通り建設を完了し、直ちにハードウェアコミッショニングに入った.システムは、補正磁石の励磁電流値をのぞけば、ほぼ予定通りの性能を満たしていることが確認できた.2009年4月からは予定通りビーム運転に入り、ビーム運転に支

障のないことが確認されている. 現在(2009年11月末)2回目のビーム試験を開始していて60kJ程度のビーム運転に成功し,ニアデテクターでのニュートリノ検出にも成功している. 2010年夏まで間のビーム運転では3.5秒周期で最大100kWのビーム受け入れを目指す.

謝辞

このシステムの開発にあたっては KEK, JAEA, BNL, CERN, CEA Saclay 他の数多くの人々から,多大なるご支援を頂きました.またシステムの建設には三菱電機,大陽日酸他多くの民間会社の多大なるご努力がありました.ここに感謝の意を表したいと思います.

参考文献

- 1) M. Furusaka et al., "The joint project for high-intensity proton accelerators", *KEK Report 99–1; JAERI–Tech 99–056; JHF–99–3*, 1999.
- 2) Y. Itow et al., "The JHF-Kamioka neutrino project", hep-ex/0106019.
- 3) T. Ozaki, et al., private comunications, Mar, 2002.
- 4) T. Ogitsu, et al., "Magnetic Design of FFAG Superconducting Magnets", workshop on FFAGs for Muon Acceleration, URL: http://www.cap.bnl.gov/mumu/ conf/ffag-021028/, Berkley, CA, Oct. 28~Nov. 8, 2002.
- 5) T. Obana, et al., "Magnetic Design of a FFAG Super-conducting Magnet", *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, **149**, 283–285 (2005).
- T. Ogitsu, et al., "Superconducting Magnet System at the 50 GeV Proton Beam Line for the J-PARC Neutrino Experiment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, 604-607, 2004.
- 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.
- 8) 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.
- 9) T. Nakamoto, et al., "Development of Superconducting Combined Function Magnets for the Proton Transport Line for the J-PARC Neutrino Experiment", Proc. of 2005 Particle Acc. Conf., pp. 495-499, 2005. URL: http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p05/PAPERS/TOAA006.PDF
- T. Nakamoto, et al., "Development of Superconducting Combined Function Magnets for the J-PARC

- Beam Line", 第3回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 67-69, 2006.
- 11) 安島泰雄,「粒子加速器・物理実験用超伝導低温機器 における TIG 自動溶接技術の開発」http://www.kek. jp/newskek/2007/marapr/07gijyutsusyo.html
- 12) T. Nakamoto, et al., "Mechanical Properties of Organic Materials Used in Superconducting Magnets Irradiated by Gamma Rays at Liquid Nitrogen Temperature", To be published in Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 52, 2006.
- 13) A. Idesaki, et al., "Evolved Gases Organic Materials Used in the Superconducting Magnets Irradiated by Gamma Rays at Liquid Nitrogen Temperature", To be published in Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 52, 2006.
- 14) K. Sasaki, et al., "Test Results of Superconducting Combined Function Prototype Magnets for the J-PARC Neutrino Beam Line", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, **16**, 158–163 (2006).
- 15) T. Okamura, K. Sasaki, T. Tomaru, et al., "Test Results of Superconducting Magnets for the J-PARC Neutrino Beam Line", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, **19**, 1125–1130 (2009).
- T. Tomaru, K. Sasaki, Y. Ajima, T. Nakamoto, T. Ogitsu and A.Yamamoto, "Alignment and warm measurements of the J-PARC combined function magnets", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 16, 1338–1441 (2006).
- 17) K. Sasaki et al., "Test results of superconducting combined function magnets for the J-PARC neutrino beam line", IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 17, no. 2. 1083–1086 (2007).
- 18) T. Ogitsu, et al., "Status of Superconducting Magnet System for The J-PARC Neutrino Beam Line", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, **19**, 1081–1086 (2009).
- 19) Y. Makida, et al., "Cryogenic system for J-PARC neutrino superconducting magnet beam line Design, construction and performance test", to be submitted to CEC/ICMC 2009, Tucson USA, June 28–July 2 2009.
- 20) T. Okamura, et al., "Cryogenic performance of superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line", to be submitted to CEC/ICMC 2009, Tucson USA, June 28-July 2 2009.
- 21) K. Sasaki, et al., "Commissioning Results of Superconducting Magnet System for the Neutrino Beam Line", to be submitted to MT-21, HeFei China, Oct. 18-23 2009.
- 22) T. Ogitsu, et al., "Commissioning of Superconducting Combined Function Magnet System for J-PARC Neutrino Beam Line", 第 6 回加速器学会年会提出.
- 23) Y. Iwamoto, et al., "Quench Stability against Beamloss in Superconducting Magnets at the 50 GeV Proton Beam Line for the J-PARC Neutrino Experiment", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 14, No. 2, 592–595, 2004.