

# J-PARC ニュートリノビームライン用 超伝導複合磁場電磁石システムの開発

高エネルギー加速器研究機構

超伝導低温工学センター 素粒子原子核研究所

荻津 透 榎田 康博

toru.ogitsu@kek.jp yasuihiro.makida@kek.jp

2009年8月21日

## 1. はじめに

J-PARC[1]ニュートリノビームライン[2]ではメインリングから出射された陽子ビームを神岡方向に曲げるためのビームラインに全長150mの超伝導磁石システム[3]を用いている。このシステムでは実用超伝導磁石では世界初となる単層の左右非対称コイルを用いた複合磁場磁石が用いられている。システムは2008年の12月に現地工事を完成し[4]、翌年1月から3月の間にハードウェアコミッショニング、4月から5月にかけてビームコミッショニングを行った。コミッショニングの結果、ほとんどのハードウェアがほぼ期待通りの振る舞いをしていることが確認され、秋以降からの本格運用に向けて必要な性能確認を行うことができた。

## 2. システム構成

システムの概要を図1に示す。超伝導複合磁場磁石[5,6,7]は左右非対称な単層コイル一對を上下に組み合わせて7350Aの運転電流で偏向磁場2.6T、収束磁場勾配1.86T/mの複合磁場を作り出す。コイルはプラスチックカラーで絶縁された後、鉄ヨークによって機械的に支持される。鉄ヨークの外側には、ヘリウム容器となる厚さ10mmのSUS304Lのシェルが取り付けられる。磁石は一つのクライオスタットに二つずつ左右の向きを逆転して設置される。これによって偏向磁場は同じ向きだが、収束磁場が逆転する様になり、二つで水平方向に逆収束/収束の光学的ダブルレットを構成する。ダブルレットクライオスタットはビーム

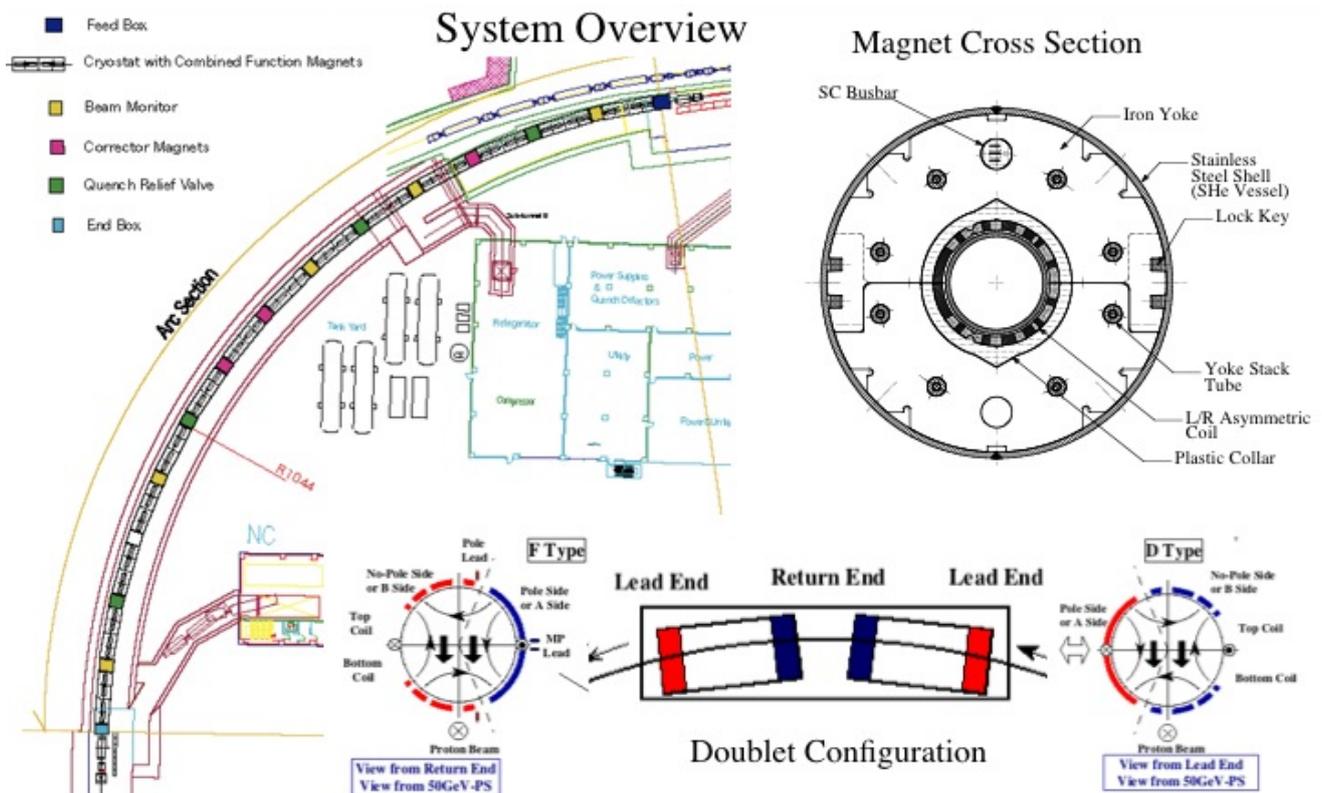


図1: システムの概要; 左にビームライン概要, 右に磁石断面, 下にダブルレットの構成を示す。

ラインに沿って 14 機設置される。またクライオスタットの間にはインターコネクトと呼ばれる長さ約 40 cm のクライオスタットが入り、場所によって中に入る構成要素が変わる。構成要素は、クエンチ放出弁、ビームモニター、ステアリング磁石などとなり、その位置は図 1 に示される通りである。クエンチ放出弁は、上流から見て、2, 5, 9, 12 番の位置に設置し、クエンチ時の圧力分散を図っている。ビームモニターは 1, 4, 6, 10, 13 番の位置に入るが、このうち 6 番にはビームポジションモニターだけが入り、その他にはビームポジションモニターとビームプロファイルモニターが入る。ステアリング磁石は 3, 8, 9 番の位置に入り、それぞれの位置に水平垂直それぞれの方向に対するステアリング磁石が入る。

冷却系の概念図を図 2 に示す。すべての磁石は冷却配管で直列接続され、その中を超臨界ポンプで圧送される超臨界ヘリウムが 300 g/s で流れる。超臨界ヘリウムはクロードサイクル冷凍機でサブクーラーの中に生成される液体ヘリウムの中で 4.5 K に冷却される。またステアリング磁石は超臨界ヘリウム配管から間接的に冷却される[8]。また磁石クライオスタットで 60 K 近傍の中間温度での熱絶縁をとるシールドのために 60 K のシールド用ヘリウムガスも冷凍機から供給される。冷凍機システムと地下部の磁石システムの間は約 100 m のトランスファーラインと呼ばれる断熱真空配管によってつながれている。この中には超臨界ヘリウムおよび 60 K シールドガスの往復用のラインが存在する。またトランスファーラインの地上部にはカレントリードボックスと呼ばれる 8 kA の電流導入端子を持つ接続ボックスがある。カレントリードボックスから導入された電流は超臨界ヘリウムの往路に設置された超伝導ブスバーによって複合磁場磁石システムまで供給される。

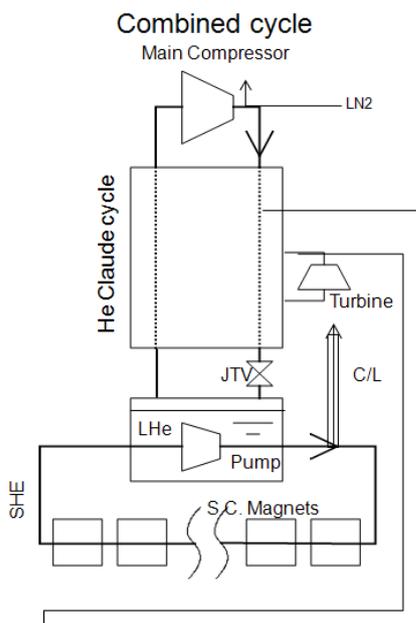


図 2 冷却系概念図

励磁回路の概要を図 3 に示す。すべての複合磁場磁石は一つの電源 (8 kA, 10 V) によって直列に励磁される。超伝導磁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行われる。クエンチ保護ヒーターによってコイルのクエンチは加速され、磁石両端の電圧上昇が加速されることによって、より早いバイパスが実現される[9]。これによって磁石電流は約 1 秒で減衰する。また電源側にはコールドダイオードや超伝導ブスバーの保護を行うための遮断回路が取り付けられている。この遮断回路は約 20 秒の時定数でシステムに流れる電流を落とす。

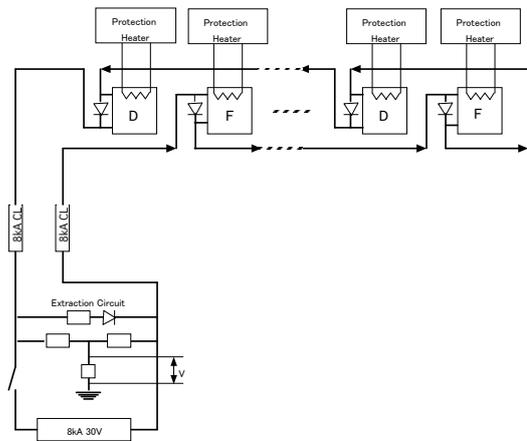


図 3 励磁回路概念図

### 3. システム単体性能試験

#### 3.1 冷却性能試験

システムの単体性能試験はまず冷却性能試験[8,10]から行われた。冷凍機は超臨界ヘリウムを 300 g/s 流した状態で実効的に約 1.2 kW の冷却能力（冷凍機単体能力 1.5 kW - 超臨界ポンプロス 300 W）を保持することが確認された。これに対してシステムの全熱負荷は約 280 W（熱負荷 220 W + カレントリード流量 0.5 g/s）で十分なマージンがある。室温から極低温の定常状態までの冷却時間は 10 日以下であった。また、超臨界ヘリウム流路の圧力損失もほぼ想定通りであった。

#### 3.2 クエンチ保護試験

クエンチ保護試験[9]は、複合磁場磁石において強制トリガーをクエンチ検出システムに入力することによって行われた。通常クエンチはシステムの中の 1 台だけに発生する機会が多いが、この場合はシステムはその磁石を含む 4 台の磁石のクエンチ保護ヒーターを焚いて 4 台まで強制クエンチを行う。クエンチ保護システムは予定通りクエンチ保護

操作を行い、磁石はクエンチに対して安全に保護されていることが確認された。クエンチ後のシステムの再冷却は、定常状態に復帰するまでに約2時間かかった。またビームが全長にわたってばらまかれるような極端な場合においては28台の磁石全体がクエンチすることも考えられる。これを模擬した試験も行ったが、クエンチ保護に問題はなかった。またこの場合における再冷却時間は約6時間であった。複合磁場磁石システムにはクエンチ時の圧力上昇を抑えるためにクエンチ放出弁(KIMURA弁)が5個取り付けられている。クエンチ試験では、4台クエンチでも全数クエンチでも、放出弁は予定通り機能し、圧力上昇も想定内に抑えられたことが確認された。

## 4. ビームコミッシング

### 4.1 ビーム特性の複合磁場磁石電流依存性

ビーム試験はMRからの30GeV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お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。ビーム試験においては、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4436A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おいてどう変化したかを測定した。図4にビーム位置、図5にビームサイズの複合磁場磁石電流依存性を示す。

図4から水平方向(X)でのビーム位置は運転電流約4360Aでほぼ軌道の真ん中を通っていることがわかる。また図5から運転電流4360A付近ではビームサイズの超伝導部での変化が比較的少なく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現段階では推測される。

今回の試験結果はあくまでペインティングする前の非常に細い、定格の1/1000という強度での試験である。定格運転で超伝導部に問題が出ないかどうかは、この秋以降の、ペインティングした強度定格1/10程度のビームでの試験の結果を待つ必要がある。

### 4.2 ビームロスによるクエンチ試験

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4160Aで、ロスモニターなどからビームロスは2番目のダブレットの収束磁石部(下流側)で約400J程度、3番目のダブレットの収束磁石部で1.2kJ程度と推定された。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コイルの高磁場側のサイドからクエンチをした。ここから、30GeV

運転では磁石クエンチに必要なビームロス量は400Jから1.2kJの間と考えられる。この値は3.6秒周期の運転では100~300W程度のロスとなり、計算から推定された値[11]と矛盾しない。上記結果は、複合磁場磁石のクエンチはビームロス次第であることを示す。クエンチによる実験時間のロスを防ぐためには安定な加速器および一次ビームラインの運転が必須となる。

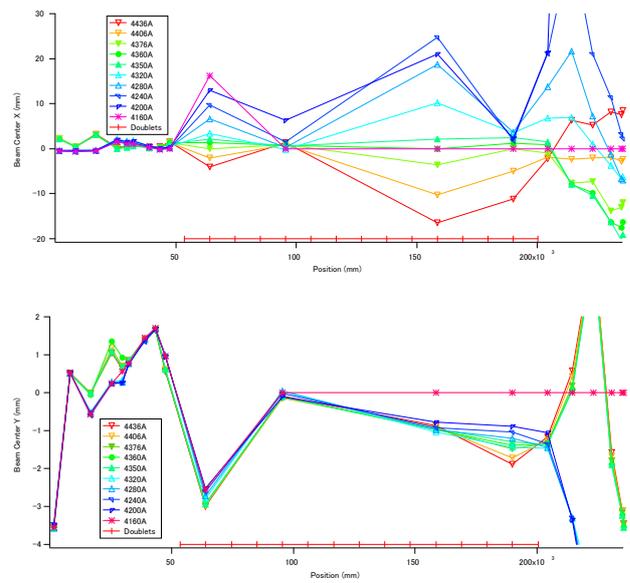


図4：ビーム位置の複合磁場磁石電流依存性

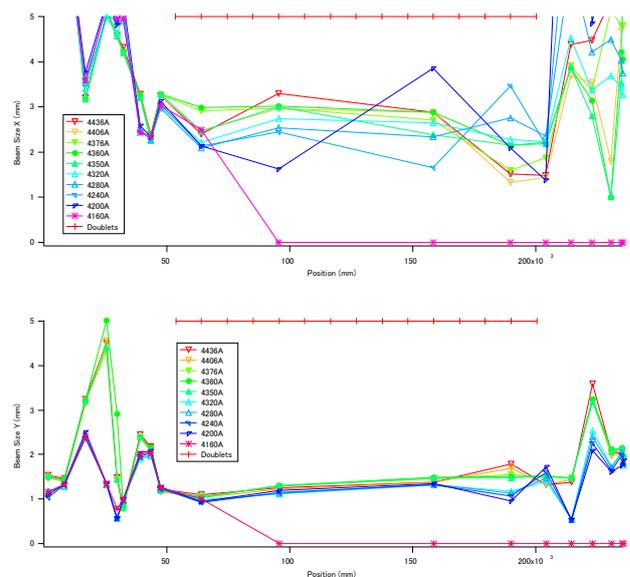


図5：ビームサイズの複合磁場磁石電流依存性

図の上部の目盛りを刻んだ横線(赤色)が超伝導部を示し、その目盛りはダブレットの境界を示す。

## 5. 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、その中での性能試験に置いてもほぼ予定通りの性能を満たしていることがわかった。システムはこれらの性能試験の中で確認されたいくつかのマイナーな瑕疵について夏の間に改修を行い、2009年10月から始まるビーム運転に向けて準備中である。10月からのビーム運転ではペインティングされた大強度ビームの受け入れも始まり、2010年夏までには100kWビーム受け入れを目指す。

## 6. 謝辞

このシステムの開発にあたっては KEK, JAEA, BNL, CERN の数多くの人々から、ご支援、ご助言をいただきました。またシステムの建設には三菱電機、太陽日酸他多くの民間会社の大きな努力がありました。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 (2001).
- [3] T. Ogitsu *et al.*, “Superconducting Combined Function Magnet System for J-PARC Neutrino Experiment,” IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, **15**, 1175-1178 (2005).
- [4] T. Nakamoto *et al.*, “Construction of Superconducting Magnet System for the J-PARC Neutrino Beam Line,” to be submitted to MT-21, HeFei China, Oct. 18 – 23, 2009.
- [5] 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).
- [6] 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>
- [7] 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).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Y. Iwamoto *et al.*, “Quench Stability against Beam-loss 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).