

## Commissioning of Superconducting Combined Function Magnet System for J-PARC Neutrino Beam Line

Toru Ogitsu<sup>A)</sup>, Yasuo Ajima<sup>A)</sup>, Yoshiaki Fujii<sup>A)</sup>, Takuya Hasegawa<sup>A)</sup>, Norio Higashi<sup>A)</sup>, Masahisa Iida<sup>A)</sup>, Takanobu Ishii<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kimura<sup>A)</sup>, Takashi Kobayashi<sup>A)</sup>, Yasuhiro Makida<sup>A)</sup>, Takeshi Nakadaira<sup>A)</sup>, Tatsushi Nakamoto<sup>A)</sup>, Hirokatsu Ohhata<sup>A)</sup>, Takahiro Okamura<sup>A)</sup>, Ken Sakashita<sup>A)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>A)</sup>, Masahiro Shibata<sup>A)</sup>, Kenichi Tanaka<sup>A)</sup>, Akio Terashima<sup>A)</sup>, Takayuki Tomaru<sup>A)</sup>, Akira Yamamoto<sup>A)</sup>, Atsuko Ichikawa<sup>B)</sup>, Hidekazu Kakuno<sup>C)</sup>, Nick Hasting<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Kyoto University, Yoshida-Honmachi Sakyo-ku, Kyoto

<sup>C)</sup> Tokyo University, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

### Abstract (英語)

The J-PARC neutrino beam line includes 150 m long superconducting magnet system that bends the proton beam from the main ring by about 80 degree toward Kamioka. The system consists of 14 doublet cryostats; each contains 2 superconducting 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. It is the first time that such magnets were actually be built and adapted to a real beam line. The system installation had been completed by the end of 2008. A commissioning of the system was started in December 2008 and completed in May 2009. The system commissioning includes cryogenics and magnet hardware commissioning as well as a beam commissioning. The paper summarizes the results of the commissioning.

## 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の コミッショニング

### 1. はじめに

J-PARC<sup>[1]</sup>ニュートリノビームライン<sup>[2]</sup>ではメインリングから出射し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<sup>[3]</sup>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。システムは平成20年の12月に現地工事を完成し<sup>[4]</sup>、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が行えた。本講演ではシステムのコミッショニングの結果について報告する。

### 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<sup>[5][6][7]</sup>は左右非対称な単層コイル1対を上下に組み合わせて7350 Aの運転電流で偏向磁場2.6 T、収束磁場勾配1.86 T/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をとられた後、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10 mmのSUS304Lのシェルが取り付けられる。磁石は1つのクライオスタット

に2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、2つで水平方向に逆収束/収束の光学的ダブレットを構成する。ダブレットクライオスタットはビームラインに沿って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、ステアリング磁石等となり、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計っている。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。

冷却は地上部のヘリウム冷凍機から4.5 Kの超臨界ヘリウムが300 g/sで供給され、複合磁場磁石は直接、またステアリング磁石は間接的に冷却される<sup>[8]</sup>。

クエンチ保護は複合磁場磁石がコールドダイオードとクエンチ保護ヒーター、またステアリング磁石は外部保護抵抗によってとられた<sup>[9]</sup>。

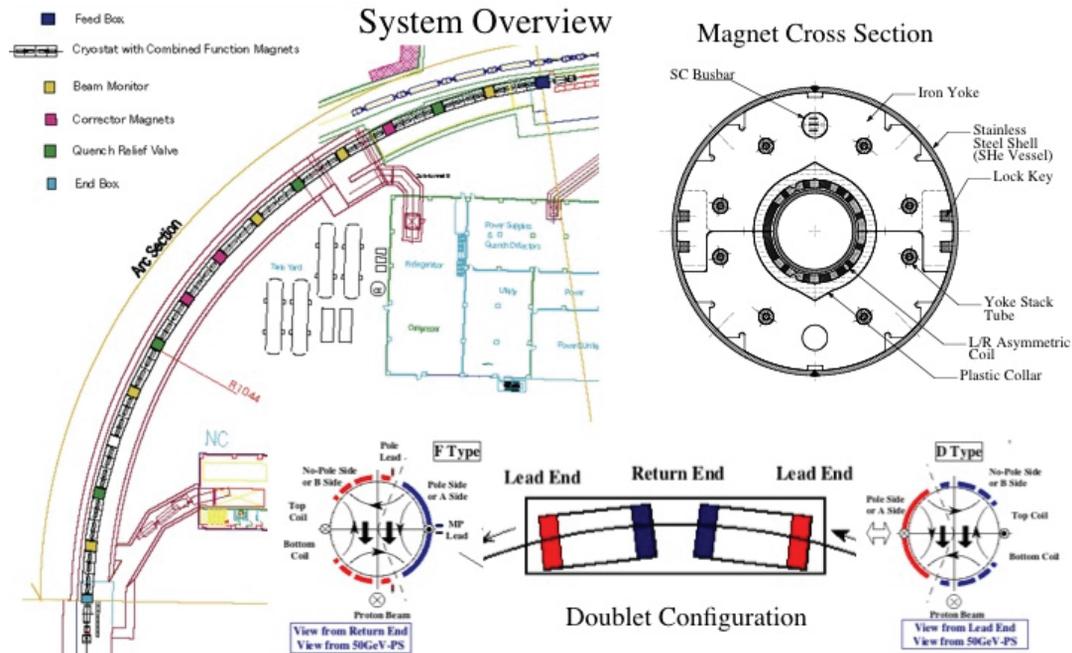


図1：システムの概要；左にビームライン概要，右に磁石断面、下にダブルットの構成を示す。

### 3. システム単体性能試験

### 4. ビームコミッショニング

#### 3.1 冷却性能試験<sup>[8][10]</sup>

システムの単体性能試験はまず冷却性能試験から行われた。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1.2kWの冷却能力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。また室温から極低温での定常までの冷却時間は10日以下であった。

#### 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1.8 kJ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

#### 3.2 クエンチ保護試験<sup>[9]</sup>

クエンチ保護試験は複合磁場磁石に於いて、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った。通常クエンチはシステムの中の1台だけに発生するケースが多いが、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までに約2時間かかった。またビームが全長に渡ってばらまかれるような極端な場合には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、クエンチ保護は問題なく行われた。またこの場合に於ける再冷却時間は約6時間であった。

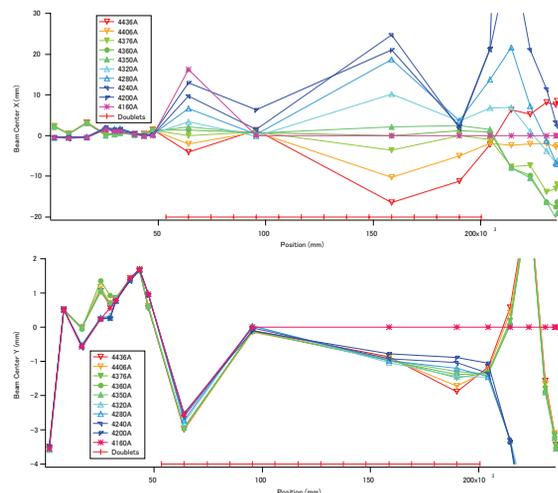


図2：ビーム位置の複合磁場磁石電流依存性。X軸上の赤い軸が超伝導部を示す。また赤い軸の目盛りがダブルットの境界を示す。

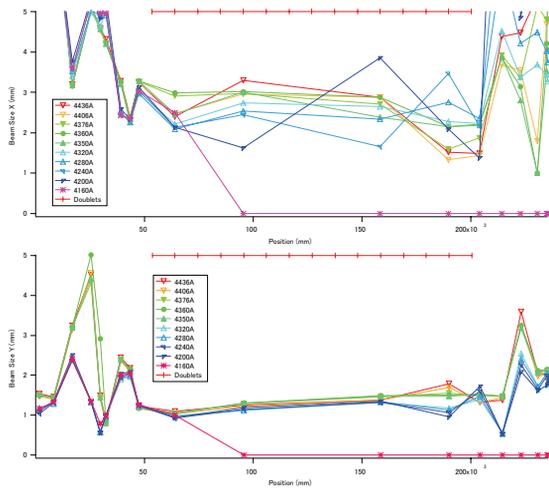


図3：ビームサイズの複合磁場磁石電流依存性  
プロット上部の赤い軸が超伝導部を示す。また  
赤い軸の目盛りがダブルットの境界を示す。

変化したかを測定した。図2にビーム位置、図3にビームサイズの複合磁場磁石電流依存性を示す。

図2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3から運転電流4360 A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推測される。

#### 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4160 Aで、ロスモニター等からビームロスは2番目のダブルットの収束磁石部（下流側）で約400 J程度、3番目のダブル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番目のダブルットの収束磁石がクエンチした。ここから30 GeV運転では磁石クエンチに必要なビームロスが400 Jから1.2 kJの間と考えられる。この値は3.6秒周期の運転では100~300 W程度のロスとなり計算から推定された値<sup>[11]</sup>と矛盾しない。

### 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幾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、ご助言を頂きました。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*.
- [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, June28-July2 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, June28-July2 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.