

## A SUPERCONDUCTING COMBINED FUNCTION MAGNET WITH SINGLE LAYER COIL WINDING

Toru Ogitsu, Tatsushi Nakamoto, Norio Higashi  
KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

A superconducting combined function magnet has been developed for the 50 GeV, 750 kW primary proton beam line of the J-PARC neutrino experiment. The magnet consists of a pair of left-right asymmetric single layer coils which produces a dipole field of 2.6 T and a quadrupole field of 19 T/m at a nominal operation current of 7345 A. The coils are covered by glass fiber filled phenol plastic collars providing physical alignment and ground insulation, and then encased in the iron yokes, which provide magnetic flux return as well as mechanical support. The left-right asymmetric structure is optimized such that stresses in the coils are well controlled. The aim to utilize the combined function is to realize the best cost-effective system. The arc section of the beam line consists of 28 identical combined function magnets.

### 単層超伝導コイルによる複合磁場磁石の開発

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構は、現在大強度陽子加速器 (J-PARC) <sup>[1]</sup> を共同で建設しているが、その中のニュートリノ振動実験施設<sup>[2]</sup>では、メインリングから出射された一次陽子ビームをターゲットに輸送するためのビームラインに超伝導磁石システムを利用する。ここでは28台の2極4極複合磁場超伝導磁石を用いることによってシステムの簡略化とコストの最適化をはかった。具体的には、2極磁石と4極磁石の2台の磁石 (コイル数は6) が必要だったダブルレットのハーフセルを、単層の左右非対称コイル2本からなる複合磁場型磁石1台で構築した。この磁石は荻津によって基本的な概念設計が提案され、中本が詳細な工学的検討、実験的検証を担い、東が製作技術を確立した。複合磁場磁石を単層の左右非対称超伝導コイルを用いて実現したのは世界的にも初めてのことである。本論文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、製作技術、及び応用面を含めた今後の展開についてまとめる。

#### 2. 複合磁場超伝導磁石への道のり

##### 2.1 従来の加速器用超伝導磁石

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。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キーストーン角のある矩形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やすく、また機械構造的にも安定である。このように作られた磁石においても、単機能のコイルを多層に組み合わせることによって複合磁場を構築する例はあったが、主たる磁場成分を作る主コイルに対して1桁以上弱い磁場強度の補正コイルを組み合わせる場合がほとんどであった。

##### 2.2 ニュートリノビーム用一次陽子ライン

ニュートリノビーム用一次陽子ラインでも当初、4 Tの2極磁石と36 T/mの4極磁石各20台で設計されたが、コストダウンに対する強い要請から、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<sup>[3]</sup>。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が困難であったことや、結果的にコストメリットが小さかったこと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<sup>[4][5]</sup>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イズ、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 $\pm 1/100$ 、その他の多極成分は5 cm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<sup>[6][7]</sup>。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. 設計及び製作技術<sup>[7][8][9][10]</sup>

#### 3.1 基本構造

磁石の基本構造を図1に示す。

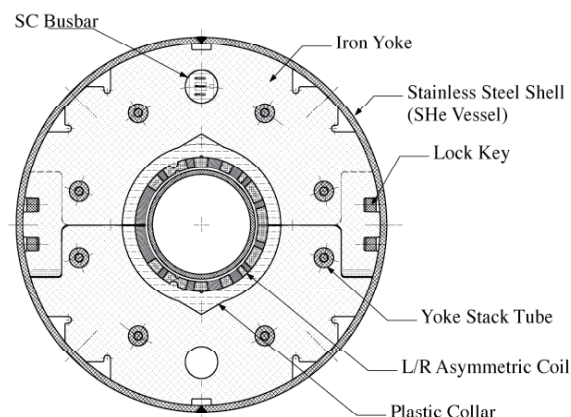


図1 J-PARCニュートリノ用  
複合磁場型超伝導磁石断面

まず2極/4極複合磁場を発生する、上下鏡対象の単層左右非対称コイル2本がSUS316L製のビームチューブ(内径154.1 mm、厚さ7.1 mm)を挟むように配置されている。コイルは内径が173.4 mmで外径は204 mmである。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10mm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ヘ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、磁石として完成する。

#### 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、ビームアクセプタンスの十分な確保を確認でき、最終的にこの設計を採用した。

表1: 参照半径5 cmでの磁場精度

	2D (T)	Integral (T·m)
B <sub>1</sub>	2.591	8.712
B <sub>2</sub>	0.940	3.120
B <sub>3</sub>	-2.4*10 <sup>-4</sup>	-293.6*10 <sup>-4</sup>
B <sub>4</sub>	13.0*10 <sup>-4</sup>	-20.1*10 <sup>-4</sup>
B <sub>5</sub>	5.4*10 <sup>-4</sup>	-30.6*10 <sup>-4</sup>
B <sub>6</sub>	-16.5*10 <sup>-4</sup>	-62.8*10 <sup>-4</sup>
B <sub>7</sub>	-3.0*10 <sup>-4</sup>	-20.9*10 <sup>-4</sup>
B <sub>8</sub>	-10.2*10 <sup>-4</sup>	-32.0*10 <sup>-4</sup>
B <sub>9</sub>	-21.7*10 <sup>-4</sup>	-73.4*10 <sup>-4</sup>
B <sub>10</sub>	-0.6*10 <sup>-4</sup>	-0.3*10 <sup>-4</sup>

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方向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。

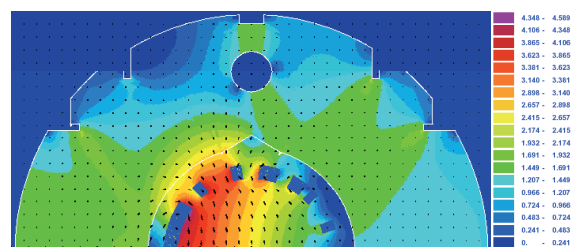


図2 2次元磁場強度及び磁束ベクトル図

#### 3.3 耐放射線性

この磁石は0.75 kWと非常に大強度の陽子ビームの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レーション部と比較して2倍以上のアクセプタンスをとった。ここからビームロス仮定を1 W/mとし、こ

のロス仮定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<sup>[1][12]</sup>。照射は原子力機構高崎の協力を得て、Co<sup>60</sup>  $\gamma$ 線照射施設で行った。

### 3.4 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 mm、幅約15 mm、キーストンアングル0.9度で、直径0.85 mmで銅比1.95の超伝導素線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)

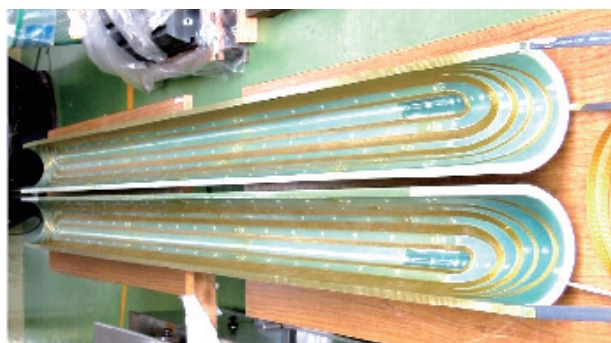


図3 成型後コイル

コイルは2極磁石のコイルを巻くのとほぼ同様の手法で巻き線される。ただし低磁場側はポールから90度を超えて巻き線する必要がある為、コイル抑え治具を工夫し、且つ巻き線時にケーブルにかかる張力を徐々に落とすことによって巻き線中にコイルが崩れてしまわないようにする。巻き線された後にコイルサイズを決めるフォームブロックに格納された上でプレスされ、温度約400 Kでケーブル絶縁表面のエポキシを反応させることで成型される。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ク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。ここでプリストレスの仕様値は冷却によって失う20MPa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100 MPaに設定した。図4にプリストレス測定の結果を示す。コイルは低圧側と高压側で異なるレスポンスを示すが、最終的に規定サイズで

は50~100 MPaの領域に収まっていることがわかる。磁石に使用するコイルは上下で鏡対象になる。コイルの製作治具は上下どちらのコイルにも対応できるようにして治具のコストの最適化を図った。

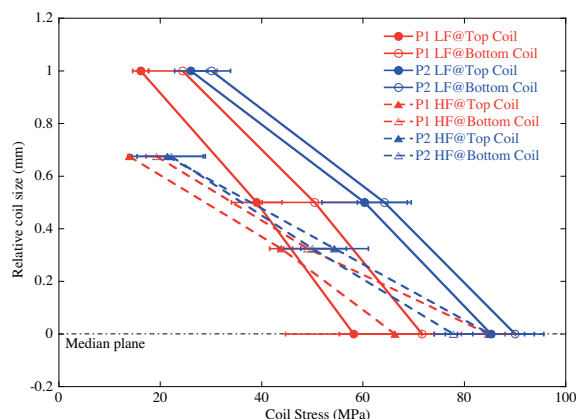


図4 コイル成型後プリストレス測定結果

### 3.5 プラスチックカラー

プラスチックカラー(図5)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開発した。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て、絶対精度で $\pm 0.1$  mm以下を達成している。



図5 プラスチックカラー

### 3.6 ヨーク組み立て

鉄ヨークの1単位は、厚さ6 mm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本で冷やし締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6に、また組み立て時にかかるコイルにかかるプリストレスの測定結果を図7に示す。プレス中の最高圧力は約60 MPa、最終組み立て時は約40 MPaであり、必要プリストレスよりも若干低かったが、後述の試験結果からプリストレスは十分に確保されたと考えられる。

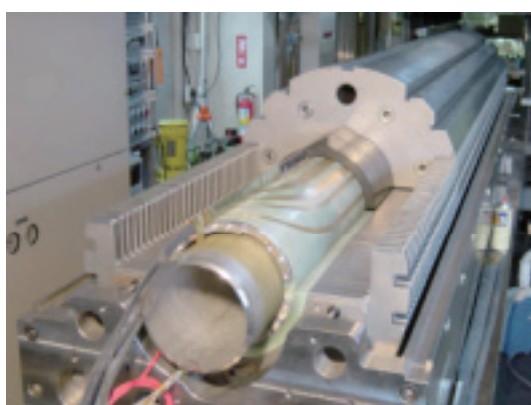


図6 ヨーク組み立て

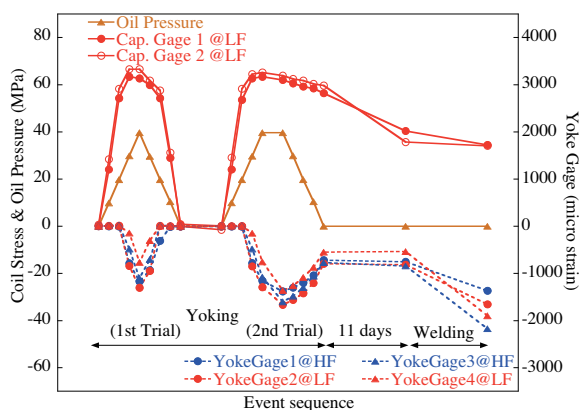


図7 ヨーク組み立て及びシェル溶接時プリストレス測定結果

### 3.7 シェル溶接及び最終組み立て

次に磁石には、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をされる<sup>[13]</sup>。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。

## 4. 試験結果<sup>[14]</sup>

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<sup>[14]</sup>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。通常このような磁石では、試作機に設計フィードバックをかけながら複数台製作する。KEKで開発したLHCの4極磁石でも合計5台の試作機を製作している<sup>[15]</sup>。複合磁場磁石においてもそのような設計フィードバックをかければより高い磁場精度の実現は可能である。また、その後の量産機の磁場測定の結果を見る限り磁場精度の安定性は特に単機能型に比べて劣ることは無く安定している。このことから、一度設計と試作機開発で磁場精度を改良してしまえば、複合磁場磁石においても加速器使用に耐える磁場精度の磁石は量産できると考える。

## 5. 今後の展開

### 5.1 ニュートリノビームラインの建設

本論文で紹介した複合磁場超伝導磁石は2004年初頭までにプロトタイプの開発をKEK内部で終了し、2004年度中にはKEKで開発された製造技術に基づいて民間による実証機が製造された。2005年度からは量産が本格的に始まり2006年末までに全体の約半分が製造された。全ての磁石は常温での磁場測定<sup>[16]</sup>の後、縦型クライオスタットで定格105%までの励磁試験、クエンチ保護ヒーター試験、磁場測定を行って、ビームライン用横型クライオスタットに組み込まれている。また横型クライオスタットに組み込まれた磁石はKEKの試験設備で2セット試験が行われている。量産は2008年度まで続くが、2007年度末にはトンネル内への磁石の設置作業が始まり2008年12月までに設置を終了し、2009年1-3月でシステムの試運転を行い、2009年度初めにはビーム運転に入る予定である。

### 5.2 複合磁場超伝導磁石の応用面での展開

複合磁場磁石を適応する場合、光学の基本セルの

大きさは考慮する必要がある。非常に大型の加速器でハーフセルが1台の磁石で構成することが困難な場合は、複合磁場磁石を利用するメリットは半減してしまう。一方中型から小型の加速器でハーフセルが磁石1台で構成できる場合、2極と4極の2台の単機能磁石を1台の複合磁場磁石に置き換えることができ、そのコストメリットは最大になる。

また磁場設計上は2極磁場と4極磁場の強さの関係も重要になる。4極磁場がコイルに作る磁場の強さが2極磁場よりも強くなるとコイル形状は原理的に4極的なコイル形状になり4本のコイルが必要になりその形状も3種類となって構造が非常に複雑になる。このような条件では複合磁場化するメリットは少なくなる。また実際の設計では4極磁場の強さは2極磁場の8割程度以下でないと設計は難しくなる。

以上の条件を満たす応用展開では複合磁場磁石を用いるコストメリットは大きい。特にビームラインでは技術的問題も少なく十分に検討に値すると考える。また加速器応用においては、より高い磁場精度の実現や、より高い磁場への適応が望まれる。

## 6. 結論

J-PARCニュートリノビームライン用に左右非対称な単層超伝導コイルを用いた複合磁場磁石を開発した。開発された磁石はニュートリノビームラインで要求される仕様を十分に満たす。このような概念の磁石は加速器用超伝導磁石としては世界的にも初めての試みで新しい技術の展開を拓いた。今後、さらなる応用に向けてより精度の高い磁場精度の実現、より高い磁場への適応が期待される。

## 7. 謝辞

この磁石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。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 communications, 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/>, Berkeley, CA, Oct.28~Nov.8, 2002
- [5] T. Obana, et al., "Magnetic Design of a FFAG Superconducting Magnet", *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, **149**, 283-285, (2005).
- [6] 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.
- [7] 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>
- [10] 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] 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.
- [12] 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.
- [13] 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>
- [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] Y. Ajima, N. Higashi, M. Iida, N. Kimura, T. Nakamoto, T. Ogitsu, H. Ohhata, N. Ohuchi, T. Shintomi, S. Sugawara, K. Sugita, K. Tanaka, T. Taylor, A. Terashima, K. Tsuchiya, A. Yamamoto, "The MQXA Quadrupoles for the LHC Low-Beta Insertions, Nuclear Instruments and Methods," in *Physics Research*, Vol A 550, 499-513, 2005
- [16] 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).