

DEVELOPMENT OF SLANTING SADDLE-SHAPE INDIRECTLY COOLED RADIATION-RESISTANT MAGNET

Hitoshi Takahashi^{#,A)}, Keizo Agari^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Masami Iio^{B)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yoji Katoh^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Megumi Naruki^{A)}, Hiroyuki Noumi^{C)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{C)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

We have developed the most upstream dipole magnet K1.1D1 for a new secondary beam line at the Hadron experimental hall in J-PARC. It was placed downstream of a production target and was close to existing K1.8D1 magnet. Indirectly cooled coils using mineral insulation cables (MICs) were adopted to achieve high radiation hardness. The coil shape was chosen to be a slanting saddle in order to minimize the interference of the magnetic field between both magnets. This work demonstrates that the indirectly cooled MIC technique can be applied to more complicated structure than ordinal racetrack coils.

斜め鞍型間接水冷超耐放射線電磁石の開発

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験ホール¹⁾は、2009年1月に最初のビーム取出しを成功させ、その翌月に生成標的 T1 を入れて二次ビームの生成を開始した。これまでに建設された二次ビームラインは、荷電二次粒子を輸送する K1.8 ビームラインとその途中から分岐する K1.8BR ビームライン、それに中性 K 中間子を供給する KL ビームラインの3本である。そこに現在、新たな荷電二次ビームラインとして K1.1 が建設中で、2010年10月のビーム運転開始を目指して機器の設置が急ピッチで進められているところである。

本論文では、その K1.1 ビームラインの最上流偏向電磁石 D1 の開発、製造について報告する。

2. K1.1D1 電磁石の特徴

K1.1D1 電磁石の基本仕様は、磁極間隔 100mm、磁極幅 300mm、磁極長 800mm の C 型偏向磁石で、偏向角 18 度のセクター型である。しかし、生成標的直下流に置かれる二次ビーム取出し磁石であることから、いくつか特別な性能が要求される。

2.1 斜め鞍型のコイル形状

図1にあるように、K1.8 と K1.1 とは、T1 標的から互いに反対方向にビームが取り出される。一つの生成標的に複数の二次ビームラインを設置するため

に、各二次ビーム取り出し電磁石どうしは非常に狭い空間内に密集する。隣の電磁石との間のスペースが狭いことによる最大の問題は、2つの電磁石が作る磁場が干渉してしまうことである。特にこのレイアウトの場合、2台の C 型偏向電磁石が互いに向き合って設置される形であるため、磁場の干渉が起きやすい。

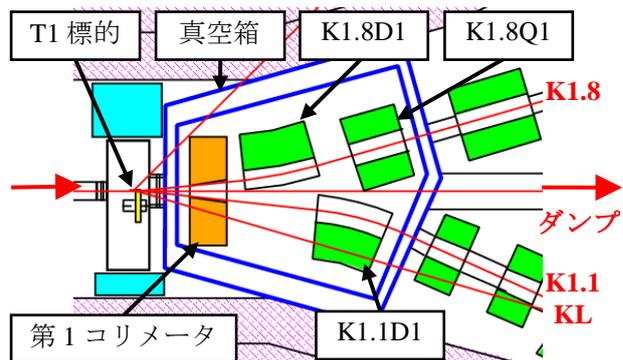


図1：二次ビームライン最上流部のレイアウト。

図2のようなレーストラック型コイルを用いた場合、一方の極性を反転させた時の他方の磁場の変化が大きくなってしまいます。これは、2台の磁石の間隔が狭いために、コイルの巻き数を増やすとコイル断面が縦長になり、その分鉄芯内の磁束の経路が長くなって、鉄芯の磁場の飽和の影響が大きくなるからである。また、図3のようないわゆる半鞍型コイルを用いると、鉄芯内の経路長は短くできるものの、

[#] hitoshi.takahashi@kek.jp

磁極の外側のコイルの位置が磁極の端面から遠いため外側に大きく磁場が漏れ出してしまい、かえって磁場の干渉が大きくなってしまいます。従って、磁場の干渉を小さくするためには、鉄芯内の経路長を短くし、かつ、外側のコイルを磁極端面に近づけることが必要になる。この2つの条件を満足するコイル形状として、我々は図4のような斜め鞍型を採用した。

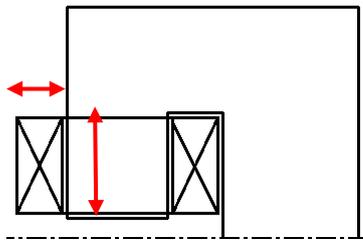


図2：レーストラック型の場合、隣との間隔がせまいためコイルが縦長になり、磁極が長くなって磁場の飽和の影響が大きくなる。

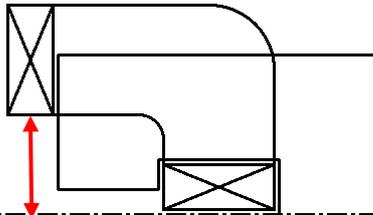


図3：半鞍型の場合、外側のコイルの位置が高いため、外側に大きく磁場が漏れる。

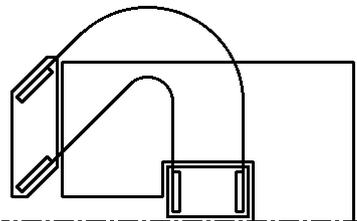


図4：斜め鞍型のコイル形状により、磁極の長さを短くしながら、外側のコイルの位置を低くできる。

2.2 間接水冷方式の完全無機絶縁コイル

K1.1D1 電磁石は、生成標的直下流という極度の放射線環境下に置かれるため、特に高い耐放射線性が求められる。そのために我々はこれまで、無機絶縁電磁石導体 (Mineral Insulation Cable、MIC) を用いた間接水冷方式の耐放射線コイルを開発、実用化してきた。

MIC には図5にあるように、中心に冷却水チャンネルがあげられている中空 MIC と、それがなく中実 MIC とがある。中空 MIC を用いたコイルは、導体でのジュール発熱をその内側を通る冷却水で直に除熱する直接水冷方式である。しかし、この中空 MIC コイルでは、導体の中を流れる冷却水を電気回路から分離するためにセラミック絶縁チューブが必要となる。このセラミックチューブは、強度的に弱く水漏れのリスクが高い上、内部に腐食物が堆積して絶縁性能が悪くなる危険性もあり、MIC コイルの

最大の弱点となっていた。一方、中実 MIC を使ったコイルでは、図6のように、水配管の層と MIC の層とを交互に SUS ケース内に積み、最後にケース内をスズで充填することにより、導体から水への熱伝達を行う。この構造のおかげで、電気回路と冷却水路がはじめから完全に分離されるので、中空 MIC コイルの弱点だったセラミック絶縁チューブが不要となり、最高の耐久性が実現される。また、電気回路と独立に水配管の巻き数を減らすことで、トリチウムの生成量を減らすことも可能となる。ところが、除熱効率は中空 MIC を用いた直接水冷型コイルよりも劣り、特にスズに埋められない導体接続部が高温になってしまう問題があった。しかし、問題箇所の構造の見直しや輻射率の向上等の改良を行った結果、十分実用的な温度で安定に運転することが出来るようになった²⁾。

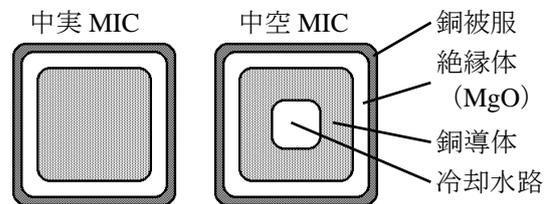


図5：MIC の断面図。

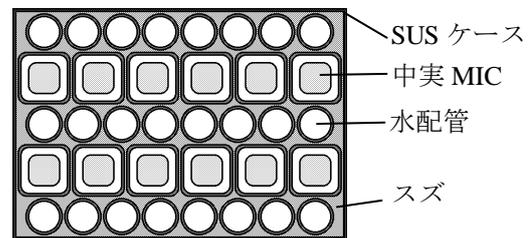


図6：間接水冷型 MIC コイルの断面図。

2.3 大型真空箱内に収納されるプラグイン・モジュール構造

大強度加速器の生成標的の下流では、放射線の問題以外に、散乱粒子による機器の発熱も大きな問題となる。特に、真空ビームダクトは、磁極よりもビームに近いために、大量のトリチウムを生成することなしには十分に冷却することが難しい。さらにその真空の脱着も困難である。そこで我々は、発想を転換して、磁石の中に真空ダクトを入れるのではなく、大型の真空箱の中に磁石を丸ごと入れてしまう構造を採用した³⁾。

この方式でポイントとなるのは、大型真空箱の蓋の位置である。蓋では、電力や水の脱着、真空のシールなど、人の手による作業が多い。メンテナンス時の作業者の被曝を最小限度に抑えるために、我々は蓋をビーム高さから 4m 上に位置させ、鉄 2m+コンクリート 1m の遮蔽ブロックも真空箱の中に入れることにした。その結果、真空箱は高さ 5.7m、容積 29m³、本体のみの重量 49t という巨大な構造物となった。

図1における青い五角形が大型真空箱 (通称

"PENTAGON") である。この真空箱にはコリメータ 1 台と電磁石 3 台が収納され、今回開発した K1.1D1 電磁石もその内の 1 台である。各コリメータ/電磁石は、機器本体と架台、上部鉄遮蔽体が一体となってクレーンで吊り上げられるプラグイン・モジュール構造になっている。大型真空箱とその内部モジュールについては、参考文献⁴⁾で詳しく述べられている。

3. 斜め鞍型間接水冷 MIC コイルの製造

先に述べた理由で斜め鞍型を採用したが、詳細に作図してみると、K1.1D1 がセクター型であるために、コイル形状は当初想定していたよりも、ずっと複雑になることが分かった。セクター外側両端の 90 度曲げどうしをなめらかに繋ごうとすると、セクター外側の巻き線は円柱ではなくて円錐に沿う三次元的

な曲線になる。そうすると、巻き型も三次元的な曲面を持ったものになる上に、積層時に余分な隙間がパンケーキ間に生じないように、巻き線に高い成形精度が要求されることになる。しかし、セクター外側両端の曲げ角を 90 度より少し大きく取ることによって、セクター外側の巻き線を二次元平面上の円弧にすることができた（ただし、巻き線の円弧の中心は磁極のセクター中心よりずれている）。これにより、巻き型の成形も単純になり、パンケーキを隙間なく積層することが可能になった。

図 7 にコイルの製造工程の写真を示す。1000A 級中実 MIC とシームレス SUS チューブとで個別に巻いたパンケーキを積層して周りを SUS ケースで囲んだ後、そこにスズを充填して、最後に蓋を溶接して全体の表面を研磨した。



図 7 : K1.1D1 電磁石用斜め鞍型間接水冷 MIC コイルの製造過程の写真。

4. K1.1D1 電磁石の完成

製造した斜め鞍型コイルを鉄芯に組み込み、架台や鉄遮蔽体と接続して、プラグイン電磁石として完成させた。その写真が図 8 である。コイル以外の全体構造は、先に製造した K1.8D1、Q1 電磁石⁵⁾と同様である。耐放射線性や真空中でのアウトガスを考

慮して、鉄芯や鉄遮蔽体の防錆には無電解ニッケルメッキを行った。コリメータが上流に置かれるとはいえ、磁石の鉄芯も散乱粒子による発熱があるので、銅板にシームレス SUS チューブをロウ付けした水冷パネルが鉄芯に取り付けてある。鉄芯冷却パネルとコイルの SUS チューブは、鉄遮蔽体内を貫通して、遮蔽体上部に固定された真空フランジのポートから大気側へ抜けて、フランジ上のマニホールドに

接続されている。その真空フランジには大電流用のフィードスルーが設けられており、そこからコイルまで、同じく鉄遮蔽体内を貫通して電流リードが配線されている。電流リードは、耐放射線性のため、コイルと同じ中実 MIC を使い、シームレス SUS チューブと中実 MIC とを銅条で巻いて熱伝達を確保させた間接水冷方式である。コイル末端のブスバーは、スズから剥き出しで水冷されないため最も高温になる箇所であるので、輻射率を向上させるためにコロイド黒鉛を塗布している。鉄芯や鉄遮蔽体、

架台にも、同様にコロイド黒鉛による塗装がなされている。

設置前の通電試験の結果は良好で、定格 1000A の時の中心磁場が 1.35T、大気中通電時の最高温度は、室温 25°C、水温 31 度に対し、コイル末端のブスバーで 118°C であった。大型真空箱への収納も無事完了し、現在、真空中での通電試験に向けて準備中である。最初のビーム運転は 2010 年 10 月に予定されている。

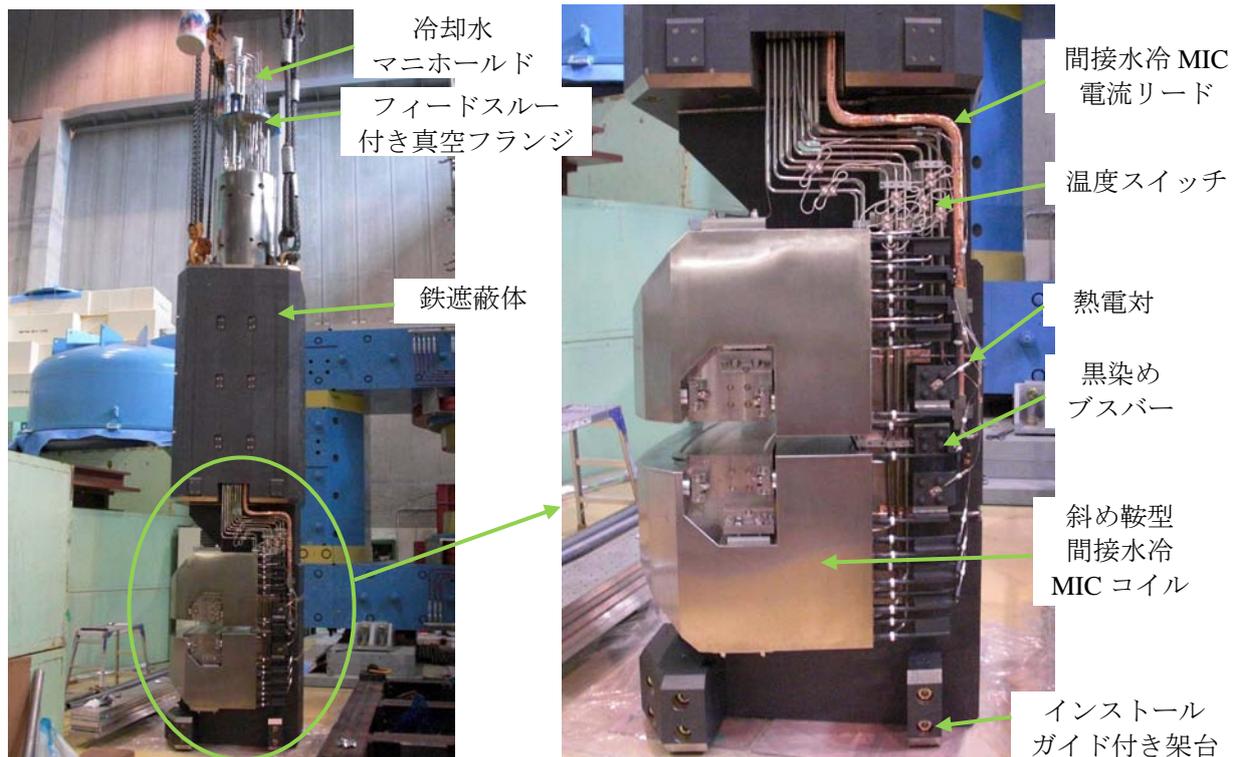


図 8 : 完成した K1.1D1 電磁石の写真。

5. まとめ

J-PARC ハドロン実験ホールの新しい 2 次ビームライン K1.1 のための最上流電磁石 D1 を開発、製造した。近接する既存の K1.8D1 電磁石との磁場の干渉を最小限に抑えるため、斜め鞍型のコイル形状を採用した。生成標的直下流という極度の熱・放射線環境下に置かれるため、超耐放射線仕様の間接水冷 MIC コイルで、磁石全体を大型真空箱の中に収納して運転する。現在ビームラインへの設置が完了したところで、今後真空中での試運転を経て、10 月からビーム運転を開始する予定である。

今回の成果は、レーストラック型ばかりでなく複雑なコイル形状にも間接水冷 MIC 技術が適用可能であることを示すものである。

謝辞

この研究は、文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) No. 15740166、基盤研究 (A) No. 15204024、基

盤研究 (B) No. 15340084、基盤研究 (A) No. 17204019、及び基盤研究 (A) No. 18204026 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 田中万博他, “J-PARC 原子核素粒子実験施設技術設計報告書 ハドロンビームラインサブグループ第 3 次中間報告書”, KEK-Internal 2007-1, August 2007.
- [2] H. Takahashi, et al., “Development of Indirect-Cooling Radiation-Resistant Magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.18 No.2 (2008) pp.322-325.
- [3] H. Takahashi, et al., “Magnet Operation in Vacuum for High Radiation Environment near Production Target”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.16 No.2 (2006) pp.1346-1349.
- [4] 高橋仁他, “J-PARC ターゲットステーションにおける大型真空箱“ペンタゴン””, 第 6 回日本加速器学会年会報告集 (2009) pp.73-75.
- [5] H. Takahashi, et al., “Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets for Hadron Target Station at J-PARC”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.20 No.3 (2010) pp.344-347.