

## DEVELOPMENT OF INDIRECT-COOLING RADIATION-RESISTANT MAGNETS

Hitoshi Takahashi<sup>1</sup>, Keizo Agari, Erina Hirose, Yoji Katoh, Masaharu Ieiri, Michifumi Minakawa,  
 Hiroyuki Noumi, Yoshinori Sato, Yoshihiro Suzuki, Minoru Takasaki, Kazuhiro Tanaka,  
 Akihisa Toyoda, Hiroaki Watanabe, Yutaka Yamanoi  
 Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK  
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

In a high-intensity proton beam facility, beam line elements downstream of a production target are exposed to a huge amount of radiation and heat. Heat problem of magnets can be solved by installing a beam collimator between the target and the magnets. However, beam pipes are closer to the beam than the magnet poles and more difficult to cool sufficiently without tritium production. Therefore, the magnets are placed in a large vacuum chamber, instead of using vacuum pipes located within the pole gaps. We have adopted indirect-cooling mineral-insulation-cable (MIC) coils for these magnets. They have the great advantages that the mechanical strength and the insulation performance can be significantly improved by avoiding the use of ceramic insulation pipes, because electric circuits are completely separated from water pass. We have tested magnet operation in vacuum using a test coil made of 1000-A-class solid-conductor MICs and stainless-steel tubes. By improving the structure of end parts of MICs and increasing their emissivity, we have successfully fed the current of DC 1000 A to the solid-conductor MIC coil in vacuum.

### 間接水冷型超耐放射線電磁石の開発

#### 1. はじめに

現在茨城県東海村で建設が進められている大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 原子核素粒子実験施設 (HD-hall) [1]では、50GeV、750kWの大強度1次陽子ビームを2次粒子生成標的T1[2]に照射し、そこで生成されるK中間子や $\pi$ 中間子、反陽子などの2次ビームを用いて、ハイパー核実験やK稀崩壊実験、ハドロン分光実験といった様々な原子核素粒子実験が行われる予定である。この施設計画には、そこで行われる原子核素粒子実験やビームライン等の提案として、世界各地から総数30件にも及ぶ(著者の総数にして400人を超える) Letter of Intentsが寄せられ、日本のみならず、世界における21世紀の原子核素粒子物理学の拠点として世界中から大変注目されている。

1MWに迫ろうという大強度ビーム加速器施設の建設は、しかし、その未曾有のビームパワーによって発生する膨大な量の放射線や熱との戦いでもある。特に、全ビームパワーのうちの30%が開放されるT1標的の下流では、磁石等のビームライン機器がこの大量の放射線と熱に晒されることになる。この生成標的直下流という極限的な高放射線場・高熱場でも安定して動作する電磁石を開発することは、High Intensity Frontier を開拓せんとするJ-PARCプロジェクトの必須課題である。

電磁石に要求される耐放射線性については、我々はこれまで、完全無機絶縁ケーブル (Mineral

Insulation Cable、MIC) によるコイルを開発してきた。さらにコイルのみならず、冷却水路や電力の接続、温度計、圧力計といった計器類など、ありとあらゆる電磁石の構成パーツから有機物を排除する技術開発を進めてきた。一方、電磁石の耐熱性については、基本的に耐放射線性のために有機物を取り除いたおかげで耐熱性能も格段に向上する上、標的との間にコリメータを置くことで散乱粒子によるコイルの発熱がジュール発熱よりも十分小さくなるため、上記の耐放射線性が実現されれば磁石そのものの耐熱性は十分であると考えられていた。しかし、磁石だけでビームを輸送できるわけではない。シミュレーション計算の結果、磁石の磁極よりもビームに近い真空パイプは、コリメータでは発熱が抑えきれず、トリチウム生成の問題もあってその冷却が非常に困難であることが分かった。そこで我々は、その解決策として、磁極の間に真空パイプを通す代わりに、大型の真空槽の中に磁石全体を配置するシステムを考案した[3]。

図1が、その真空槽電磁石システムの概念図である。メンテナンス時の作業被曝をできる限り低減するため、放射線遮蔽体も真空の中に入れ、水や電気を供給するポートは床から5mの高さまで上げている。この大型真空槽の中に、コリメータ1台と電磁石3台が設置される。従って、その電磁石には、耐熱性、耐放射線性に加えて、真空の中で安定に動作するという機能が要求されるのである。

<sup>1</sup> E-mail: hitoshi.takahashi@kek.jp

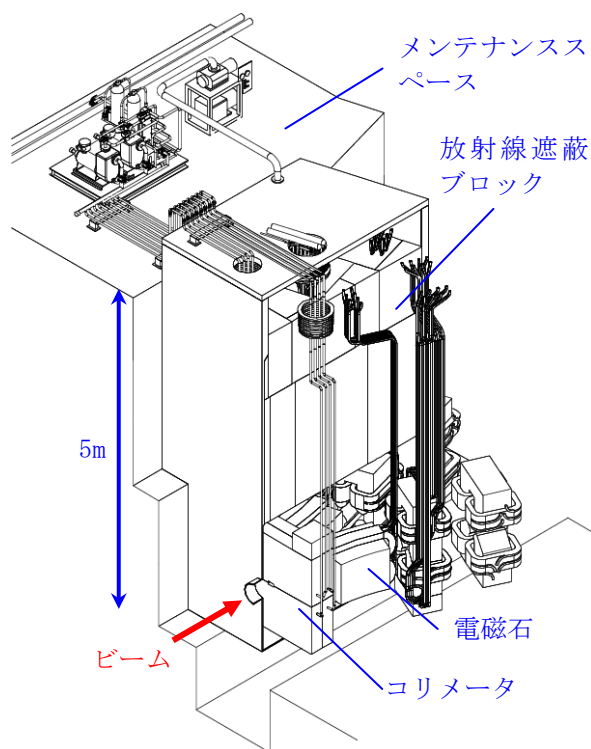


図1：真空槽電磁石システムの概念図

## 2. 間接水冷型無機絶縁コイル

先に述べたように、超耐放射線電磁石コイルとして我々はMICコイルを開発してきたが、これまで実用化されたMICコイルは、主に中空MICを用いたものである。これは、図2右にあるような、中央に冷却水の流れる穴の開いたMICである。しかし、この中空MICを使ったコイルでは、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。

そこで我々は、標的直下流という最も放射線の厳しい環境に置かれる電磁石に対しては、中実型のMICを用いた間接水冷型のコイルを使用する。このMICは、図2左のように内部に穴のない構造をしており、導体内に直接水を流して冷却することができない。そのため、この中実MICを用いたコイルでは、別の冷却水配管を用意してMICのジュール熱を取り除くことになる。具体的には、図3のように、水配管の層とMICの層を交互にSUSケース内に積み、最後にケース内を半田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。特に、今回の用途のように真空中に置かれる場合、真空への冷却水導入部からコイル中まで全て1本の継ぎ目なしSUSチューブで製作することが可能になるので、

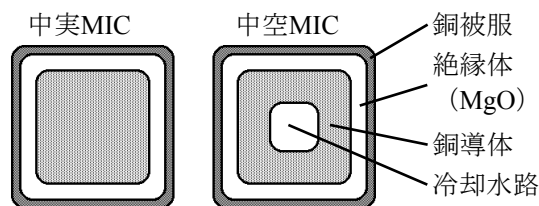


図2：MICの断面図

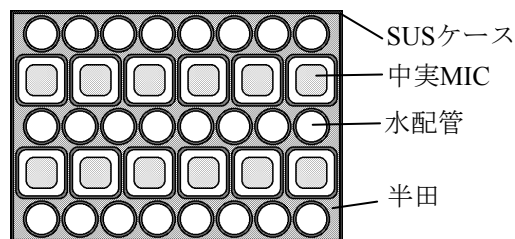


図3：間接水冷型MICコイルの断面図

真空中での水漏れの危険性を極限的に小さくできる点で有利となる。また、除熱性能に支障のない範囲で水配管のターン数を減らすことで、トリチウムの生成量を減らすことも可能となる。

## 3. 通電試験

### 3.1 小型テストコイル

ビームパイプの発熱を避けるために磁石を真空槽内に置くことにしたが、真空中で通電することは、逆に磁石自身の熱問題を生む。それは、空気への放熱がなくなり熱がこもるからである。半田で充填されるコイル内部は水冷されるので問題ないとしても、半田に埋められない導体接続部は熱の逃げ場がなく高温になってしまうことが懸念された。そこでまず、1000A級中実MICとφ10mmのSUSチューブを用いて外径360mm程度の小さなテストコイルを作成し、実際に真空容器内で通電して温度を測定した。

通電試験は、KEK-PS東カウンターホール内に建設された真空槽モックアップで行った。これは、直径約2m、高さ約1.2mの真空容器に、メンテナンススペースを模擬したエリアを隣接して設置したもので、実機の大型真空槽で使用する予定のポートやコネクタ類の試験やメンテナンス手順の検証を行うことを目的としたものである。この真空容器にテストコイルを入れ、真空中に引きながら通電試験を行った。真空度は約0.4Paであった。

その結果、半田で充填されたコイル部は35℃以下と十分除熱されていることは確認された。しかし、半田の外に出ている末端のMIC同士を接続するブスバーが非常に高温になり、大気中では1000A通電時に198℃だったのが、真空中では700A通電するだけで189℃まで上昇してしまった。

表1：リード線テストサンプル中のMIC接続部の  
温度測定結果

輻射冷却板	なし	あり
電流	960A	1000A
銅条巻きリード線	204°C	171°C
半田充填リード線	162°C	144°C
入水温	25°C	26°C

### 3.2 リード線テストサンプル

真空中で間接水冷型コイルを運転する場合、コイル自身のジュール発熱だけでなく、フィードスルーからコイルまでリード線の発熱も問題となる。コイルからセラミック絶縁チューブを取り除くことが間接水冷型コイルを採用する最大の理由であるので、リード部についても、水と電気が完全に分離した間接水冷とする必要がある。そこで我々は、そのようなリード線のテストサンプルを製作し、前述したテストコイルにつなげて通電試験を行った。

リード線テストサンプルは2種類用意した。一つは中実MICとSUSチューブとを隣接させて銅条で巻いたもの、もう一つは中実MICとSUSチューブを型枠に入れてコイル部と同様に半田で充填したものである。使用したMICとSUSチューブのサイズは、どちらもテストコイルのものと同じである。真空中で1000A通電した結果、水温26°Cに対し、銅条巻きリード線は62°C、半田充填リード線は36°Cであった。熱伝達効率の点では半田充填型が勝っているが、製作が容易な銅条巻き型でも十分実用になると考えられる。

このテストサンプルでは、リード部の冷却方法の試験と同時に、先のテストコイルの試験で課題として残されたMIC接続部の冷却方法の試験も行った。そのために、それぞれのリード線サンプルの途中にMIC接続部を設けた。テストコイルの接続部と比べた改良点は、水冷管とMICとが離れる部分の長さをできる限り短くしたこと、そして接続部に表面積の広いブスパーを用い、その表面を黒く塗って輻射率を上げたことである。通電試験の結果を表1に示す。十分実用的な温度で1000Aまで通電できており、これにより真空中で間接水冷型MICコイルを運転する技術的な目処が立った。

## 4. 実機電磁石用コイル

以上のようなR&Dの成果を基に、我々は実機K1.8D1電磁石用の間接水冷型MICコイルを製作した(図4)。この磁石はK1.8ビームラインの最上流に位置するC型偏向磁石で、まさに生成標的T1の最も近くに置かれる電磁石である。先のテストコイルと同じ1000A級中実MICとφ10mmのSUSチューブで作ったパンケーキを板厚2mmのSUSケースに収納し、半田充填後にSUSの蓋を溶接した。MICはSUSケースから出てすぐに接続用のブスパーが取り付けられているが、SUSチューブは床から5m上の大型真空槽の蓋までつなぎ無しで配管できるので十分な長さを伸ばしている。



図4：実機電磁石用間接水冷型MICコイル

現在、テストコイルの通電試験を行ったのと同じ真空槽モックアップで、このK1.8D1コイルの通電試験を行っているところである。これまでのところ、輻射率を上げるための黒塗装を行わない状態で、真空中で1000A通電時にMIC接続部の温度が最高167°Cまでに抑えられており、良好な結果が得られているものと判断している。

## 5. まとめ

二次粒子生成標的の下流の真空ダクトの熱問題を解決するため、我々は大型真空槽の中に電磁石を入れるシステムを考案し、真空槽内に設置する電磁石には、機械的強度や絶縁の信頼性の高い間接水冷型無機絶縁コイルを採用した。空冷の効かない真空中では、特にコイル端末部が高温になる問題があったが、小型テストコイルやリード部テストサンプルの通電試験を繰り返した結果、真空中の間接水冷型コイルに1000Aまで通電する技術を確認した。それを基に、実機電磁石用の間接水冷型MICコイルを製作し、現在通電試験を行っているところである。

## 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. 1534008、及び基盤研究(A) No. 17204019の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] 田中万博他, “J-PARC大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループハドロンビームラインサブグループ第2次中間報告書”, KEK-Internal 2004-3, July 2004.
- [2] Y. Yamanoi, et al., “Design of the production target for slow extraction beam lines at K-hall,” in Proc. 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, October 2001, pp.393-395.
- [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.