

# DEVELOPMENT OF LARGE-CURRENT INDIRECTLY COOLED RADIATION-RESISTANT MAGNETS

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

<sup>A)</sup> Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

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

<sup>B)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

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

## Abstract

We have been developing indirectly cooled radiation-resistant magnet coils which can be loaded with DC2000A. They are required for upstream magnets of high-momentum beam lines to be constructed at the Hadron experimental facility in J-PARC. The indirectly cooled coils are made of solid-conductor-type mineral-insulation cables (MICs) and stainless-steel pipes. In order to realize such a large-current indirectly cooled coils, heat problem at the end parts of the coils must be solved. For this purpose, we have carried out load tests using a test sample of the end parts, which consists of MIC current leads and a copper bus bar connecting the MIC conductors, instead of a whole MIC coil. We have succeeded to load DC2000A to the test piece in atmospheric environment, and DC1800A in vacuum.

## 間接水冷型超耐放射線電磁石の大電流化

### 1. はじめに

J-PARC ハドロン実験ホール<sup>[1]</sup>の拡充計画として、現在2つの計画が進行している。一つは、今年度概算要求を出すことが決まっている高運動量ビームライン+COMET ビームラインの建設、もう一つは実験ホールの拡張（第2、第3ターゲットステーションとそこから取り出される二次ビームライン群の建設）である。どちらの計画においても、既存のハドロン実験施設と質的に異なるポイントとして、「高運動量」が挙げられる。前者の高運動量ビームラインは文字通りで、最大 30.9 GeV/c のビームまで輸送できるビームラインであるが、後者のホール拡張においても、目玉の一つとして最大 10 GeV/c までの粒子分離型高運動量二次ビームラインの建設が計画されている。これらのビームラインにおいては、必然的に既存のものよりも大きい積分磁場が必要となり、電磁石の大型化が必須となる。特に、生成標的近傍の高い放射線環境に置かれる電磁石の大型化が技術的課題の一つである。

本論文では、この耐放射線性の高い電磁石の大型化を目的として行っている R&D の現状について報告する。

### 2. 間接水冷型 MIC 電磁石コイル

生成標的直下流という極度の放射線環境下に置かれる電磁石には、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1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接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2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。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、特に半田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<sup>[2]</sup>。

<sup>#</sup> hitoshi.takahashi@kek.jp

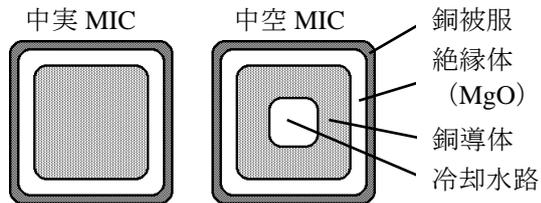


図 1 : MIC の断面図。

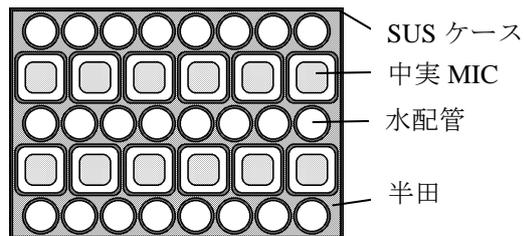


図 2 : 間接水冷型 MIC コイルの断面図。

これまで実用化されたのは、導体断面積  $78.4 \text{ mm}^2$  の 1000 A 級中実 MIC を用いたコイルで、真空中で DC 1000 A までの安定な通電に成功している。ここで、真空中としているのは、標的直下流では熱負荷も非常に大きく、特に真空ビームパイプの除熱が困難になるため、大型真空槽の中に磁石全体を丸ごと収納してビームパイプを無くしてしまう運用方法<sup>[3]</sup>を取るためである。しかしながら、実際に製造、運転している中実 MIC コイルのうち最大のもの<sup>[4]</sup>で 1000 A 通電時の電圧が 140 V と、他のビームライン磁石に比べて抵抗が大きくなっており、同サイズの MIC を使う限りこれ以上の磁石の大型化が難しい。MIC そのものとしては、我々のグループですでに導体断面積  $168.4 \text{ mm}^2$  の 2000 A 級中実 MIC を開発済みであるが、これを用いた間接水冷型コイルを実用化するにあたっては、その冷却効率が問題であった。これまでの経験から、最も問題となるのは、SUS 配管と共に半田中に埋められるコイル本体ではなく、そこから剥き出しになる端末リード部であることが分かっている。そこで我々は今回、コイルの端末リード部だけを切り取ったような試験サンプルを用意して、通電試験を行った。目標は、真空中で従来の倍となる DC 2000 A の通電である。

### 3. 通電試験のセットアップ

図 3 に今回の通電試験の全体セットアップの模式図と写真を示す。場所は、KEK つくばキャンパスの北カウンターホールである。

試験サンプルとして用意したテストピースだけでは抵抗が小さすぎて安定に電流が流せないため、既存の別の電磁石をダミーロード代わりに直列に接続した。こうすることで、実際に間接水冷コイルそのものを製作せずとも、問題部分のみを切り出して安価に試験することが可能となった。真空容器や電源も、先の 1000 A 級 MIC コイルの開発で使用してきた物をそのまま利用している。

テストピースは、半田充填されたコイルケースか

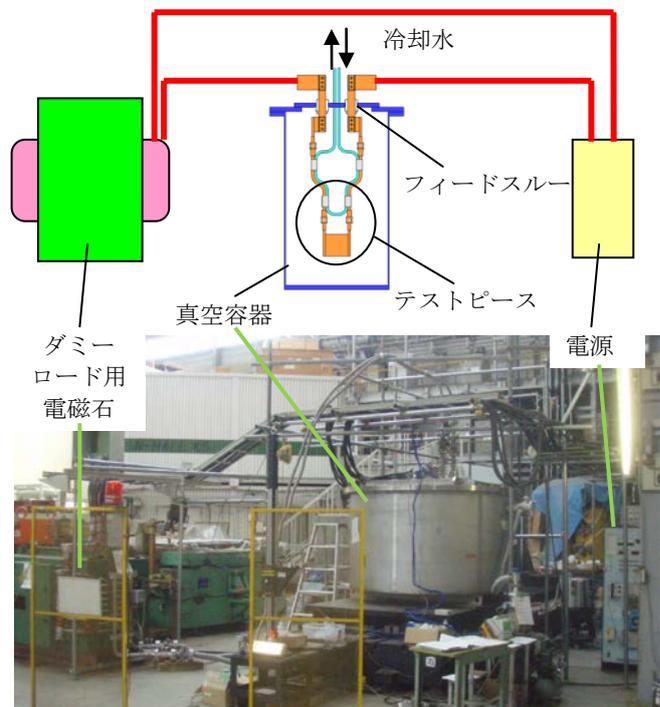


図 3 : 通電試験のセットアップの模式図と写真。別の電磁石をダミーロードとして直列に接続した。

ら剥き出しになる MIC 端末と導体同士を接続する銅ブスパーだけを切り出したような形で、これにコイルとフィードスルー間をつなぐ電流リードを接続した物である。ブスパーのサイズは幅 200 mm、厚さ 10 mm、長さ 136 mm で、これまで 1000 A 級で用いていたものの倍の断面積と表面積を持っている。これは、ジュール発熱は電流の 2 乗に比例するため、電流が 2 倍なら発熱は 4 倍になるのを、断面積 2 倍で電気抵抗を 1/2 にし、表面積 2 倍で放熱量を 2 倍にすることで温度上昇を同程度に抑えようとして決めたものである。電流リードも中実 MIC と SUS パイプを用いた間接水冷型で、今回は、中実 MIC と SUS パイプとを銅条で巻いて熱伝達させるタイプと、コイル本体と同様に SUS ケースに MIC と SUS パイプを入れて半田で充填したタイプの 2 種類を用意した。冷却効率としては当然半田充填タイプの方が勝っているが、実機においてはこの電流リードが片道 5 m 以上と長くなるので、安価に製造できる銅条巻きタイプでも 2000 A まで対応できるのであればコストメリットが大きい。このテストピースを、真空フランジに設けた大電流フィードスルーに接続し、それらを架台上に固定して、真空容器内に収納した。架台上でフィードスルーと接続された状態のテストピースの写真を図 4 に示す。温度測定のため、各所に熱電対を取り付けた。後に実コイルの通電・通水も可能となるよう、真空フランジには、冷却水を通すためのポートも複数用意しており、フランジ上のマニホールドから給排水できるようにしてある。

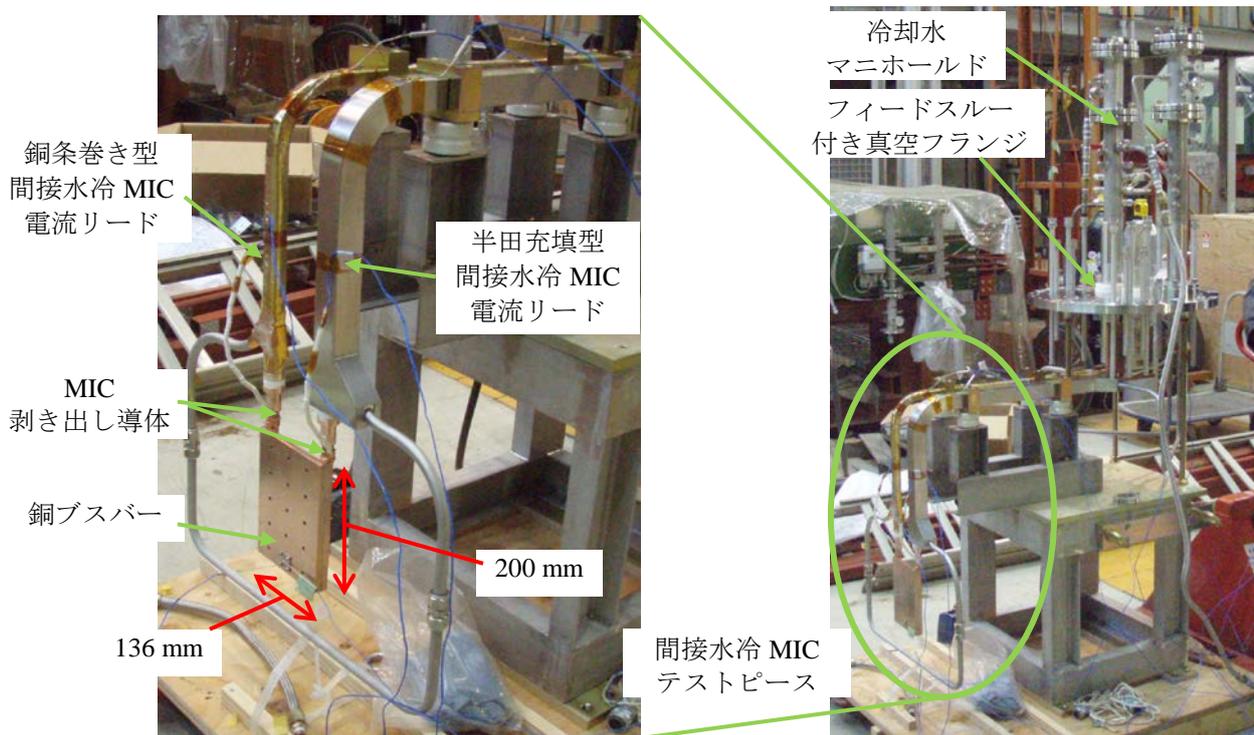


図 4：通電試験に使用した間接水冷 MIC テストピースの写真。

#### 4. 試験結果

通電試験は、下記の順に、測定条件を変えながら複数回行った。

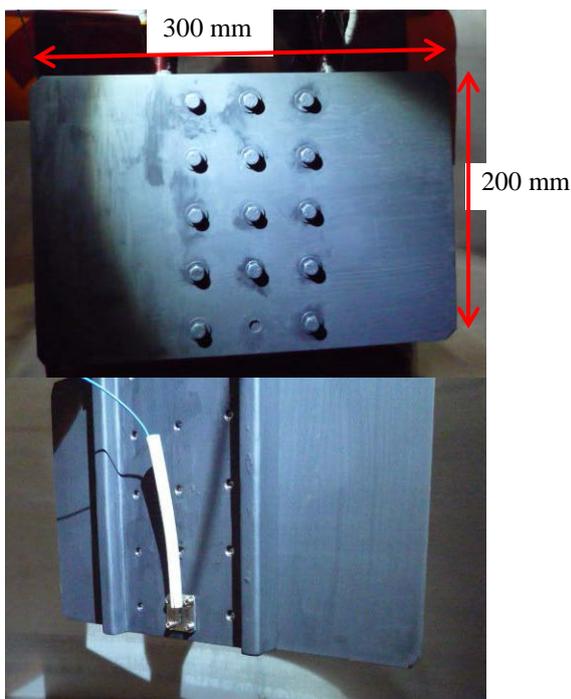


図 5：黒塗りの放熱板をテストピースの銅ブスパーに取り付けた様子の写真。(上: 表、下: 裏)

- ① 銅ブスパーに何も塗らない状態で、大気中と真空中とで通電。
- ② 輻射率を上げるため銅ブスパーをコロイド黒鉛で黒塗りした状態で、真空中で通電。
- ③ さらに輻射面積を大きくするために黒塗りした銅製の放熱板 (200 mm×300 mm、厚さ 1 mm、図 5 参照) をブスパーに張り付けて、真空中で通電。

真空度は通電開始時に約 0.2 Pa で、温度が上がるにつれアウトガスが増えて最大 1 Pa 程度まで悪化した。

それぞれの場合について、各部の飽和温度の測定結果をまとめたのが表 1 である。テストピースを大気雰囲気中に置いた場合は、特に黒塗りなどの処理を施さなくても、十分安定な温度で 2000 A まで通電することができた。同じ真空中での 1400 A 通電の場合を比べると、黒塗りありの場合はなしの場合よりも約 40°C 温度が低下しており、黒塗りによる輻射率の向上の効果がとても大きいのが見て取れる。一方、同じ黒塗り有りで真空中 1800 A 通電の場合を比べると、放熱板有りの場合はなしの場合よりも 20°C 強しか温度が下がらず、その効果は期待したほどではなかった。これは、今回発熱条件を同じにするためにブスパーの電気抵抗を変えたくなかったため、放熱板として 1 mm という薄いものを用いたために、放熱板端部までの熱伝導が悪く、放熱の効果があまり上がらなかったものと考えられる。結果、真空中でも 1800 A までは十分安定な温度で通電することができたものの、残念ながら目標としていた 2000 A までは至らなかった。

表 1: 測定結果。温度の括弧内の数字は入水温からの温度上昇を示す。

雰囲気	大気	大気	真空	真空	真空	真空	真空	
黒塗り	×	×	×	×	○	○	○	
放熱板	×	×	×	×	×	×	○	
電流 [A]	1000	2000	1000	1400	1400	1800	1800	
温度 (入水温との差) [°C]	銅ブスバー	52 (26)	149 (123)	82 (54)	149 (120)	102 (78)	156 (133)	138 (107)
	MIC 剥き出し導体 (銅条側)	57 (31)	183 (157)	89 (61)	167 (138)	122 (98)	198 (175)	182 (151)
	MIC 剥き出し導体 (半田側)	53 (27)	157 (131)	79 (51)	143 (114)	101 (77)	158 (135)	145 (114)
	銅条表面	34 (8)	68 (42)	51 (23)	81 (52)	70 (46)	113 (90)	121 (90)
	半田ケース表面	29 (3)	37 (11)	29 (1)	34 (5)	28 (4)	33 (10)	41 (10)
	入水温	26	26	28	29	24	23	31
	室温	26	25	29	29	24	24	31

いずれの場合も、温度が最高を記録しているのは、つなぎの銅ブスバーではなくて、銅条巻き電流リード側の MIC から剥き出しになった導体部である。そこで現在、銅条巻き電流リードの MIC と SUS パイプとが分かれる端部だけ、SUS ケースで囲んで半田を充填し、冷却効率を上げることを検討している。このような改良を施し、再度通電試験を行う予定である。

## 5. まとめ

J-PARC ハドロン実験ホールにおいて建設が計画されている高運動量ビームラインのため、中実 MIC を用いた間接水冷型耐放射線コイルの大型化を目的とした R&D が進行中である。通電時最も高温となる導体接続部だけを切り出したテストピースを用意し、通電試験を行った。大気中では、特に表面処理等を施さなくても DC 2000 A まで通電が可能であった。真空中においても、ブスバーの輻射率を上げることで DC 1800 A までの通電に成功した。従来までは 1000 A が限界であったので、これだけでも十分な大電流化を達成したと言えるが、目標とする真空中での 2000 A 通電を実現するため、さらなる改良を施す予定である。

## 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. 23740217 の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] H. Takahashi, et al., "Construction and beam commissioning of hadron experimental hall at J-PARC", *Journal of Physics: Conference Series*, vol.312 (2011), 052027.
- [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] H. Takahashi, et al., "Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnet with Slanting Saddle Shape Coils for New Secondary Beam Extraction at J-PARC Hadron Facility", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.22 No.3 (2012) pp.4101504.