

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成23年 6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740217

研究課題名（和文） 間接水冷型超耐放射線電磁石の大型化

研究課題名（英文） Development of Large-Current Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets

研究代表者

高橋 仁 (TAKAHASHI HITOSHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：60353372

研究成果の概要（和文）：J-PARC ハドロン実験施設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、内部に冷却水路持たない中実型の完全無機絶縁ケーブルを用いた間接水冷型耐放射線コイルの大電流化を目的とした研究開発を行った。通電時最も高温となる導体接続部だけを切り出した試験サンプルを用意し、通電試験を繰り返した結果、ブスバーの輻射率を上げ、電流リード部の間接冷却構造を見直すことで、真空中においても十分安定な温度で2000A通電することに成功した。これは、従来のコイル定格電流1000Aの2倍であり、大きな進歩と言える。

研究成果の概要（英文）：We have developed indirectly cooled radiation-resistant magnet coils which can be loaded with larger current than before, which 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. 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, and have succeeded to load DC2000A to the test piece in vacuum by improving the emissivity and cooling structure of the end parts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：耐放射線電磁石、ビームライン

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らはこれまで、J-PARC ハドロン実験施設の二次粒子生成標的近傍のような極限の放射線環境にも耐える電磁石として、完全無機絶縁ケーブル（MIC）を用いた間接水冷型コイルを開発、定格1000Aの物まで実用化してきた。しかし、建設が計画されている高運動量ビームライン等に向けた磁石の大型化に対応するには、さらに定格電流の大きいコイルが必要となる。そのために、これまでよりも大電流の間接水冷型 MIC コイル

の実用化が望まれていた。

2. 研究の目的

MIC コイルの種類としては、水冷方式の違いから直接水冷と間接水冷の2種類あるが、直接水冷型 MIC コイルは定格2500Aの物まで実用化しているのに対し、間接水冷型は定格1000Aの比較的小型の物までしか実用化されてこなかった。これは主に、間接水冷型 MIC コイル自身ではなく、その端末リード部の冷却効率の問題によるものである。そこで、こ

の端末リード部の冷却効率を改善し、これまでの倍の2000Aまで安定して通電できる間接水冷型MICコイルを実用化するための技術を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

中実MICそのものとしては、ほぼ倍の導体断面積を持つ2000A級中実MICが、研究代表者らのグループによってすでに開発されている。それを間接水冷型コイルとして実用化するにあたって障害となるのは、その冷却効率である。研究代表者らのこれまでの経験から、最も問題となるのは、半田で埋められるコイル部ではなく、む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、本研究では、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(図1)を用意して、通電試験を繰り返しながらその構造や表面処理を改善することによって、十分低い温度で2000Aまで通電できる技術を確立する。

コの字型ケースに
MICとパイプをはめ
込んで半田で充填

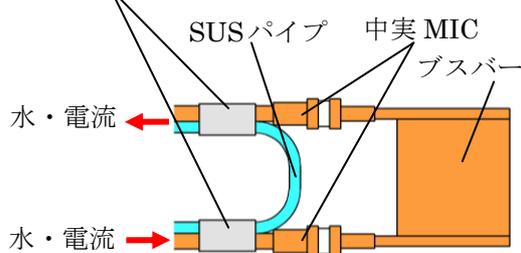


図1: 試験サンプルの模式図。

試験サンプルは、半田充填されたコイルケースから剥き出しになる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200mm、厚さ10mm、長さ136mmで、これまで1000A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。

KEK-PS北カウンターホール内でこの試験サンプルの通電試験のセットアップを行った。装置セットアップの概要を図2に示す。試験サンプルだけでは負荷が足りずに安定

して電流を流せないため、既存の電磁石をダミーロードとして試験サンプルに直列に接続した。

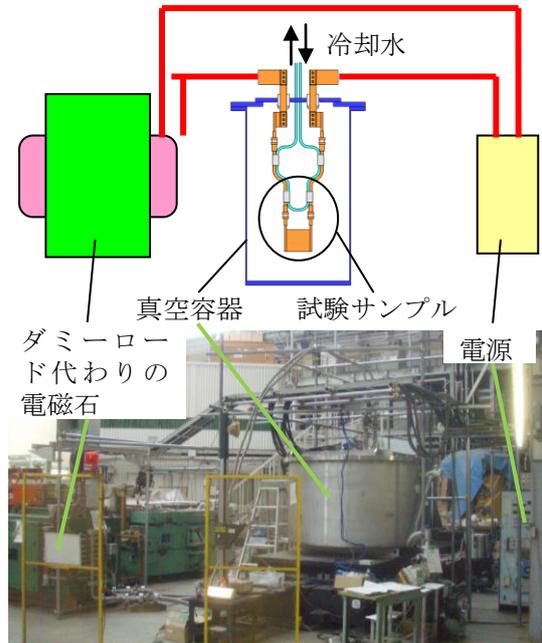


図2: 通電試験のセットアップの模式図と写真。別の電磁石をダミーロードとして直列に接続した。

4. 研究成果

通電試験は、まず下記の順に、測定条件を変えながら複数回行った。

- 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(200mm×300mm、厚さ1mm)をブスパーに張り付けて、真空中で通電。

試験サンプル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2000Aまで通電することができた。同じ真空中での1400A通電の場合を比べると、黒塗りありの場合のはなしの場合よりも約40℃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た。一方、同じ黒塗り有りでも真空中1800A通電の場合を比べると、放熱板有りの場合は無しの場合よりも20℃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1mm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。いずれの場合も、温度が最高を記録したのは、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った。そこで、さらに次のような変更を行って通電試験を行った。

④ 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、冷却効率を上げる改良を施した後に、真空中で通電。

その結果、放熱板がなくとも真空中において十分安定な温度で 2000A を通電することに成功した。これは、従来のコイル定格電流 1000A の 2 倍であり、大きな進歩と言える。

また、このような大型の超耐放射線電磁石を使った新しいビームラインの具体例として、以前から計画されていた高運動量ビームラインとは別に、粒子分離高運動量 2 次ビームライン「K10」を新たに設計した。

この K10 ビームラインは、拡張されたハドロン実験ホールにおける第 2 生成標的 (T2) 部に建設されることを想定した、最大 10GeV/c までの荷電 2 次粒子ビームラインである。粒子分離装置として長さ合計約 30m の静電セパレータを使えば 4GeV/c までの K 中間子や 6GeV/c までの反陽子のビームを提供することができ、超伝導 RF セパレータを使えばそれ以上の運動量のビームを提供できる。静電セパレータを用いた場合の K10 ビームラインのレイアウトを図 4 に示す。ビームラインの全長は 82.8m である。T2 標的から取り出された荷電 K 中間子ビームは、 K^0 の崩壊や T2 以外の物質での散乱などからの π 中間子を減らすために中間像スリットを通された後、9m \times 3 台の静電セパレータとマススリットによって π 中間子から分離される。その後電磁石で運動量を解析され、ユーザーの実験標的に収束する。この 2 つのスリットの他に、HF1、HF2 という 2 つの水平スリットがあり、これらは運動量アクセプタンスを決めるほか、粒子分離の向上にも寄与する。T2 でのビームロス量が 25kW の場合、4GeV/c の K ビームの強度は約 2×10^6 /spill で、その時の K/ π 比はおおよそ 1:1 と見積もられる。

さらに、そのようなビームラインで実験可能となる物理テーマの一つとして、ストレンジネス-3 の研究を提案した。特に、これまであまり研究対象にされてこなかった 10 重項バリオンの性質を、 Ω 粒子の生成や散乱を通して測定する実験を検討した。

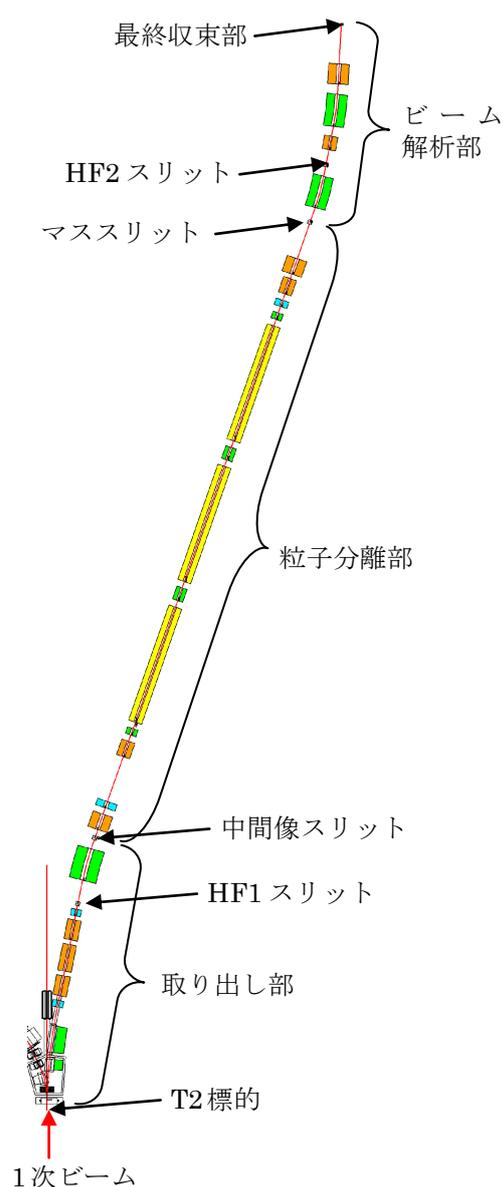


図 3：静電セパレータ版 K10 ビームラインのレイアウト。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) H. Takahashi, "S=-3 Physics at J-PARC", Nuclear Physics A, 印刷中, doi: 10.1016/j.nuclphysa.2013.02.019, (査読有)

(2) K. Agari, H. Takahashi (15 番目), 他 18 名, "Primary proton beam line at the J-PARC hadron experimental facility", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2012, pp.02B008-1 - 19, doi: 10.1093/ptep/pts034 (2012 年, 査読有)

(3) K. Agari, H. Takahashi (36 番目), 他

44名, "Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2012, pp.02B009-1 - 16, doi: 10.1093/ptep/pts038 (2012年, 査読有)

(4) H. Takahashi (1番目), 他25名, "Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnet With Slanting Saddle Shape Coils for New Secondary Beam Extraction at J-PARC Hadron Facility", IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol.22, No.3, pp.4101504-1 - 4, doi: 10.1109/TASC.2011.2174820 (2012年, 査読有)

〔学会発表〕 (計1件)

(1) 高橋仁, "間接水冷型超耐放射線電磁石の大電流化", 日本加速器学会, 2012年8月8日~11日, 大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 仁 (TAKAHASHI HITOSHI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 60353372

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし