

J-PARC メインリング入射キッカー電磁石のための 新しい終端抵抗器の性能評価

PERFORMANCE OF NEW TERMINATION RESISTORS OF J-PARC MAIN RING INJECTION KICKER MAGNET

杉本拓也*, 石井恒次, 松本浩, 芝田達伸

Takuya Sugimoto*, Koji Ishii, Hiroshi Matsumoto, Tatsunobu Shibata

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Performance of new termination resistors of J-PARC main ring injection kicker magnet was evaluated. High voltage impulses which are equivalent to J-PARC 1.3 MW operation were applied repeatedly to check electric discharge tolerance at the boundary between a metallic electrode and a conductive ceramic resistor. No discharge was found for more than 1000 hours operation. A ceramic rod made of alumina was installed in the resistor to improve the cooling ability. We found the temperature of the resistor was decreased by the rod.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の Main Ring (MR) は、長基線ニュートリノ振動実験 T2K へ向けて、30 GeV に加速した陽子ビーム (8 バンチ) を 1 ターンで取り出す速い取出し方式により供給している。2020 年春までの運転で、510 kW (繰り返し周期: 2.48 sec、1 サイクルあたりの総粒子数: 2.6×10^{14} 個) の陽子ビームをニュートリノ生成ターゲットに向けて供給することに成功している。高精度でのニュートリノ実験を実現するには、より大強度での運転が必要である。2020 年代後半には、1.3 MW のビーム (繰り返し周期: 1.16 sec、粒子数: 3.34×10^{14} 個) を T2K 実験へ向けて供給することを計画している [1,2]。MR の入射直線部には、4 台の集中定数型のキッカー電磁石が設置されている。上流の RCS から 40 msec 毎に 2 個ずつ取り出された陽子バンチを、4 回に分けて計 8 個 MR に対して入射する。入射キッカー電磁石は、2011 年冬にインストールされ、これまで運転し続けてきた [3,4]。ビーム出力が次第に増強するにつれて、インピーダンス整合用の抵抗器 (以下、抵抗器ユニットと呼ぶ) の発熱が顕在化してきた。そのため、ビーム出力を増強するためには、MR の入射キッカー電磁石システムの改造が必要であった。これまでの研究 [5] から、1.3 MW のビーム出力で連続運転を行うと、抵抗器の表面温度が 370 °C 以上も上昇し、抵抗器の使用限界である 150 °C を大きく超える事がわかったため、抵抗器の表面積と並列数を増やす事にした。製作が可能な抵抗器サイズと並列数に対し、空冷ファンにより強制冷却し、セラミックロッドを抵抗器内部に挿入して間接的に冷却する方法を検討したところ、抵抗器の温度上昇が 80 °C 以下に抑えられる事が 3 次元数値シミュレーションによりわかった。現在使用している抵抗器 (東海高熱工業社製 AS 抵抗器) は、導電性セラミックとアルミ断面電極との間で放電が発生したため、ろう付け

会社に依頼して導電性セラミックに対して銅電極をろう付けしている [4,6]。抵抗器のサイズを大きくしたことで、導電性セラミックと電極の境界面で再び放電する可能性があるため、実際に通電して健全性を確認しなければならない。これまでの研究 [6] で、連続パルス通電開始後数週間で放電が開始した例もあったため、実機導入の基準として 1000 時間放電しないことと決めた。今回新たに製作した抵抗器においても、1000 時間に渡り放電が発生しないことを確認する必要があった。本論文では、数値シミュレーションに基づいて新たに設計、製作された抵抗器の詳細ならびに通電試験結果について報告する。

2. 新しい抵抗器

2.1 セラミック抵抗器

Figure 1 に、2019 年度に新たに製作した抵抗器の写真を示す。一番上が、これまで使用していた外径 20 mm、長さ 170 mm の抵抗器である。そして、真ん中と一番下の抵抗器が、新たに製作した外径 30 mm の抵抗器である。長さは従来と同じ 170 mm (以下、L170 と呼ぶ) に加え、200 mm (以下、L200 と呼ぶ) も製作した。導電性セラミックは形成し焼成されたのち、銅製の電極金具を両端にろう付けする。ろう付けは真空炉を用いて行われるが、導電性セラミックに含まれる結合材 (バインダー) や導電材であるカーボンなどを主成分とするアウトガスが発生する。抵抗器の外径をより大きくして表面積を増やす事により、並列数をより少なくする事も可能であったが、外径が 40mm を超える抵抗器ではアウトガスが多く発生し、電極をろう付けすることが出来なかった。今回の製品 (外径 30mm) でも、従来品より外径を大きくするために材料の配合が変わったため、従来品に比べてアウトガスが多く発生したとの報告があったが、真空炉をクリーニングする時間を多く取る事で、最終的に全ての抵抗器に電極をろう付けすることが出来た。長さを長くすることで表面積が増え、空冷ファンによる効率の良い冷却、すなわち高い熱伝達係数が期待される。ただし、長すぎると導電性

* takuya.sugimoto@j-parc.jp

セラミックを焼結した際の変形（曲がりや反り）の影響による歩留まり率が高くなる。歩留まりを抑えて製作可能な長さが 200 mm であった。

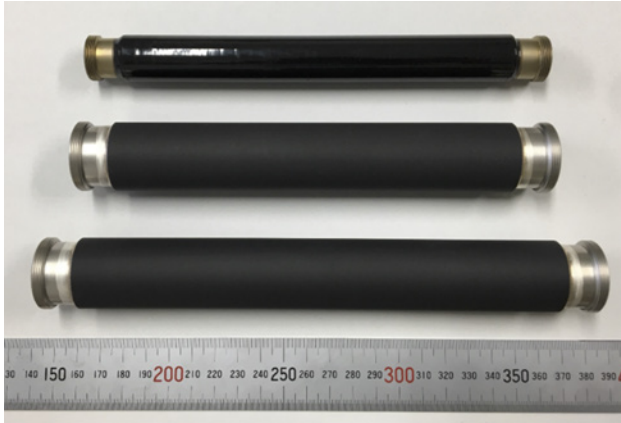


Figure 1: Ceramic resistors. Top is the original resistor, middle is new resistor (170 mm length) and low is new resistor (200 mm length). Diameter of the new resistor is 30mm.

2.2 冷却用セラミックロッド

Figure 2 に、試作した 2 種類のセラミックロッドを示す。今回のアップグレードでの一番の変更点は、抵抗器内部にセラミック製のロッドを挿入する事で、抵抗器内部での熱抵抗を減らし、抵抗体を間接的に冷却する方法を採用した事である。純度 99% のアルミナ (Al_2O_3) 焼結体で作られた円筒（外径 19 mm）の両端に、銅製の取り付け金具をろう付けした。これを抵抗器内部に挿入し、両端に銅製のキャップを付けて 1 本の抵抗器とする。両端の取り付け金具には、ネジ山がダイス加工されており、ナットを使って抵抗器と電極板を固定することができるが、ろう付け工程で銅が焼鈍されるため、金具の強度が弱くなってしまい、折れ曲がってしまう可能性があった。それを補強するために、一方には根元に銅製のナットを入れてみたが（写真下）、組み込み時に誤って曲げてしまったものが数本あった。また、ネジ山も焼鈍されて柔らかくなっていて、電極板と固定するためにナットで締め付けた際に変形してしまい、再びナットを取り外すことが出来なくなったものがあった。そのため、固定方法については改良の余地があることがわかった。

2.3 抵抗器ユニット

セラミックロッドを挿入した抵抗器は、上下に電極板を取り付け、一つのユニットになる。1 台のキッカー電磁石は、2 つのコイル（銅製のバスバー）とフェライトコアから構成されており、合計 8 枚のコイルを励磁することでビームを入射している。そのそれぞれに、インピーダンス整合用の抵抗器と、コンデンサと抵抗器を組み合わせた RC 回路が接続されている。それらの回路素子が収められた箱を整合ボックス（matching box）と呼んでいる。Figure 3 に、

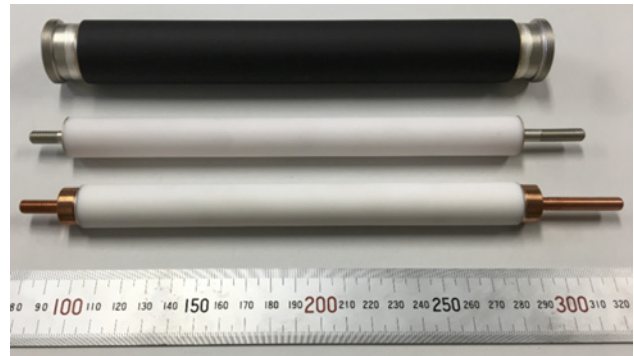


Figure 2: Ceramic resistor and ceramic rods installed into the resistor to improve heat resistance. Top is the new resistor, middle and low are ceramic rod.

新しい抵抗器ユニットで構成された整合ボックスを示す。この図では、コイル 4 枚分のユニットが描かれている。抵抗器の本数は、従来の 2 倍である 30 本で設計を進めた。これまでの研究 [5] では、新しい抵抗器ユニットの抵抗器を円形に並べていた。しかしその後の検討により、矩形に並べる方式であっても、上側の電極板（GND）をアルミ製の水冷ヒートシンクにし、さらに側面から AC ファンにより風速 5 m/s 程度の風を送り強制空冷する事で、表面温度が 150°C 以下で 1.3 MW 出力の連続運転が可能であることが、数値シミュレーションによりわかった。矩形に並べる事で、現行の整合ボックスとほぼ同じサイズにすることが可能となった。抵抗器ユニットの側面には、風が横方向に広がるのを抑えるための G10 製の板が取り付けられている。AC ファンは、構成する素子が少ないため放射線による損傷を受けにくく、ベアリングのグリスが固着するまで使用が可能である [7] ため、トンネル内でも数年は使用可能と考えている。

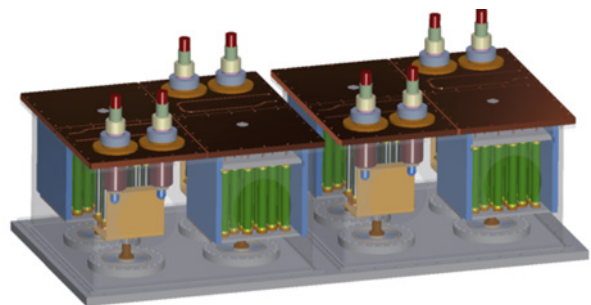


Figure 3: New box for matching circuit.

Figure 4 に、整合ボックスに納められる抵抗器ユニットを示す。写真上側の 2 枚は現行機のユニット、下側は今回製作したユニットである。抵抗器の色の違いは、絶縁塗料の種類が異なるためで、初期の抵抗器ではシリコン系の赤い塗料を塗布していたが、電極をろう付けするようになって以降、エポキシ系の黒い塗料に変更した。天板のサイズは、両者で全く同じになるよう設計した。緑色の板は、風の流れ

を作るためのG10の板である。コンデンサ側の抵抗もビーム電流により発熱するため、容量を増やす必要があった。これらを、新たに製作するのではなく、現行のコイル側の終端抵抗をそのまま流用することで、長さが70 mmから170 mmに、並列数が10本から15本に増え、費用も節約することが出来た。抵抗器の長さが長くなったことで、取り付け電極金具の寸法が変更となったため、新たに製作した。その際、高圧ケーブルのソケットをそのまま使用できるよう、取り付け金具の寸法を調整した。

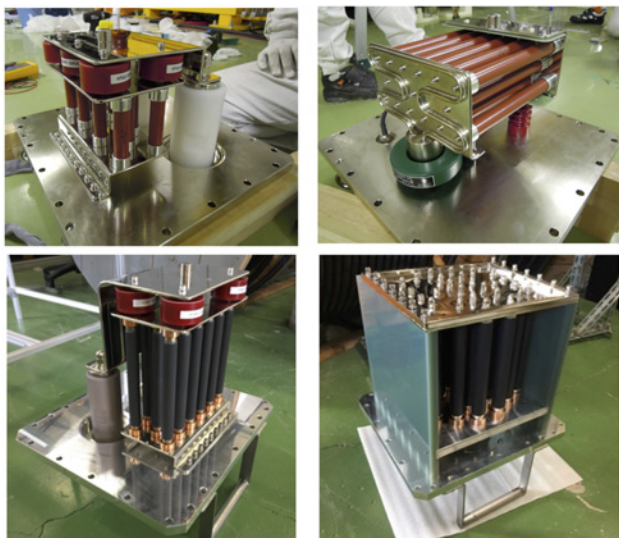


Figure 4: Resistor Units. Upper two figures show the original unit. Lower two figures show the new unit.

3. セットアップ

入射キッカー電磁石と同じ回路系で試験をするため、予備として保管されていた入射キッカー用パルス電源をKEKつくばキャンパス内の建屋に設置し、それを用いて通電試験を行なった。Figure 5の左側にテストスタンドの全景を、右側に試験用の整合ボックスを示す。通常は導電性セラミックに電極をろう付けした後、東海高熱において合成抵抗が目標値の $\pm 5\%$ 以内になるよう抵抗値の調整を実施していた。しかし、今回は通電試験によりろう付け部で放電が発生しないことをいち早く確認することが目的だったので、抵抗値の調整は実施せず、並列にする本数を減らす事で波形調整し、通電試験を実施した。コイル側の終端抵抗は、L170は23並列、L200は19並列にすることで、合成抵抗がそれぞれ $9.5\ \Omega$ と $9.1\ \Omega$ となった。この電源盤では、2組のパルス生成回路(サイラトロンとPFL、伝送線)を1つの制御システムによって同期制御しており、L170とL200を同時にテストすることができた。試験を実施した建屋において水配管を用意するのは難しかったため、水冷アルミヒートシンクには水を流さずに試験を実施した。また、今回は通電中に放電に伴うアークが発生していないかを直接目視確認するため、空冷ファンを取り付けずに通電試験を実施した。



Figure 5: Test stand (left) and test matching box (right).

4. 結果

4.1 連続通電試験

2020年6月8日より、連続通電を開始した。試験条件は、PFLの充電電圧50kV、ピーク電流2800A、パルス間隔10 msec (つまり10 pps)、1サイクルあたりのパルス数10、1サイクルあたりの周期3秒とした。この時、1本あたりの平均電力は20Wとなった。通電期間中、抵抗器の表面温度は最大で約 $130\ ^\circ\text{C}$ であった。システムのメンテナンス等で停止した時間を除き、最終的に1090時間にわたり通電を実施した。通電期間中、アーク放電が発生していないことを目視確認した。2012年に抵抗器を開発していた際には、わずか数時間の通電でアーク放電が発生していたものもあったが、今回の抵抗器ではアーク放電は観測されなかった。通電完了後、全ての抵抗器ならびにセラミックロッドを取り外して目視確認したが、放電痕は見られなかった。これにより、今回製作したサイズの抵抗器を実機に導入することが可能となり、量産に進むことが出来るようになった。

4.2 セラミックロッドによる冷却の効果

セラミックロッドの有無による冷却効果の違いを比較した。Figure 6にサーモカメラ(FLIR社のE8)を用いた表面温度測定結果を示す。このサーモカメラは、横320ピクセル、縦240ピクセルの画像として測定データを記録することが出来る。図の縦軸と横軸は、それぞれ画像のピクセル数を表している。図の左から順に番号を振り、計6本の抵抗器の温度変化を比較することで、冷却の効果を評価した。setup1では、抵抗器#1、#3、#4、#6の4本は、セラミックロッドの無い空芯となっている。一方、setup2では、すべての抵抗器にセラミックロッドが挿入されている。抵抗器1本あたり20Wの発熱量で6時間連続通電し、温度が一定になった状態で測定を実施した。この図から、セラミックロッドを挿入することで抵抗器の温度が低くなり、冷却されていることが確認できた。

5. まとめと今後

J-PARC MR 1.3 MW ビーム出力運転に向けた改良の一つとして、新しく製作した入射キッカー電磁石のための終端抵抗器の性能試験を実施した。入射キッカー電磁石と同じパルス電源を用い、2800Aのパルス電流を流し、1000時間以上パルス通電を行

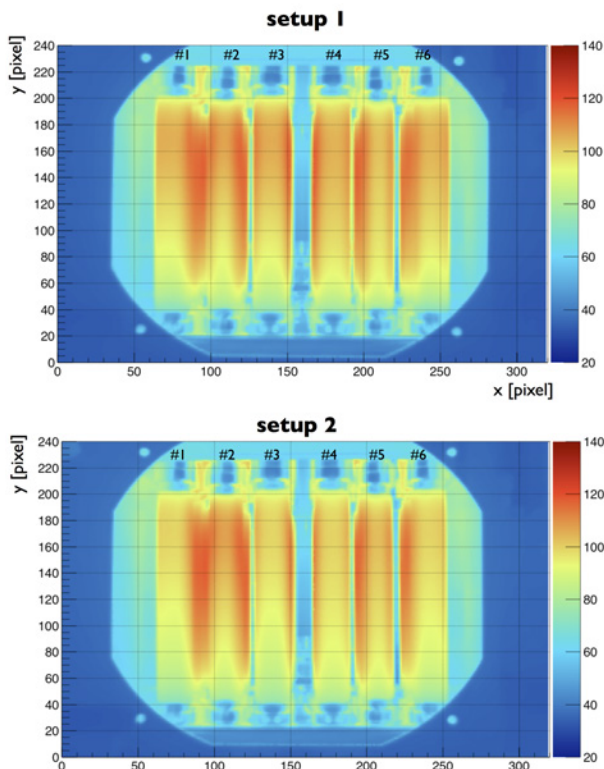


Figure 6: Temperature distribution of the resistor units.

なった。電極のろう付け部やセラミックロッドに放電痕は見られず、パルス波形の変化も見られなかった。また、セラミックロッドを挿入することによる冷却効果も確認した。今後は、2022年1月の実機インストールを目指し、抵抗器の量産を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Koseki, “Upgrade Plan of J-PARC MR - Toward 1.3 MW Beam Power”, in *Proc. IPAC'18*, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 966–969. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAK005
- [2] M. Yoshii *et al.*, “Present Status and Future Upgrades of the J-PARC Ring RF Systems”, in *Proc. IPAC'18*, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 984–986. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAK011
- [3] K. Fan *et al.*, “Design and Test of Injection Kicker Magnets for the JPARC Main Ring”, in *Proc. IPAC'12*, New Orleans, LA, USA, May 2012, paper THPPP004, pp. 3728–3730.
- [4] T. Sugimoto *et al.*, “Performance of Injection Kicker Magnet for the J-PARC Main Ring”, in *Proc. PASJ'12*, Osaka, Japan, Aug. 2012 (in Japanese).
- [5] T. Sugimoto *et al.*, “Numerical simulation of J-PARC main ring injection kicker magnet toward 1.3MW beam operation”, in *Proc. PASJ'19*, Kyoto, Japan, Aug. 2019 (in Japanese).
- [6] T. Sugimoto *et al.*, “Development of a Non-inductive Ceramic Resistor”, in *Proc. IPAC'13*, Shanghai, China, May 2013, paper MOPWA004, pp. 669–671.
- [7] K. Mio *et al.*, “Radiation resistance of Vacuum Equipment in J-PARC RCS”, in *JAEA-Technology 2009-064*. doi:10.11484/jaea-technology-2009-064