

J-PARC-MR における主電磁石への追加負荷用 SUS 管抵抗体の開発

○西川 雅章、石井 恒次、芝田 達伸、岩田 宗磨、松本 浩、松本 教之
高エネルギー加速器研究機構 加速器施設

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で運営する大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は 400 MeV の線形加速器と 3 GeV の Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、メインリング (MR) の加速器と、物質・生命科学実験施設 (MLF)、長基線ニュートリノ振動実験施設 (NU)、ハドロン実験施設 (HD) の実験施設から成る複合型陽子加速器施設である^[1]。MR では、RCS から受け取った 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV まで加速し、速い取り出しラインまたは遅い取り出しラインによって MR より引き出され、前者は NU へ、後者は HD へ送られる。MR のビーム運転周期を短縮し、出力ビームパワーを増強するため、2021 年～22 年に大規模な機器改修作業を行った^[2]。陽子ビームの周回用偏向電磁石、四極電磁石などの主電磁石用新電源の導入や、電源と電磁石の組み合わせ変更をし、高繰り返し化を実現した。その際 11 ある四極電磁石の励磁回路の 1 つにおいて、電源能力に対して電磁石負荷が軽くなりすぎて繊細な制御が難しくなるという制御不安定性の問題が出てきた。この問題を回避するため、抵抗負荷を回路に追加することを計画している。本論文はこの追加負荷用の SUS 管抵抗体開発に関するものである。

2. 追加負荷用抵抗体

図 1 に当該四極電磁石の励磁回路を示す。周回長が 1,568 m の MR トンネル内に 400 台を超える電磁石が並べられており、9 台の四極電磁石が当該回路に使われ、直列で接続されている。全電源は地上部にある 6 つの電源棟内にそれぞれ置かれており、当該回路の電源は四極電磁石に対して図 1 で示すような位置関係となっている。機器改修以前、当該電源の負荷は 27 台の四極電磁石であったが、改修後は 9 台の四極電磁石に変更された。そのた

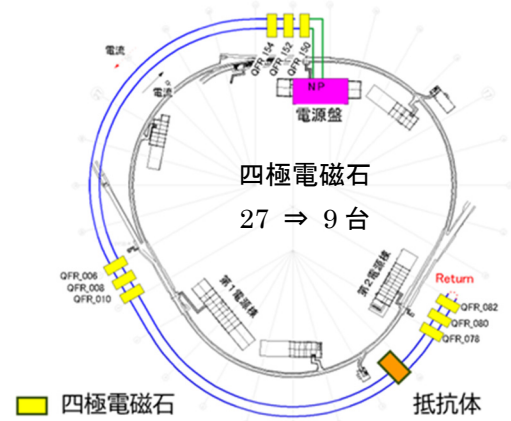


図 1 当該電磁石の励磁回路 (抵抗体位置は案)

め今後追加負荷を直列接続することで、電源制御を安定化させる計画である。回路シミュレーション等により、80 mΩ 程度以上の純抵抗が適当であると判断した。表 1 に今回開発した抵抗体の仕様を示す。抵抗値を 80 mΩ に設定し、最大許容電力は 80 kW で電流値は直流 (DC) で 1,000 A まで流すことができたようにした。MR の電磁石群はパターン電流で励磁されるため、使用時には 1,000 A を超えて最大許容電力まで電流を流すことができる。耐電圧は電源能力に合わせて 1,000 V 程度、80 kW 程度と大きな発熱が見込まれるため水冷とし、冷却水の温度上昇は 30 °C 程度、抵抗体はトンネル内に設置するものとした。トンネル内には電磁石を冷却する純水の入出口が数多く設けられており、流量と冷却の能力は十分に余力がある。

この仕様を満たす抵抗体を市販の抵抗器を使用して製作した場合、100 を優に超える素子が必要となり部品点数の観点から安定性に欠ける事と製作費用が高額になる事が容易に予想できる。一方、管外径 12 mm、肉厚 1 mm で 4 m の SUS 管は 80 mΩ 程度の抵抗値を持つため仕様条件を満た

表 1 追加負荷用抵抗体の仕様

直流抵抗値	80 mΩ
最大電流量	1,000 A (DC)
最大許容電力	80 kW
耐電圧	1,000 V 程度
冷却	水冷 (純水)
冷却水温度上昇	30 °C 程度
冷却水流速	3 m/s 程度以下

すだけでなく部品点数の少数化、低価格化も可能になると考えた。SUS 管を通す冷却水については流速 3 m/s 程度以下にするため SUS 管を 1 m 程度に分けて並行に通水する。課題はとして、管への電流導入部や電気絶縁部の具体的構造の設計、トンネル内に設置するため絶縁材を含め全ての材質が耐放射線性があること、計算通りの冷却能力を持つかどうか、発熱・振動・放射線による長期的な劣化への懸念、等であったが、大きな問題はないと判断した。そのため 2024 年度に実機性能を持った SUS 管抵抗体を 1 式製作し、様々な試験を実施することにした。

3. SUS 管抵抗体の製作

SUS 管抵抗体の具体的な設計は 2024 年 1 月から開始した。冷却の観点から SUS 管抵抗体は 4 分割してそれぞれ 1 m 程度に収め、電気的には直列接続、冷却水的には並列接続を行う。冷却水にヘッダー管を設け、抵抗体の枝管とはフランジ取り合いとし、ヘッダー管と SUS 管抵抗体のフランジ間に絶縁材を挟み込むことで 1,000 V 程度の耐電圧を担保する構造にした。SUS 管抵抗体への印加電流は DC 1,000 A を想定したため電力ケーブルは 325 sq 程度のケーブル 2 本を並列接続した。ただし重量があつて硬いため十分な強度の端子台を SUS 管抵抗体に設ける必要がある。図 2 に示すようにフランジに端子台を設ける合体案と、給電と冷却水を分けた機能分離案を検討した。合体案はフランジそのものが端子台となるため、ロウ付け等の構造は必要ではない。しかしながら硬いケーブルをフランジに取り付け、かつ冷却水接続も担うため冷却水漏れの懸念が残る。機能分離案は

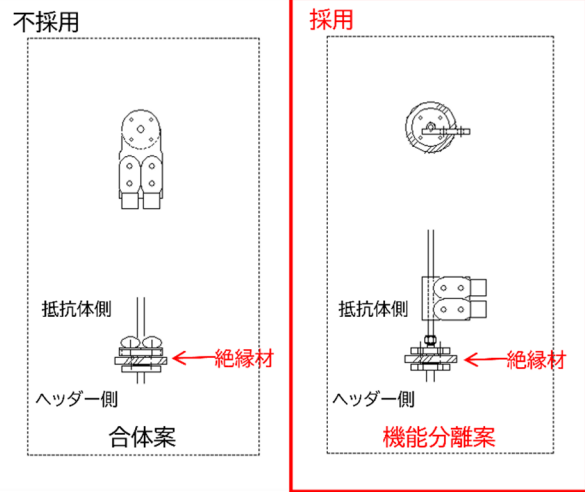


図 2 電気接続と電気絶縁

前述した懸念はなくなり、SUS 管と銅端子のロウ付けも問題ないとの製作会社の返答もあり、機能分離を採用した。

耐放射線と耐電圧の観点から、絶縁材は PEEK 材と G10 (ガラスエポキシ) が候補に挙げられた。PEEK 材は耐放射線・耐電圧共に優れている反面、高価である。一方、G10 は安価で耐電圧に優れ、MR トンネル内の高放射化場所を除き、十分な耐放射線性能を有している。しかしながら表面粗度の点で難が残る、シール面での漏水が懸念された。MR ではフランジのシール材を放射線耐性のあるカーボン製のものを使用しており、ゴム材と比べてシール性能がやや劣っている。放射線耐性を有した EPDM ゴムの使用も考えられるため、シール材候補の甲乙はつけがたく、両方のバージョンを製作して導入し、長期試験を実施することにした。

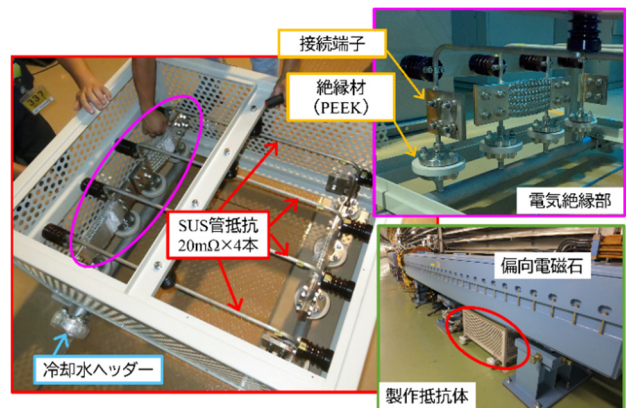


図 3 製作した抵抗体

SUS 管抵抗体はトンネル内設置を想定している。そのため大電流とこれによる高温の発熱に対する安全柵の設置、かつ可能な限り物品移動等を含めた通行の邪魔にならない設置方法も重要な条件である。そこで偏向電磁石の下に長さ 1.1 m × 幅 1 m × 高さ 0.65 m 程度の床スペースがあるため、そこに設置できるように設計した。また、ビームの近くに設置するため、磁性を懸念して念のため SUS 管の材質は SUS316L を選定した。SUS 管抵抗体は 2024 年 9 月に完成した(図 3)。

4. 性能確認試験

4.1 基本性能測定

基本性能として、抵抗値測定・絶縁抵抗・耐水圧試験を実施している。LCR を使用し、SUS 管抵抗体 4 本を直列接続して抵抗値を測定した。90.86 mΩ と測定され、室温での計算値 79.7mΩ に比べ、やや大きい値が得られた。SUS 管の厚み精度から、問題のないレベルであることを確認している。絶縁抵抗は 1000 V メガを用いて測定し、通水無しで 2000 MΩ 以上、通水中で 1.6 MΩ 程度であることを確認した。耐水圧試験では 2.0 MPa で 20 分間の試験を行い、漏れなし・破損なし、を確認した。トンネル内の冷却水ポンプ吐出圧は最大 1.2 MPa 程度である。

4.2 V-I 曲線確認

抵抗体を試験用の電源に接続し、冷却水流量を変えながら DC 150 A から 600 A までの通電試験を実施した。加速器の電磁石に用いられる電源は

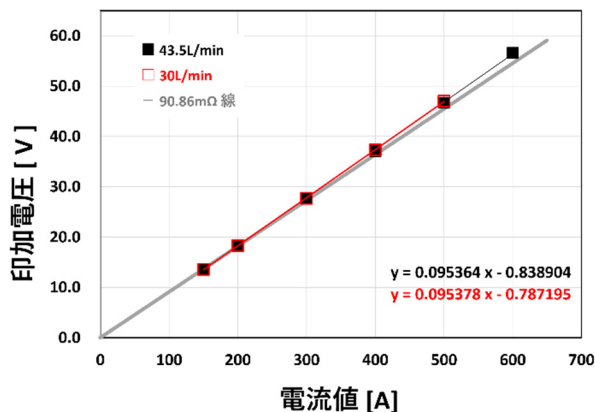


図 4 DC 通電での V-I 特性の結果

電流を精度よく制御するように設計されている。このため電流値は設定値を用い、電圧は高圧プローブを仕込んで測定した。図 4 に測定結果を示す。冷却水流量 43.5 L/min は流速 2.3 m/s に対応し、30.0 L/min は流速 1.6 m/s に対応している。冷却水流量の依らず一定の傾きを示していることがわかる。また発熱による抵抗値増加により、直線フィットの Y 切片はマイナス側に振れていることがわかる。

4.3 冷却水温度上昇確認

図 5 に DC 通電時の電流値に対する SUS 管抵抗体の冷却水温度の上昇値を示す。多項式フィットの結果から DC 1,000 A 時の温度上昇値を外挿で求めると 31.3 °C と見積もられる。MR トンネル内の冷却水の入水温度が 30 °C 程度であることから、問題のない範囲に収まっていることが確認できた。また計算から抵抗体で発熱した熱量のほぼ全てが冷却水の温度上昇になっており、冷却効率が期待通りであることも確認できた。

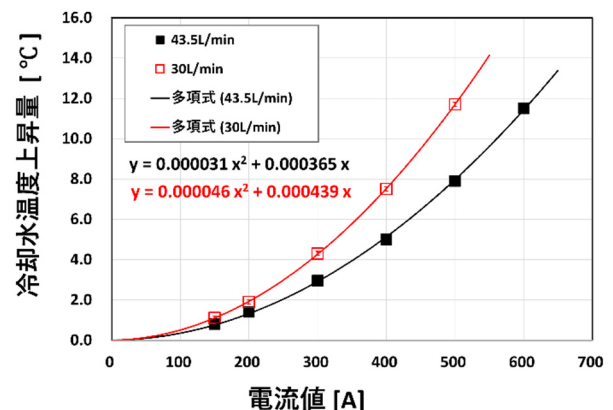


図 5 SUS 管抵抗体での冷却水温度上昇

4.4 SUS 管表面温度確認

図 6 に DC 600 A 通電時の SUS 管表面温度をサーモグラフィーで撮った写真、また右上には電流値と温度上昇の相関を示す。写真中の A~E 点は温度測定点を表し、右下に測定値を記述している。SUS 管の流量方向に沿って温度上昇が確認され、問題のない値であることが確認された。また DC 1,000 A 時の温度上昇値を外挿で求めると 86.6 °C と見積もられた。室温を足すと 100 °C を超えてしまう。冷却水と接する温度ではないため問題はないが、

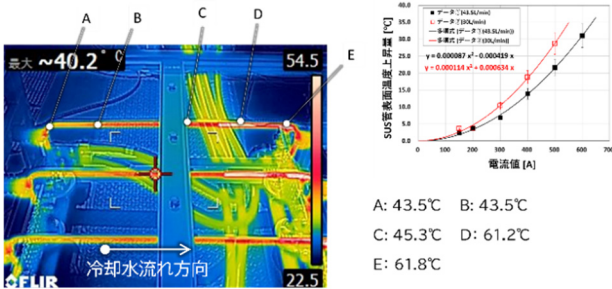


図6 通電時の SUS 管表面の温度上昇

トンネル内は流量に余裕があるため、冷却水流量を大きくして表面温度を下げて運用することを計画している。

4.5 パターン通電

最後にパターン通電の結果を図7に示す。右下にあるのがパターン電流と電圧の波形を示し、1.28秒周期、フラットトップ1,500A、実効値に換算して680A、今回の試験で最大電力の値となる。左側がフラットトップ電流値や周期を変えて取った、実効電流値に対するSUS管表面温度の値である。現行の運転周期1.36秒でフラットトップ1,500Aの7時間連続パターン通電も実施し、異常なく完了した。

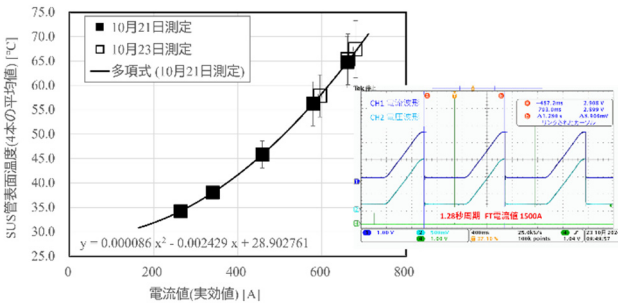


図7 DC 通電での V-I 曲線確認結果

5. 結論と今後

2024年10月の通電試験の結果、製作したSUS管抵抗体が充分要求を満たすものである事が確認できた。試験結果で唯一充分な理論的計算を行っていない点がSUS管抵抗体表面の温度上昇である。測定の結果問題ない上昇量であると判断したが、この温度の理論計算値についても充分な理解が必要であると考えており今後の課題である。今後の計画として2025年秋以降、本SUS管抵抗体を四

極電磁石の実負荷としてまず地上の実電源付近に設置導入する。地上部で実負荷としての充分な実績を確認した後MRトンネル内への最終的な導入を目指す。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/>
- [2] Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring, Susumu Igarashi et.al, 2021

謝辞

J-PARCの現場でいつもお世話になっている株式会社NAT 佐藤さん 湯井さん 木村さん、吉浦さんには、性能確認の場面などで、機器との配線・配管接続などの作業に多大な協力いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。