

J-PARC MR 入射キッカー電磁石のための 新しいインピーダンス整合回路の性能評価 PERFORMANCE OF NEW IMPEDANCE MATCHING CIRCUIT FOR J-PARC MR INJECTION KICKER MAGNET

杉本拓也*, 石井恒次, 芝田達伸, 岩田宗磨, 松本浩

Takuya Sugimoto*, Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Soma Iwata, Hiroshi Matsumoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

This paper describes the improvements achieved in the impedance matching circuit for the 1.3 MW beam operation of the Japan Proton Accelerator Complex main ring injection kicker magnet. According to previous studies, maximum surface temperature of the resistors will be exceeded 350 °C due to the joule heat of both pulse excitation current and beam induced current during continuous 1.3 MW operation. In this regard, the number of paralleled resistors was doubled, and the volume of each resistor was enlarged 4.5 times to lower the temperature of the resistors under the higher repetition rate pulse excitation. In addition, the resistor cylinders were filled with ceramic-based beads of 3 mm diameter to increase the heat conductivity. Moreover, an aluminum-made water-cooled heat sink was attached to the resistors directly, and an air-cooling fan was mounted on the side of the box containing the resistors. All resistors and their support structure in the matching circuit were replaced in May 2022. The temperature increment of resistors during continuous pulse excitation with 1.36 s repetition rate was measured using a thermography camera, and the measured value was compared with numerical calculations. Finally, the prediction results related to the beam image current obtained with the simulation model were discussed.

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。2021 年 4 月の利用運転で、515 kW (繰り返し周期: 2.48 s, 1 サイクルあたりの粒子数: 2.66×10^{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ために、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 s, 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]。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 ms 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 [2, 3]。

入射キッカー電磁石には、インピーダンス整合のための抵抗器が 2 種類搭載されている。一つはコイルに直列接続された抵抗器 (コイル側抵抗器) で、もう一つは LR 回路に並列に接続された CR 回路の抵抗器 (コンデンサ側抵抗器) である。コイル側抵抗器は、励磁パルス電流とビームがキッカー電磁石を通過することにより回路に流る電流の 2 つによって発熱する。一方、コンデンサ側抵抗器はビーム通過による電流によってのみ発熱する。励磁パルス電

流は、フラットトップが最大で 2800 A、パルス幅が 1.5 μ s のパルスが 1 サイクルに 4 回抵抗器に流れる。抵抗値が 9.3 Ω なので、1 パルスあたりのエネルギーは 109.4 J となり、1 サイクルではその 4 倍の 437.5 J となる。サイクルの繰り返し周期が 1.16 s になると、発熱量は 377.2 W と見積もることが出来る。また、陽子ビームがキッカー電磁石中を通過すると、ビームが作る電磁場との相互作用により、コイルに電流が流れる。陽子ビームは正の電荷を持った粒子の塊であるため、無限速からコイルに向かってビームが近づくと、コイルには負の鏡像電荷 (つまり電子) が集まってくる。電子は電磁石の接地極よりコイルに供給される。そのため、コイルに接続されたインピーダンス整合回路には電子の移動方向と逆向きのイメージ電流が流れる。電流の大きさはバンチあたりの粒子数に依存する。これまでの研究で、1.3 MW のビーム出力で連続運転を行った時のビーム電流による発熱量は、サーモラベルを用いた温度上昇の測定から、それぞれの抵抗器で約 200 W となると見積られたため、抵抗器の表面温度は、コイル側抵抗器が 350 °C 以上に、コンデンサ側抵抗器が 200 °C 以上になる事が予想された [4]。抵抗器の劣化を防ぐために最大温度 150 °C 以下で使用することがメーカーにより推奨されているため、それぞれの抵抗器の容量を増やし、さらに冷却系を増強した新しいインピーダンス整合回路を設計した。設計をする際の発熱量は、パルス電流による発熱を 400 W、ビーム電流による発熱を 600 W (3 倍の安全係数を見込む) とした。抵抗器の容量を増やすため、2011 年に入射キッカーを製作した際の抵抗器 (東海高熱工業社製エレマ抵抗器、外径 20 mm、内径 14 mm、長さ 170 mm) の外径

* takuya.sugimoto@j-parc.jp

を大きくすることを検討したが、外径が 40 mm を越えるとセラミック材料の組成が変わるため、のちに述べる電極のロウ付ができなかった。また、長さが長くなると、抵抗体の反りや曲がりが大きくなってしまったため、200 mm 以下を検討した。最終的には外径 30 mm、内径 21 mm、長さが 200 mm と 170 mm の 2 つが試作された。抵抗器の並列数は、抵抗器と冷却系を組み付けたユニットが大きくなりすぎないように、コイル側抵抗器は並列数を 15 本から 30 本へ、コンデンサ側抵抗器は長さを 10 mm から 170 mm へと変更することにした。抵抗器の冷却は、元々は電極板に銅パイプをろう付けし、水を流すことで冷却していたが、冷却能力を増やすため、カワソーテクセル社製のアルミ製水冷ヒートシンクを採用した。また、抵抗器の側面から空冷ファンで強制空冷するようにした。空冷ファンは、開口部の直径が 250 mm と大きく、最大風量が $20 \text{ m}^3/\text{min}$ ある AC プロペラファン（オリエンタルモーター社製 MRS25）を採用した。熱線式風速・風量計（AM-4224SD）を用いて風速を測定したところ、最大で 10 m/s であったことから、熱伝達係数が $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 以上の十分な冷却能力が期待できる。さらに、抵抗器内部にセラミック製のビーズを挿入して熱伝導率を向上し、間接的に冷却する方式を考案した。試作した抵抗器を 1 kW の発熱量で発熱させ、冷却した際の表面温度を CST Studio Suite の Conjugate Heat Transition Solver で計算したところ、共に抵抗器の表面温度を 100°C 程度で連続運転が可能であると予想された。エレマ抵抗器の製品のうち、アルミ断面電極タイプの抵抗器では、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、導電性セラミックに対して銅電極を直接ろう付けする技術を開発した [3, 5]。数種類の大きさの抵抗器を試作し、電極のロウ付を試みたところ、外径 30 mm、内径 21 mm の抵抗器であれば、良好にロウ付出来ることがわかった。抵抗器が大きくなったことにより、再び電極とセラミックの接合部分で放電が発生する懸念があったため、試作した 2 種類の抵抗器を新しい抵抗器ユニットに搭載し、KEK つくばキャンパスの試験設備において 1000 時間以上の連続パルス通電試験を実施した [6]。この通電試験で、長さが 200 mm の抵抗器では、ロウ付加工後に抵抗体が熱収縮し、ロウ付面が抵抗体から剥離したことが原因と考えられる放電が観測された。一方で長さが 170 mm の抵抗器は放電しなかったため、2020 年から 2022 年にかけて量産した。

2. 抵抗器の量産

セラミック抵抗体の形成と焼成が東海高熱工業株式会社で行われた。その後、抵抗器への電極のろう付加工は、株式会社 MARUWA にて実施された。電極がろう付けされた抵抗器は、再び東海高熱工業に送られ、抵抗値の調整と塗装が行われた。塗装はこれまでのシリコンタイプの塗料（赤色）から、エポキシタイプの塗料（黒色）に変更した (Fig. 1 (a))。エポキシタイプに変更し、ロウ付部分も塗料を塗ったことで、放電の抑制ならびに強度の向上が期待できる。

4 台のキッカー電磁石全ての抵抗器を換装するために、コイル側の抵抗器を 320 本（30 本 × 8 ユニット + 予備）、コンデンサ側の抵抗器を 200 本（15 本 × 8 ユニット + 予備）を量産した。抵抗値調整後の抵抗値の平均値は、目標値（コイル側： $279 \Omega \pm 10\%$ 、コンデンサ側： $139 \Omega \pm 10\%$ ）に対して、コイル側が $264.5 \pm 4.2 \Omega$ 、コンデンサ側が $133.0 \pm 2.3 \Omega$ であった（誤差は標準偏差を示す）。抵抗値が目標値よりも低かったため、並列接続数をコイル側は 30 本から 29 本に、コンデンサ側は 15 本から 14 本に減らすことで合成抵抗を調整した。合成抵抗はユニット毎にばらつきがあり、コイル側は 9.2Ω から 9.4Ω に、コンデンサ側は 9.6Ω から 9.8Ω となった。陽子ビームは 8 台のコイルの磁場を合成した磁場によって曲げられ、磁場の大きさは各コイルの励磁電流（つまり PFL の充電電圧）によって調整することができるため、抵抗値に多少のばらつきがあっても問題とはならず、今回も許容範囲内であると考えている。抵抗器の内部には、熱伝導率を改善するため、アルミナ製のビーズ（直径 3 mm）を充填した (Fig. 1 (b))。

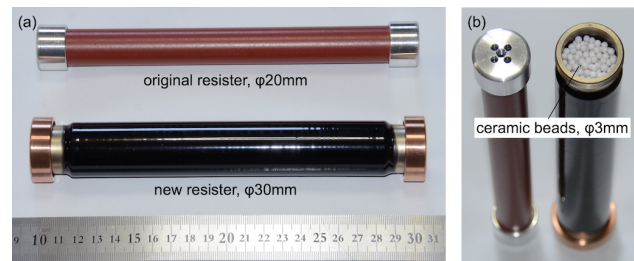


Figure 1: (a) Ceramic resistors; original (upper) and new (lower). (b) Ceramic beads packed into the resistor.

3. 実機へのインストール

これまで、真空槽の上部に設置されたステンレス容器に抵抗器ユニットを固定し、フィードスルーを介してコイルと接続していた [3]。しかし、抵抗器の長さが長くなった事に加え、大きな空冷ファンを取り付けるため、新たな容器を製作する必要があった。今回は、インピーダンス整合回路を乾燥窒素でパージする必要がないため、アルミフレームとアルミパネルを組み合わせて真空槽に設置する事にした。Figure 2 に、新しい整合ボックスの写真を示す。2022 年 5 月に、これまでの抵抗器ユニットとステンレス容器を全て取り外し、予め組み立てておいたアルミフレームを真空チェンバーに設置し、新しい抵抗器ユニットを搭載した。その後、冷却水配管を接続して 7 L/min 程度の水を流しながら通電試験を実施した。

4. 通電試験結果

4.1 パルス波形

Figure 3 に、抵抗器交換前後のパルス波形を示す。各ユニットで合成抵抗値を完全に以前と同じにする

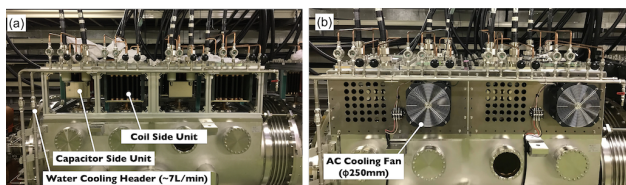


Figure 2: New matching boxes before attaching the cooling fan (a) and after (b).

ことは出来ないため、フラットトップで規格化して波形を比較している。陽子ビームは8つのコイルが作る磁場分布を合計した波形により軌道を曲げられるため、8台分の波形を合計したもので比較している。変更の前後で、立ち上がり時間や反射波、パルスのタイミングがほぼ同じであることを確認した。また、数時間の連続通電を実施し、放電がないことを確認した。2022年6月のビーム試験では、抵抗器ユニットの交換がビーム入射に影響しないことを確認した。

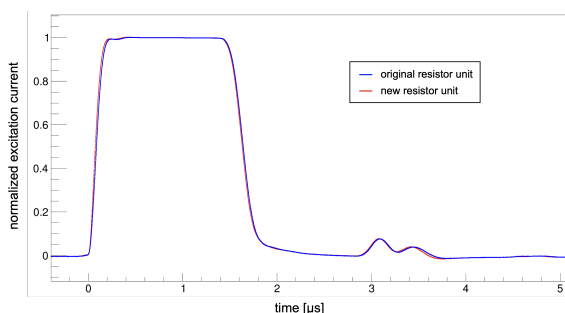


Figure 3: Waveforms of the excitation pulse current for original setup (blue) and new setup (red), which are normalized to the flat top value.

4.2 抵抗器表面温度

抵抗器ユニットを取り付け、冷却水を流した後に、充電電圧 53 kV、繰り返し周期 1.36 s で数時間連続して通電し、抵抗器の表面温度を測定した。この時の抵抗器での発熱量は 324 W であった。表面温度を測定するため、空冷ファンとボックス側面のパネルは取り外して通電した。Figure 4 サーモカメラを用いて測定したコイル側抵抗器ユニットの表面温度を示す。抵抗器ユニットの中心部に設置された抵抗器の温度が最も高く、102°C であった。交換前の抵抗器ユニットでは、約 10 分の連続通電で 134°C になっていたため、抵抗器ユニットの交換により温度が下がったことを確認することができた。また、別の抵抗器に取り付けたサーモラベルでの測定では、90°C 程度であることがわかった。この部分をサーモカメラで測定すると、94.2°C であったので、サーモラベルでの測定値とほぼ一致していることがわかった。この測定中の冷却水の流量は 7 L/min で、通電中の冷却水の温度上昇が 1°C であったので、冷却水が得た熱量は 490 W と求められた。冷却水 1 系統あたり 4 つのユニットが接続されているので、ユニットあ

たりの冷却能力は 122.5 W となる。これは充電電圧 53 kV、1.32 s 周期における抵抗器での発熱量 324 W の 36% に相当する。

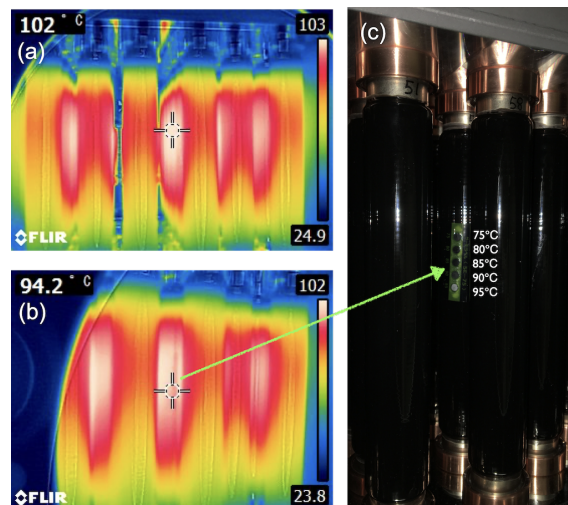


Figure 4: Temperature of the resistors of the coil side for heating value of 324 W. (a) Maximum temperature at the center of the resistor unit. (b) Temperature of the resistor where a thermal label was attached. (c) Picture of the thermal label.

5 考察

5.1 励磁電流による抵抗器の加熱

Figure 5 に、CST Studio Suite にある Conjugate Heat Transfer Solver を使い、324 W で連続通電中の抵抗器のコイル側抵抗器の表面温度の計算結果を示す。CST では流水による冷却の計算が出来ないため、水冷アルミヒートシンクで 120 W の吸熱があるとして評価した。測定では中心温度が 102°C であったのに対し、モデルでは 90°C であった。また、サーモラベルを添付した部分では、測定が 94.2°C に対し、モデルは 84.2°C であった。モデルの値が測定値より低い原因として、抵抗器内部に充填したセラミック製のビーズが円柱としてモデルに組み込まれている点と、セラミックビーズ同士の接触熱抵抗がモデルでは考慮されていない点の 2 つがあると考えている。しかし、表面温度の予測精度としては十分であると判断し、このモデルを用いて 1.3 MW 運転時の温度上昇を予測することにした。

5.2 ビーム電流による抵抗器の加熱

これまで、抵抗器ユニットの設計の際、ビームによる発熱量として実測から予想した 200 W に安全係数をかけた 600 W という値を用いてきた。しかし、この安全係数には何も根拠がなかった。よって今回、シミュレーションを用いて予想値の検証と安全係数の妥当性について評価することにした。大電流陽子ビームがキッカー電磁石を通過すると、ビーム電荷が作る電場によるイメージ電流と、磁場による誘導電流が流れる。イメージ電流の波形は、beam pickup

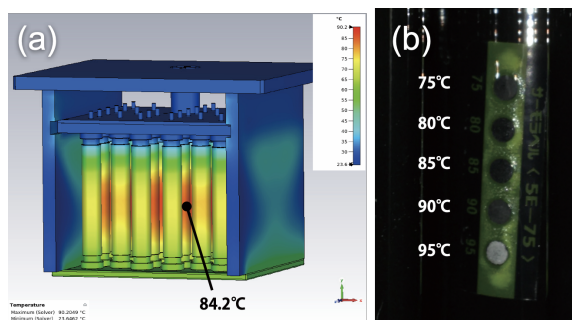


Figure 5: Comparison between (a) CST simulation and (b) measurement by the thermal label attached on the resistor.

との類似性よりビーム電流波形の微分形になる [7]。キッカーコイルの周囲には透磁率の高いフェライトが設置されており、ビームの作る磁場の変化を打ち消す方向に誘導電圧がコイルに発生し、その結果インピーダンス整合回路に電流が流れる。このように、ビームとコイルが電場と磁場の両方で結合しているため、解析的な解を得ることは難しい。そのため、今回は CST Studio Suite にある Wakefield Solver を使い、数値解析を行うことで評価を行った。

Figure 6 に、評価に用いたビーム電流波形と抵抗器に流れる電流波形を示す。ビーム電流波形はガウス分布を仮定し、パンチ幅を $\pm 3\sigma$ とした。抵抗器に流れる電流波形は、ガウス分布の微分近く、長いテールを持つことがわかった。等価回路による計算により、このテールはインピーダンス整合回路に取り付けた RC 回路の影響によるものだということがわかった。それぞれの抵抗器での平均消費電力 P_{av} は、

$$P_{av} = \frac{\int I^2(t) R dt N_{bunch}}{T_{rev}} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $I(t)$ はシミュレーションにより求めた、ビームが通過することにより抵抗器に流れる電流分布、 R は合成抵抗値、 N_{bunch} はパンチ数で 8、 T_{rev} は陽子パンチがリングを 1 周する時間で $5.38 \mu s$ として計算した。系の対称性から、片側の抵抗器ユニット（コイル側：Load2、コンデンサ側：RC2）の出力波形を用いて評価した。入力パラメータとして、③ビーム位置（ x 方向、 y 方向）、②粒子数（＝電荷量）、③パンチ長の 3 つを変化させ、それぞれの依存性を調べた。

5.2.1 ビーム位置依存性 陽子ビームがコイルに近づく、コイル表面に集まる電子も増えるため、抵抗器に流れる電流も増えることが予想される。Figure 7 に、CST により計算したビーム位置に対する抵抗器での消費電力を示す。コイル中心を通過する場合に比べ、ビームがコイルに近づくことで、最大で 3 倍程度の消費電力となることがわかった。一方で、垂直方向の変位により、発熱量が増加することがないことも確認することができた。

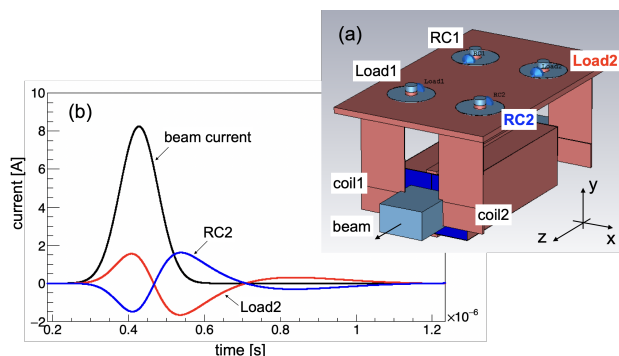


Figure 6: (a) Simulation setup modeled on the CST Studio Suite. (b) Waveform of input beam current (black) and image current of resistor for the coil side (red) and the capacitor side (blue).

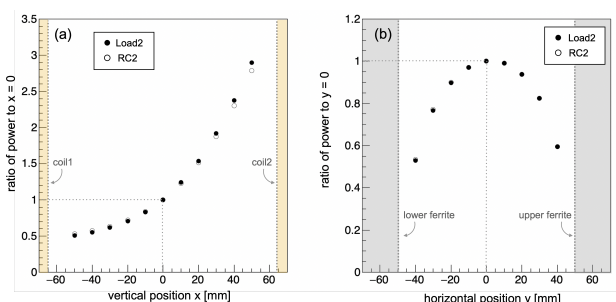


Figure 7: Beam position dependencies of the average power of each resistor units. (a) shows the vertical position dependency and (b) shows the horizontal. Both plots are normalized to the power of the center (i.e. $x=0$ and $y=0$).

5.2.2 ビーム出力依存性 パンチあたりの粒子数が増加すると、コイルに集まる鏡像電荷量も増えるため、抵抗器に流れる電流が増加する。シミュレーションでパンチあたりの粒子数を変化させて、抵抗器に流れる電流の変化を調べた。Figure 8 に、繰り返し周期 2.48 s、パンチ長 300 ns とした時の、ビーム出力と抵抗器で消費される平均電力（＝発熱量）との関係を示す。ビーム出力は、シミュレーションのパラメータである粒子数と繰り返し周期から算出した。この結果より、ビーム出力が 600 kW の時、抵抗器では 220 W の発熱量となることがわかった。ビームの粒子数は、繰り返し周期 2.48 s でビーム出力 600 kW の場合と、繰り返し周期 1.16 s でビーム出力 1.3 MW の場合でほぼ等しいので、繰り返し周期 1.16 s でビーム出力 1.3 MW での発熱量を 220 W 程度として見積もった。これは、サーモラベルを用いて推定した発熱量とほぼ一致しており、測定とシミュレーションが正しく行えていることが証明された。

5.2.3 パンチ長依存性 Figure 9 (a) に、1.3 MW の陽子ビームのパンチ長を変化させた時の抵抗器の発熱量を、パンチ長 300 ns の発熱量（220 W）で規格化したものを示す。パンチ長が短くなるにつれて、

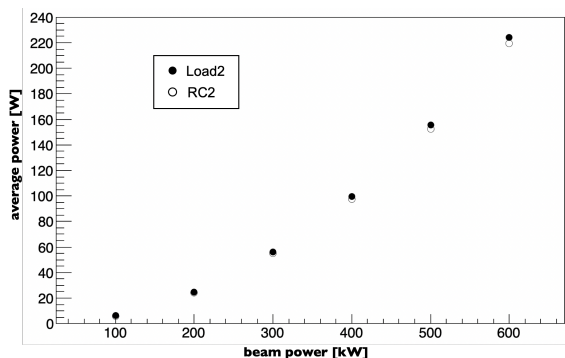


Figure 8: Simulation of the average power of the load1 for three different bunch length settings with $\pm 3\sigma$ of 300 ns, 350 ns, and 400 ns, respectively.

発熱量も上昇することが計算からも示された。陽子ビームは、RCS から MR へ入射される際、RF2 倍高調波によりバンチ長が 300 ns 程度に引き伸ばされるが、加速開始より RF2 倍高調波がなくなるため、加速に伴いバンチ長が短くなっていき、取り出される直前には 40 ns 程度にまで短くなると考えられる (Fig. 9(b) の青線)。簡単のため、ビームを加速する間、バンチ長は線形に減少すると仮定し、シミュレーションより求めた関数を用いて発熱量を計算したところ、Fig. 9 (b) の赤線で示す分布となった。この分布を積分すると、350 J であったことから、繰り返し周期 1.16 s での発熱量は、300 W になると見積もった。

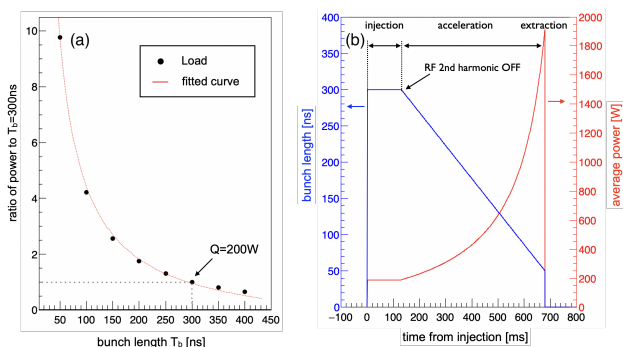


Figure 9: (a) Ratio of average power of load1 to bunch length $T_b = 300$ ns. (b) Bunch length for repetition rate of 1.16 s (blue) and calculated average power of load1 (red).

5.3 1.3 MW 運転時の抵抗器温度

シミュレーション結果を元に、1.3 MW 運転時の抵抗器の表面温度を計算した。既に述べたように、1.3 MW 運転時には、励磁パルス電流による発熱量 400 W とビーム電流による発熱量 300 W に安全係数 f を乗じた値が、それぞれの抵抗器ユニットにおいて発生する。コイル側ユニットとコンデンサ側ユニットの最大温度をシミュレーション結果を Fig. 10 (a) に示す。安全係数 f は、ビーム軌道やバンチ長

の変化による影響を考慮して、 $f = 3$ まで評価した。その結果、空冷ファンが全くない場合では、最大でコイル側抵抗器で 220°C ($Q=1300$ W)、コンデンサ側で 280°C ($Q=900$ W) まで上昇することがわかった。この発熱条件で空冷ファンを動作させた際の温度変化を、Fig. 10 (b) に示す。風速 10 m/s で冷却し続けると、 220°C 程度まで最大温度を下げる事が出来ることがわかった。この時の熱伝達係数は、抵抗器の温度上昇 $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ より $h = 77$ W/m²/K と計算された。運転中にファンが 1 台だけが壊れたと仮定しても、他のファンが動作している状態であれば、弱いながらも風が吹いている状態が期待できるため、すぐに運転を停止する必要はなく、定期メンテナンスまでの数日間は運転を継続しても問題ないと考えている。

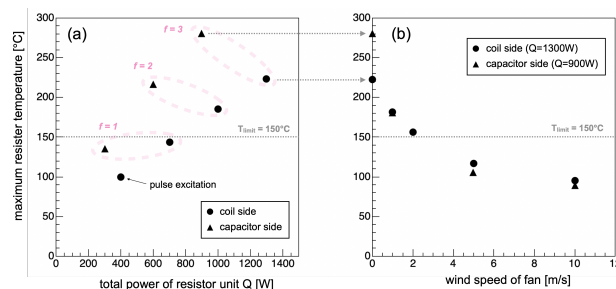


Figure 10: Estimation of resistor temperature for 1.3 MW operation. (a) shows the input power dependency without cooling fan. Parameter f indicates the safety factor to consider the uncertainty of the beam induced heating value. (b) shows the wind speed of the cooling fan for 1.3 MW operation. Dotted line shows the temperature limit of the resistor (T_{limit}) for continuous operation.

6. まとめと今後

J-PARC メインリングでは、早い取り出しによるビーム出力 1.3 MW での利用運転を計画している。繰り返し周期の短縮とビーム粒子数の増加により、入射キッカー電磁石のインピーダンス整合回路の抵抗器が発熱し、 350°C を越えることが予想されたため、抵抗器ユニットの増強を行なった。2022 年 5 月に全ての抵抗器を入れ替え、通電試験を実施した。この結果とシミュレーションにより、1.3 MW 運転時の抵抗器の最大温度を評価し、空冷ファンを用いることで 100°C 程度で安定に運転することが可能であることがわかった。これにより入射キッカーの改良は完了した。今後は定期的に抵抗器の状態をチェックし、必要に応じて交換などを実施して性能を維持していく。

謝辞

抵抗器の開発ならびに製作にご協力いただいた、東海高熱工業株式会社ならびに株式会社 MARUWA の皆様に心より感謝いたします。

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] 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.
- [3] T.Sugimoto *et al.*, “Performance of Injection Kicker Magnet for the J-PARC Main Ring”, in *Proc. PASJ’12*, Osaka, Japan, Aug. 2012.
- [4] 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.
- [5] T. Sugimoto *et al.*, “Development of a Non-inductive Ceramic Resistor”, in *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, May 2013, paper MOPWA004, pp. 669–671.
- [6] T.Sugimoto *et al.*, “Performance of new termination resistors of J-PARC Main Ring injection kicker magnet”, in *Proc. PASJ’20*, Online, Aug. 2020.
- [7] P.Forck “Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics”, in *Joint University Accelerator School*, Jan. - Mar. 2006.