PASJ2021 TUP013

J-PARC 主リング主電磁石用電源のための出力フィルタ抵抗器の耐パルス設計 DESIGN OF OUTPUT FILTER RESISTORS BASED ON PULSE LOAD CAPABILITY FOR J-PARC MR MAIN MAGNET POWER SUPPLY

森田裕一^{#, A)}, 三浦一喜^{A)}, 下川哲司^{A)}, 石井恒次^{A)}, 栗本佳典^{A)}, 佐川隆^{B)}

Yuichi Morita ^{#, A)}, Kazuki Miura^{A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Koji Ishii^{A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Universal Engineering

Abstract

The repetition rate of J-PARC main ring will be increased from present 2.5 s to 1.3 s for the upgrade of the beam power. Two issues on main magnet power supplies arise from this upgrade. 1) The output voltages of the main magnet power supplies are increased. 2) The power variation at the power grid induced by the cycled excitation of main magnets is increased. New power supplies that are possible to solve these problems are developed and will be replaced with the existing power supplies. A first new power supply for a bending magnet family was delivered to the J-PARC site in 2017. High power testing using the actual bending magnet family was performed during a long shutdown period of the J-PARC main ring, then, resistors of an output filter in the new power supply were damaged. The investigation results showed the pulse load capabilities of the resistors were insufficient for the pulsed current flowing the resistors in high power operation. The pulse load capability was estimated again and appropriate resistors were selected. This paper reports the comparison of conventional high power resistors and the design of the resistors for the output filter based on the pulse load capability.

1. はじめに

J-PARC 主リングではビーム取出しの繰返し周期を速めることによりビームパワーを増強する計画が進められている。現状のビームパワー約 500 kW に対し、T2K 実験が要求するビームパワーは 2022 年に 750 kW である。 ビームパワー750 kW 達成のためには主リングの繰り返し 周期を現状の 2.5 s から 1.3 s へ速める必要がある[1]。

高繰返し化の計画の中で最も重要なプロジェクトに位 置付けられているのが主電磁石電源の更新である。高 繰返し化に伴い、電源の出力電圧と電力系統の電力変 動が増大する。これらに対応するため、主電磁石電源を 新しく開発し、現行電源の一部と置き換える。

新規開発した主電磁石電源の一つである偏向電磁石 電源(BM PS)が 2017 年に納品され、実際の偏向電磁 石を負荷として通電試験を行った。定格出力電流・電圧 でのパターン通電を実施し、通電条件の最適化を進め ていた。

定格出力での通電中に出力フィルタの抵抗器が破損 したため、原因の究明と新しい抵抗器の選定を行った。 抵抗器に流れていたと考えられる電流を回路シミュレー ションにより計算し、抵抗器の許容電力と比較することで 故障の原因がパルス的な電力に対する耐量不足である ことを特定した。さらに、十分なパルスエネルギー耐量を もつ抵抗器を選定して試作機を製作、性能評価試験を 行った後、抵抗器実機ユニットを製作・インストールして 通電試験を行った。

本報告では偏向電磁石用新電源の出力フィルタ抵抗 器故障の故障解析とパルス大電流が流れる抵抗器の選 定及び設計について述べる。 偏向電磁石電源は偏向電磁石 16 台を励磁する電源 であり、主電磁石電源の中で出力電力が最大である。全 6 台の電源により主リングの 96 台の偏向電磁石を励磁 する。6 台の現行電源全てが新電源と置き換わる。偏向 電磁石用新電源の仕様および回路図をそれぞれ Table 1とFig.1 に示す。

Table 1: Specifications of BM PS

Load	1.5 H, 750 mΩ
Output current (A)	1600
Output voltage (V)	6000
Capacitance/C-Bank (mF)	480
Capacitor voltage (V)	1700 maximum

偏向電磁石用新電源は高繰返し化により引き起こされる大きな出力電圧および系統の電力変動抑制を可能とするように設計されている[1,2]。大きな出力電圧(最大6kV)を出力するため、3.3kV IGBTを用いたフルブリッジ DC/DC コンバータを6 直列にしている。系統の電力変動を抑えるためにコンデンサバンクによるエネルギー 貯蔵方式を採る。各DC/DC コンバータに480 mFのコン デンサバンクを接続している。Figure 1 に示したように2 台のDC/DC コンバータはAC/DC コンバータを通して系統と接続しているが、4 台のDC/DC コンバータは系統に つながっていない。この方式によりAC/DC コンバータ及び高圧の変圧器が不要となるため、大幅に省スペース 化できる(フローティングコンデンサ方式[3])。

^{2.} 偏向電磁石電源

[#] yuichi.morita@kek.jp

Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan

PASJ2021 TUP013



Figure 1: Schematic of BM PS circuit.

3. 抵抗器故障および故障解析

3.1 抵抗器故障

2018 年冬期の主リング加速器のシャットダウン期間を 利用して、偏向電磁石用新電源の通電試験を行った。こ の電源は 2017 年に納品された 1 台目の偏向電磁石用 新電源である。トンネル内の実際の偏向電磁石 16 台を 負荷とした。Figure 2 に示す定格出力電流・電圧パター ンでの通電を確認後、各 DC/DC コンバータの出力電圧 分担および AC/DC コンバータの受電電力パターンの最 適化を行っていた。



Figure 2: Plots of output current (I_{out}) and voltage (V_{out}).

1.3 s 繰返しのパターンで通電中に出力フィルタの抵抗器が破損した。通電中に大きな破裂音が聞こえ、それと同時に電源が停止した。電源内部を目視で調査すると出力フィルタを構成する抵抗器ユニット3(Fig.1の赤丸)の中の抵抗器 1 台が破損しているのが見つかった(Fig.3)。出力フィルタの回路図を Fig.4 に示す。EGB 社の厚膜抵抗器 UXP-2000 (2.7Ω)を2 直列 6 並列とし、1 枚の水冷ヒートシンクの両面にマウントしている。UXP-2000の仕様を Table 2 に示す。破損した抵抗器ユニット(ユニット3)と破損していない抵抗器ユニットのうち 2 台(ユ

ニット4と5)の全36台のUXP-2000の抵抗値を測定した。ユニット3では12台中8台の抵抗値が高くなっていた。そのうち6台がk Ω 以上となっていた。ユニット4では12台中3台の抵抗値が高く、ユニット5では12台中1 台の抵抗値が高かった。ユニット5では12台中1 台の抵抗値が高かった。ユニット4と5ではk Ω ほど大きくなっているものは無く、高々12 Ω であった。目視で破損が確認された抵抗器以外にも異常が認められていることから、抵抗器の電力許容量の見積もりが不足していて、常時過負荷の状態だったと推測した。



Figure 3: Damaged resistor.



Figure 4: Circuit diagram of output filter.

3.2 故障解析

通電試験時に抵抗器に流れていた電流をシミュレー ションすることで故障の原因は抵抗器のパルス耐電力不 足であることを特定した。回路シミュレーションにより、故 障前にフィルタ抵抗器に繰り返し流れていた電流波形を 計算した結果が Fig. 5 である。この波形の電流実効値は 約 30 A である。よって、0.9 Ωの抵抗器ユニットの電力実 効値は 0.8 kW であり、負荷軽減率を 75%(抵抗器ケー ス下部の温度 140℃のとき)と仮定しても負荷率は 4%で ある。しかし、パルス的な電力を考えると負荷率が不足し ていることがわかった。 厚膜抵抗器は 0.01 s 未満のパル ス幅、且つ 0.01 未満の duty という条件下でないと定格 電力以上の電力が許容されない[4]。Figure 5 のパルス 電流はこの条件を満たす境界の辺りであるから、2 kW (UXP-2000の定格電力)以上の電力耐量は期待せず設 計しなければならない。Figure 5 からピーク電流は 375 A なので、抵抗器ユニットのピーク電力は 127 kW となる。 負荷軽減率を 100%としても負荷率は 500%以上であっ たことになる。よって、電力実効値は許容量以内であっ たが、パルス的な電力に対しての検討が不足していたこ とが故障の原因であった。故障した抵抗器をメーカーに 送って調査を依頼した結果でも、抵抗層の焼け跡の観 察から、過大なパルスエネルギーが与えられた可能性が

PASJ2021 TUP013

最も高いという見解を得ている。

この抵抗器の故障は、出力電流パターン中の0.1 s間 のスムージング箇所(Fig. 2)において出力電圧の変化に よりフィルタコンデンサが放電したパルス電流により引き 起こされたものであるが、実は最も厳しい条件となるのは 電流立ち上げ、下げのタイミングに何らかの電源の異常 が発生し、インターロックが動作して出力電流が急激に 減少する場合である。Figure 2 からわかるように当該タイ ミングにおいて出力電圧が最大(6 kV、6 直列であるから フィルタ当たり1 kV)であり、フィルタコンデンサが最大に 充電される。インターロックが働くと Fig. 4 のコンデンサに 充電された電荷をフィルタ抵抗で放電することになる。電 源出力電圧 1.2 kV 時のピーク電流実測値 450 A から外 挿すると、発生し得る最大のピーク電流は 2.3 kA である。 実効パルス幅 0.01 s の矩形波に近似するとパルスエネ ルギーは 46 kJ である。

Table 2: Specifications of UXP-2000 [4]

Resistance (Ω)	2.7
Power rating (W)	2000
Maximum working voltage (Vdc)	5000
Size (mm) (excluding terminals)	$60 \times 57 \times 15$



Figure 5: Simulated current flowing resistor unit.

4. 大電力抵抗器

4.1 抵抗器の選定

各種大電力抵抗器を比較し、パルスエネルギーおよ び実効値電力に耐えられる抵抗器を選定する。抵抗器 の選定の際には、連続的な熱負荷の検討に加えて、パ ルス的な熱負荷に対する許容値の計算も必要となる。第 3章で述べたように抵抗器ユニット1台(0.9Ω)に印加さ れ得る最大のパルスエネルギーは46kJであり、連続運 転時の熱負荷の実効値は0.8kWである。UXP-2000を 引き続き使う場合はパルス幅0.01s、負荷軽減率100%と しても抵抗器ユニットが2000台以上も必要となり、現実 的でないサイズとなってしまう。よって、パルスエネル ギー耐量に優れた抵抗器を新たに選定しなければなら ない。

約500W以上の定格電力をもつ代表的な抵抗器を列 挙する。それぞれの仕様は Table 3 の通りである(ただし、 厚膜抵抗器を除く)。

- 参線抵抗器:絶縁体(セラミック)のロッドに抵抗体であるニクロム線やマンガン線を巻きつけた構造である。低インダクタンスが求められる場合は巻き方によって(例えば Ayrton-Perry 巻き)インダクタンスを下げることが可能である。巻線がむき出しの製品もあるが、絶縁材で被覆されたものが大部分である。被覆を施すことで使用環境による巻線の腐食、巻線の弛緩を防ぐことができる。定格約500W以上の大電力品は被覆の方法によって以下のように分類できる。
 - ホーロー、不燃性塗料、セメントで被覆したもの。 次項のメタルクラッドと異なり薄い被覆であるため、外観はロッド形状のままである。ホーローは 熱的にも化学的にも安定で長年使われてきた 被覆であるが、価格が高いため、近年では塩害や油中等、厳しい環境以外では比較的安価な 不燃性塗料やセメントによる被覆に置き換わり つつある[5]。巻線の断面を円ではなくリボン状 にしたものもある。リボン形状は導体が薄く、放 熟表面積を大きくできるため、低抵抗かつ大電 流の抵抗器となる[6]。また、絶縁体ロッドの内側 が流路になった水冷タイプもある[7]。
 - セメントあるいはシリカで覆い、アルミのシャーシ に収めたもの(メタルクラッドと呼ばれる)[8]。メタ ルクラッドは絶縁および耐環境に優れている。 シャーシにフィンを付けたりヒートシンクにマウン トすることで冷却効率を上げることができる。
- エレマ抵抗器:アルミナとシリカから成るセラミックの 抵抗器である。体抵抗であるため低インダクタンス である。空冷で定格電力~500 W 以上のものは円筒 形状の SP 抵抗器であり、水中や油中で使用可能 である。水冷タイプには SP 抵抗器内部を流路とす る直接水冷タイプ(W)および円板状抵抗器の両面 に水冷帯を取り付けた間接水冷タイプ(WD)がある [9]。
- グリッド抵抗器:ステンレス抵抗体のプレートを複数 枚接続してユニット化した抵抗器である。短時間過 負荷に強くモーターの起動回路やブレーキ抵抗と して使われている。高調波フィルタの抵抗器として も使われる。用途が特殊であるが、参考として定格 電力が比較的小さな GRE1 の仕様を Table 3 に載 せた。
- 厚膜抵抗器:故障した抵抗器のタイプである。ヒートシンクに取り付けることを前提とした小型、低インダクタンスの抵抗器である。抵抗体は絶縁材のプレート上に形成された厚膜導体である。第3章で述べたようにパルス電流が流れる場合はパルス的な電力の許容値に気を付けて設計しなければならない。

4.2 メタルクラッド巻線抵抗器を用いた試作

予備品として保管されていたメタルクラッド巻線抵抗器 IRV800PN(4.5 Ω)を用いて試作機を製作した。 IRV800PN の仕様と試作機の外観及び回路図をそれぞ れ Table 4と Fig. 6 に示す。4 直列(18 Ω)を2 セット用意 し、各セット毎に1 枚の水冷ヒートシンクに取り付けた。 Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan

PASJ2021 TUP013

Туре	Coated wirewound C42T (3.6 Ω) Vishay Intertechnology, Inc.	Metal clad wirewound ULV1200PN (3.6 Ω) Nikkohm Co., Ltd.	Erema ER500SP Tokai Konetsu Kogyo Co., Ltd.	Grid GRE1 Vishay Intertechnology, Inc.
Pulse capacity (kJ)	12 (< 0.1 s)	28 (≤ 0.1 s)	19.8	40001
Power ² (W)	480	480	500	1300
Volume ^o (cm ^o)	32	1460	880 22 5	240
(J/cm ³)	52	17	22.0	210
Power / volume (W/cm ³)	1.3	0.33	0.57	0.076
Withstand voltage (V)	3000	5400	Depends on connectors	2500
Resistor region	1.0 - 56k	0.1 – 12	0.56 - 330	0.02 - 6.9

4.3

Table 3: High Power Resistors[10-13]

ヒートシンク2枚を冷却水配管で直列につなぎ、流量を8 L/minとした。各セットに直流電源を接続してそれぞれに 1.6kWの電力を与えた。環境温度を80℃と仮定すると、 負荷軽減曲線のカタログ値は75%であり、負荷率は67% となる。抵抗器表面の温度は53℃程度で平衡状態に なった。一方、ヒートシンク2枚を通った冷却水温度の上 昇(4.9 K)から、抵抗器に与えられた総熱量3.2 kWの8 割程度が冷却水により除熱されることがわかった。 ULV1200PN等の定格電力の大きな抵抗器を選定すれ ば現実的なサイズで抵抗器実機ユニットを製作すること が可能である。

Table 4: Specifications of IRV800PN [11]

Resistance (Ω)	4.5
Power rating (W)(water cooling)	800
Maximum working voltage (kV)	5
Size (mm)(width \times height \times length)	$61\times59\times286$



Figure 6: Appearance of prototype resistor unit using IRV800PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

予備品として保管されていたエレマ抵抗器 SP230W(Table 5)を用いて試作機を製作した。3 直列 15 並列(0.88 Ω)としている。外観と回路図を Fig. 7 に示す。 抵抗器 45 本から成る構造体をステンレス円筒で覆い、 上部にファンを設置して強制空冷とする。ステンレス円筒 の下部に吸気口としてパンチング穴を開けている。偏向 電磁石用新電源の出力フィルタに組み込んで通電試験 を行った。電流パターンを調節し、試作抵抗器ユニットに 流れる電流実効値を50Aとした。電力の実効値は2250 Wとなる。試作機の定格電力は10.35kW であるから、負 荷軽減率を70%(周囲温度110℃での値)と仮定すると負 荷率は 31%である。抵抗器表面の温度は風速の違いに よるばらつきがあるが、最大のものは約80℃で平衡状態 になった。2250 W が全て抵抗器で消費されると考えると、 吸気と排気の温度差の計算値は 7.05℃である。実測に おいても 7.6℃となって設計とよく一致した。ER500SP 等 の電力容量の大きな抵抗器を選定すれば現実的なサイ ズで抵抗器実機ユニットを製作することが可能である。

エレマ抵抗器を用いた試作

Table 5: Specifications of SP230W [14]

Resistance (Ω)	4.4
Power rating (W)	230
Short time overload (J)	6240
Maximum working voltage (kV)	5
Maximum continuous current (A)	760
Size (mm)(outer \times inner diameters \times length)	$40\times32\times200$

¹ ステンレス抵抗体の融点 1400℃、比熱 460 J/(kg·K)、重量 7

kgと仮定して概算。

² 自然空冷の場合。

³ 外寸で計算した体積。

Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan

PASJ2021 TUP013



Figure 7: Appearance of prototype resistor unit using SP230W (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

4.4 フィルタ抵抗器実機ユニット

試作ではメタルクラッド巻線抵抗器もエレマ抵抗器もどちらも有望であったが、以下の理由でメタルクラッド巻線 抵抗器を採用した。フィルタ盤内の UXP-2000 に使用していた既設の冷却水配管を利用して容易にヒートシンク による冷却が可能である。さらに、Table 3 によると自然空 冷の抵抗器単体ではエレマ抵抗器の方が省スペースだ が、水冷メタルクラッド抵抗器と強制空冷エレマ抵抗器を 比べると水冷メタルクラッド抵抗器の方がコンパクトである。 尚且つ気中放熱を 8 割減少できるので、建屋の空調の 負担を抑えることができる。

メタルクラッド巻線抵抗器 ULV1200PN(3.6 Ω)を用い てフィルタ抵抗器の実機ユニットを製作した。抵抗器の 仕様は Table 3 の通りである。2 直列 8 並列(0.9 Ω)として いる。外観と回路図を Fig.8 に示す。4 本をヒートシンク1 枚に取り付ける。ヒートシンク1枚の流量は8 L/min であ る。抵抗器ユニット1 台当たりの許容注入エネルギーは 448 kJ となり、パルスエネルギーに対する負荷率は10% である。抵抗器ユニット1台当たりの定格電力は19.2kW であるから負荷軽減率 75%(周囲温度 80℃)と仮定し、 電力実効値 9kW(余裕をみて 0.8kW の約 10 倍とした) とすると負荷率は 62.5%である。全ての抵抗器ユニットを 当該抵抗器実機ユニットと交換し、電力実効値 2.2 kW の条件で連続通電を行った。定格電力の 11%の電力で ある。この条件での抵抗器表面の温度上昇はデータ シートから25℃である。抵抗器ユニット内の16台中4台 の抵抗器温度を測定した結果を Fig. 9 に示す。平衡状 態において温度上昇が 25℃となることが確認できた。そ の後の連続通電においても異常が認められないことを確 認している。



Figure 8: Appearance of resistor unit using ULV1200PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).



Figure 9: Appearance of prototype resistor unit using IRV800PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

5. まとめ

J-PARC 主リングの高繰返し化のための新しい主電磁 石用電源の通電試験中に出力フィルタ抵抗器が故障し た。回路シミュレーションを用いた調査の結果、パルス的 な電力に対する抵抗器の耐量が不足していたことがわ かった。各種大電力抵抗器を比較し、メタルクラッド巻線 抵抗器とエレマ抵抗器を選んで試作機を製作し通電試 験を行った。どちらの抵抗器でも十分なパルスエネル ギー耐量および実効値電力に対する負荷率をもつ抵抗 器ユニットの製作が可能であるが、既設の水冷配管を利 用できること、抵抗器ユニットの寸法、気中放熱を抑制す ることを考慮してメタルクラッド巻線抵抗器 ULV1200PN を選定し、電源に組み込むことにした。定格出力電圧・ 電流のパターンで連続通電し、設計通りの抵抗器表面 温度上昇が得られ、異常が認められないことを確認した。

参考文献

- [1] Accelerator technical design report for 1.3 MW operation at J-PARC main ring, KEK Report 2021-2.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, "New power supply of main magnets for J-PARC main ring", Proceedings of IPAC2019, Melbourne, May 19-24, 2019, pp. 1266-1268.
- [3] T. Shimogawa *et al.*, "Development of charging control for floating capacitor method", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, August 7-10, 2018, pp. 508-511.
- [4] Datasheet of RPU2000; https://www.nikkohm.co.jp/data/.
- [5] http://htr-india.com/design-notes/comparison-siliconecoated-vitreous-enamelled-wire-wound-resistors/
- [6] TRR resistor of Tamaohm Co., Ltd.; http://www.tamaohm.co.jp/registor/r05.html.
- [7] DCRF resistor of Vishay intertechnology, Inc.; https://www.vishay.com/resistors-fixed/list/product-32548/
- [8] https://www.nikkohm.co.jp/products/
- [9] http://www.tokaikonetsu.co.jp/products/erema_t_fr.html [10] Datasheet of C42T;
- https://www.vishay.com/docs/32501/c38t-c42t-c52tc64t.pdf.
- [11] Datasheet of ULM1200PN and IRV800PN; https://www.vishay.com/docs/31833/gre1gre2.pdf.
- [12] SP resistor of Tokai Konetsu Kogyo Co., Ltd.; http://www.tokaikonetsu.co.jp/products/erema_t_03.html.
- [13] Datasheet of GRE1; https://www.vishay.com/docs/31833/gre1gre2.pdf.
- [14] Private communication with Tokai Konetsu Kogyo Co., Ltd.. This is a custom ordered product.