

# 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<sup>#, A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 石井恒次<sup>A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>

Yuichi Morita<sup>#, A)</sup>, Kazuki Miura<sup>A)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>A)</sup>, Ryu Sagawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> 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の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。

## 2. 偏向電磁石電源

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 6 kV)を出力するため、3.3 kV 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用。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])。

<sup>#</sup> yuichi.morita@kek.jp

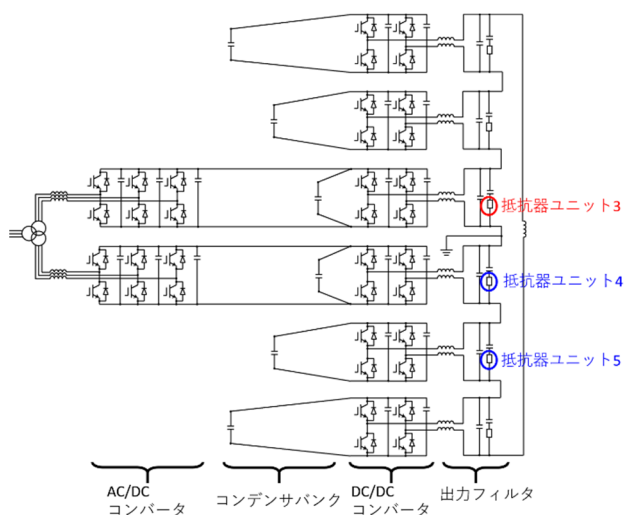


Figure 1: Schematic of BM PS circuit.

### 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。

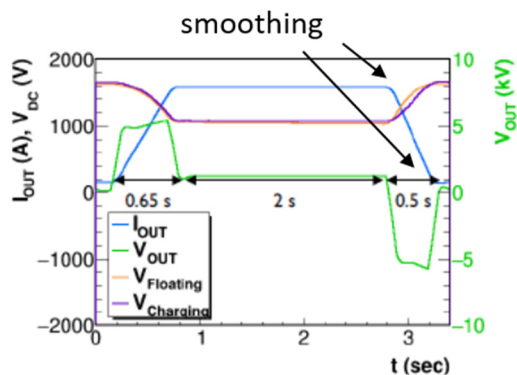


Figure 2: Plots of output current ( $I_{out}$ ) and voltage ( $V_{out}$ ).

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 ( $2.7\Omega$ ) 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  $k\Omega$  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 4 と 5 では  $k\Omega$  ほど大きくなっているものは無く、高々  $12\Omega$  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。

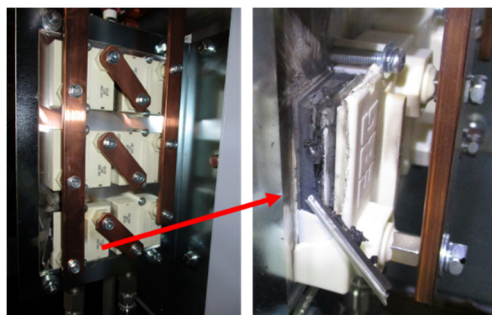


Figure 3: Damaged resistor.

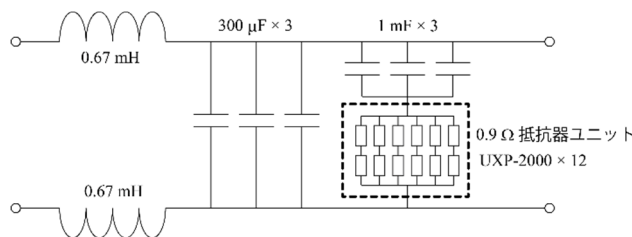


Figure 4: Circuit diagram of output filter.

#### 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、 $0.9\Omega$  の抵抗器ユニットの電力実効値は  $0.8\text{ kW}$  であり、負荷軽減率を 75% (抵抗器ケース下部の温度  $140^\circ\text{C}$  のとき) と仮定しても負荷率は 4% である。しかし、パルスの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、パルスの電力に対する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

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

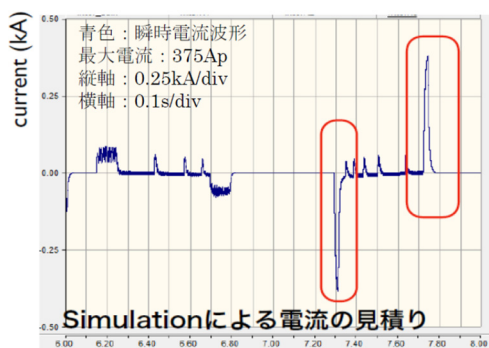


Figure 5: Simulated current flowing resistor unit.

## 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、パルスの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 (0.9  $\Omega$ ) に印加され得る最大のパルスエネルギーは 46 kJ であり、連続運転時の熱負荷の実効値は 0.8 kW である。UXP-2000 を引き続き使う場合はパルス幅 0.01 s、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ふ。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 500 W 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)。

- **巻線抵抗器**: 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のが可能である。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 500 W 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。

- 1) 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、放熱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]。
- 2) 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の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  $\Omega$ ) 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  $\Omega$ ) 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。

Table 3: High Power Resistors[10-13]

Type	Coated wirewound	Metal clad wirewound	Erema	Grid
	C42T (3.6 Ω) Vishay Intertechnology, Inc.	ULV1200PN (3.6 Ω) Nikkohm Co., Ltd.	ER500SP Tokai Konetsu Kogyo Co., Ltd.	GRE1 Vishay Intertechnology, Inc.
Pulse capacity (kJ)	12 (< 0.1 s)	28 (≤ 0.1 s)	19.8	4000 <sup>1</sup>
Power <sup>2</sup> (W)	480	480	500	1300
Volume <sup>3</sup> (cm <sup>3</sup> )	380	1460	880	17000
Pulse capacity / volume (J/cm <sup>3</sup> )	32	19	22.5	240
Power / volume (W/cm <sup>3</sup> )	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

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 1.6 kW の電力を与えた。環境温度を 80°C 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°C 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 × height × length)	61 × 59 × 286

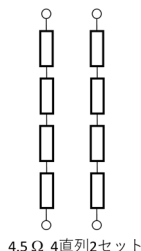


Figure 6: Appearance of prototype resistor unit using IRV800PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

<sup>1</sup> ステンレス抵抗体の融点 1400°C、比熱 460 J/(kg·K)、重量 7 kg と仮定して概算。

<sup>2</sup> 自然空冷の場合。

<sup>3</sup> 外寸で計算した体積。

#### 4.3 エレマ抵抗器を用いた試作

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 50 A とした。電力の実効値は 2250 W となる。試作機の定格電力は 10.35 kW であるから、負荷軽減率を 70% (周囲温度 110°C 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°C 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°C である。実測においても 7.6°C 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。

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 × inner diameters × length)	40 × 32 × 200

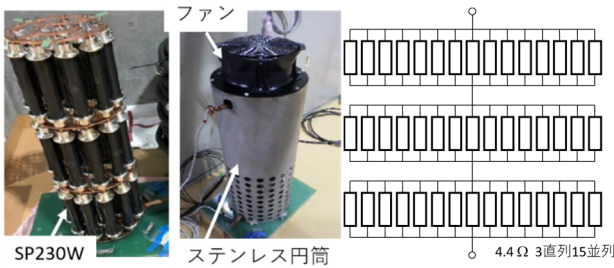


Figure 7: Appearance of prototype resistor unit using SP230W (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

#### 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( $3.6 \Omega$ )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( $0.9 \Omega$ )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 19.2 kW であるから負荷軽減率 75%(周囲温度  $80^\circ\text{C}$ )と仮定し、電力実効値 9 kW(余裕をみて  $0.8 \text{ kW}$  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  $25^\circ\text{C}$  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  $25^\circ\text{C}$  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。

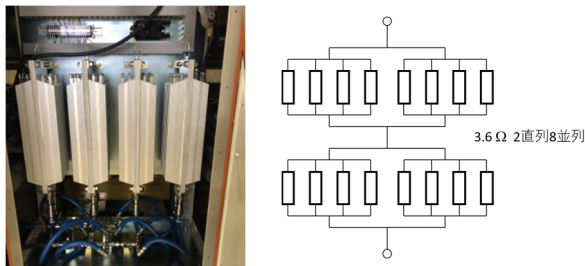


Figure 8: Appearance of resistor unit using ULV1200PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

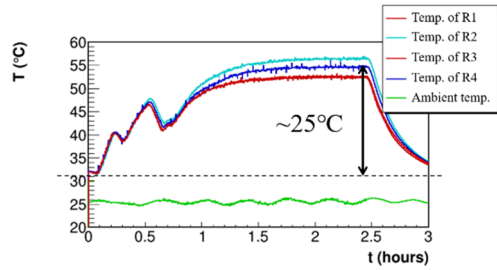


Figure 9: Appearance of prototype resistor unit using IRV800PN (left). Schematic circuit of the resistor unit (right).

## 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、パルスの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-silicone-coated-vitreous-enamelled-wire-wound-resistors/>
- [6] TRR resistor of Tamaohm Co., Ltd.; <http://www.tamaohm.co.jp/registior/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](http://www.tokaikonetsu.co.jp/products/erema_t_fr.html)
- [10] Datasheet of C42T; <https://www.vishay.com/docs/32501/c38t-c42t-c52t-c64t.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](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.