

J-PARC 主リング主電磁石用電源のコンデンサバンクのためのヒューズ溶断試験 FUSE ARCING TEST FOR CAPACITOR BANK OF MAIN MAGNET POWER SUPPLY IN J-PARC MR

森田裕一^{#,A)}, 栗本佳典^{A)}, 佐川隆^{B)}, 下川哲司^{A)}, 内藤大地^{A)}, 三浦一喜^{A)}, 吉野達也^{C)}
Yuichi Morita^{#,A)}, Yoshinori Kurimoto^{A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Daichi Naito^{A)}, Kazuki Miura^{A)},
Tatsuya Yoshino^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Universal Engineering

^{C)} Nichicon (Kusatsu) Corporation

Abstract

The upgrade of the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) involves the increase in the power variation of the electrical system. Since the main magnets are the primary source of the power variation, a capacitor bank (CB) is developed and installed in the power supply of the main magnets. The CB stores the excitation energy of the magnets so that the power variation is suppressed. The CB was designed with a sufficient consideration to avoid serious failures. The number of fuses were installed in the CB to avoid energy concentration on a short-circuited capacitor. The scheme for the safe dissipation of the concentrated energy was also employed. A fuse arcing test was carried out to clearly demonstrate the fuse reliability. The result shows the pre-arcing time of the fuse satisfies the designed value.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)の主リング(MR)は T2K (Tokai to Kamioka) と呼ばれる長基線ニュートリノ実験に陽子ビームを供給しており、更なるビーム増強が求められている。繰返し周期を現状の 2.48 秒から 1.3 秒に速めて、ターゲットに供給するビーム電流を増加することによるビーム増強を計画している。MR の仕様を Table 1 に示す。

1 サイクルの間にビームは 3 GeV から 30 GeV に加速され、主電磁石の励磁電流はビームの運動量増加に合わせて上昇する。2.48 秒繰返し時における主電磁石の励磁電流および出力電圧の測定パターンを Fig. 1 に示す。これらは偏向電磁石ファミリ 1 台のパターンである。偏向、四極、六極電磁石に対してそれぞれ 6 台、11 台、3 台のファミリがある。電源の出力電圧 V は、

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

と表される。ここで、 R と L はそれぞれ負荷の抵抗値とイ

Table 1: Specifications for MR

Beam Energy [GeV]	3 (injection) 30 (extraction)
Beam Power [kW]	450 (present) > 750 (upgrade)
Repetition Cycle [s]	2.48 (present) 1.3 (upgrade)

[#] yuichi.morita@kek.jp

ンダクタンス値、 I は励磁電流である。すなわち、高繰返し化によって dI/dt が増加すると電源の出力電力 VI が増加する。負荷の励磁エネルギーは運転サイクル毎に系統へ戻されているので、系統の電力変動が増加することになる。主電磁石はその大きな励磁エネルギーのため、MR の電力変動の主要な原因となっている。Figure 2 の点線は MR のすべての主電磁石によって引き起こされる系統の電力変動を表し、ピーク間で 60 MVA となっている。この値は増強後には 100 MVA を超えると予想され、電力会社が許容しない。

電力変動を抑制するための有力な方法にコンデンサによるエネルギー貯蔵がある。並列に多数接続されたコンデンサからなるコンデンサバンク (CB) を主電磁石電源に導入する。ビーム取出し後に励磁エネルギーが電

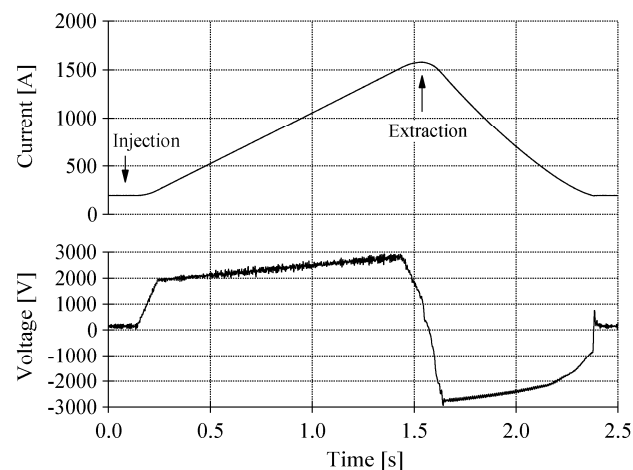


Figure 1: Measured patterns of excitation current and output voltage of PS for a single bending magnet family in the MR.

磁石から CB に移動する。そして次の運転サイクルでこのエネルギーが CB から電磁石に移動し、励磁に再利用される。よって、CB と負荷の間で大部分のエネルギーがやり取りされ、電源と系統の間のエネルギーの移動を抑制できる。Figure 2 の実線で示されているように CB がある場合、系統の電力変動は増強後であっても 60 MVA 以下に抑えられる。

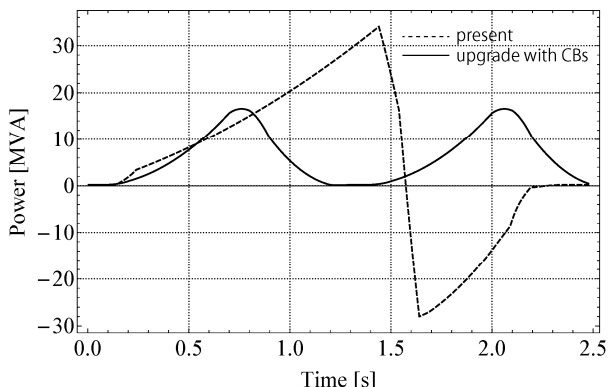


Figure 2: Calculated power variations in the MR. No tracking error of the excitation current is assumed.

CB を設計する上で気を付けなければならない点は以下の通りである。

- コンデンサの種類:
電解液やオイルを含んでいるとコンデンサ内部で短絡事故が起こった場合、液が蒸発し、コンデンサが設置されている場所の気圧が急激に上昇する。もしコンデンサが閉じた空間に設置されているなら、空間のどこかに圧抜きの弁が必要となる。液が可燃性であるなら、防火についても注意が必要である。よって、気圧上昇と防火を解決できるセルフヒーリング (SH) タイプの乾式フィルムコンデンサを選定した。
- 事故の波及:
並列に接続された回路は事故が起きた時に影響が波及するので設計に注意が必要である。コンデンサに直列にヒューズを取り付けることで波及を防ぐ。
- 短絡エネルギーの消費:
米国の国立点火施設(NIF)の CB の例では、短絡事故が発生すると 2MJ ものエネルギーがコイルに集中し、消費する設計となっている。短絡試験の結果、コイルから破片が飛散することがわかっているので、飛散物を閉じ込めるための壁が用意されている[1]。我々の設計では素子の変形や破裂が発生しないようにエネルギー消費の方法を検討した。

CB の設計の詳細は次章で紹介する。CB の安全性はヒューズに強く依存しているため、ヒューズの溶断試験を行って設計の妥当性を確かめた。

本報告では新しい偏向電磁石電源および CB の設計とヒューズ溶断試験を紹介する。[2]

2. コンデンサバンク

2.1 コンデンサバンクを備えた偏向電磁石用新電源

MR の偏向電磁石のための新電源の回路図と仕様を Fig. 3 と Table 2 にそれぞれ示す[3,4]。電源は 2 台の AC/DC 変換器、6 台のコンデンサバンクモジュール (CBM)、直列に接続された 6 台の DC/DC 変換器からなる。6 台のうち 4 台の CBM は AC/DC 変換器と変圧器に接続されていない。これらはフローティングコンデンサと呼ばれる[5]。AC/DC 変換器と変圧器が無いため、価格と物量を減らすことができる。CBM を初充電後、この充電エネルギーを使って、電源は電磁石を励磁する。励磁エネルギーは系統へ戻らずに CBM を充電し、次のサイクルに再利用される。

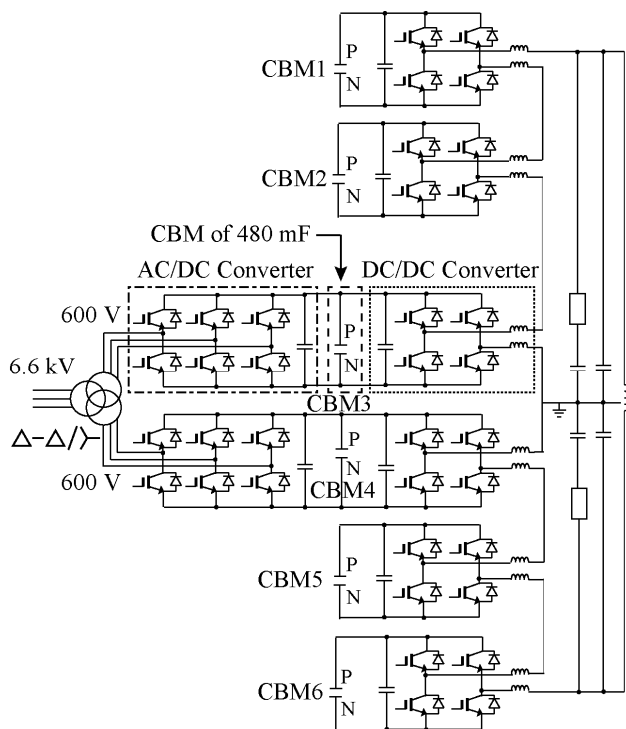


Figure 3: Schematic of new PS for bending magnets in the MR.

2.2 コンデンサバンクモジュール

偏向電磁石電源の CB は 6 台の CBM で構成され、1 台の CBM は 24 台のコンデンサユニットからなる。コンデンサユニットは充電電圧 1667 V で 0.03 MJ のエネルギーを蓄える。すなわち、1 台の CBM が蓄えるエネルギーは 0.7 MJ である。

2.3 コンデンサユニット

コンデンサユニットの回路図と仕様を Fig. 4 と Table 3 にそれぞれ示す。コンデンサユニットは 1 台のヒューズ (Table 4)、4 台のコンデンサ (Table 5)、16 台の抵抗器 (Table 6 の IRV300LN) で構成される。既に述べたように最大充電エネルギーは 0.03 MJ である。重量は約 140 kg である。これらの値はメンテナンスに妥当な大きさとして選ばれた。ヒューズ付きのユニットとしたことにより、短絡したコンデンサにエネルギーが集中するのを防ぐ。2.5 節

Table 2: Specifications for the New PS with CBs

Peak Output Current [A]	1600
Peak Output Voltage [V]	6000
Total Inductance of Load [H]	1.6
Total Energy of CB [MJ]	4.2
Energy / CBM [MJ]	0.7
Number of CBMs	6
Energy / Capacitor [kJ]	7
Maximum Charging Voltage [V]	1667

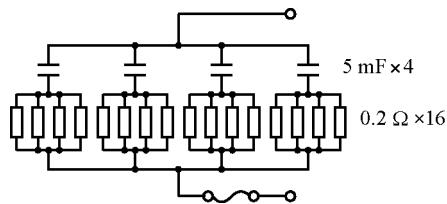


Figure 4: Circuit diagram of the capacitor unit.

で述べるように、ヒューズが働いた後に消費されるのは 1 台のコンデンサユニットの充電エネルギーのみである。この充電エネルギーは素子の変形を伴うことなく抵抗器によって消費可能である。また、抵抗器はエネルギー消費の他にコンデンサ間の電流バランスを取る役割も持つ。

Table 3: Specifications for the Capacitor Unit

Capacitance [mF]	20
Maximum Charging Voltage [V]	1667
Maximum Stored Energy [MJ]	0.03
Weight [kg]	140

Table 4: Specifications for the Fuse

Current in Operation [A_{rms}]	19
Rated Current [A]	40
Rated Voltage [V_{dc}]	2000
Energy Integrals I^2t (A^2s)	390 (Pre-Arcing)

Table 5: Specifications for the Capacitor

Capacitance [mF]	5
Rated Voltage [V]	1667
Rated Current [A_{rms}]	20
Weight [kg]	23.5

Table 6: Specifications for the Resistors

	IRV300LN	IRV600PN
Resistance [Ω]	0.2	0.1
Rated Voltage [V_{ac}]	5500	3500
Rated Power (w/o chassis) [W]	210	300
Energy Tolerance [kJ]	11.1	17.5

2.4 組立

Figure 5 に示したように 3 台のコンデンサユニットが 1 台の金属架台にインストールされる。1 台の CBM には 8 台の金属架台が存在する。2 台の CBM は 1 台の 40 フィートハイキューブ海上コンテナ内に設置される。よって、1 台のコンテナには 1.4 MJ のエネルギーが蓄えられる。1 台の偏向電磁石電源には 3 台のコンテナが存在する。Figure 6 に示したように、コンテナ内の両サイドにそれぞれ 8 台の架台が設置される。CBM の P 側あるいは N 側と架台は等電位としており、コンテナからは架台ごと電氣的に絶縁されている。

コンテナは電源棟に隣接するヤードに設置される。コンテナにはエアコン、空気を循環するファン、LED 照明が付いている。

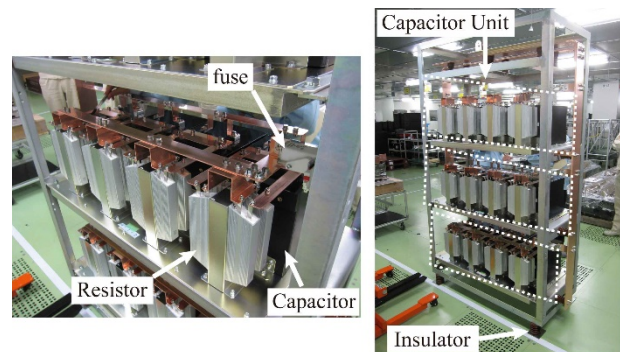


Figure 5: Capacitor unit and metal rack.



Figure 6: Metal racks installed in the marine container.

2.5 短絡事故時のエネルギー消費設計

コンデンサユニットはコンデンサ内部短絡が起こると、抵抗器によって充電エネルギーを安全に消費するように

設計されている。Figure 7 (a) に示したように、コンデンサ内部短絡が起こると大電流が短絡コンデンサに集中し、ヒューズが切れる。その結果、短絡したコンデンサユニットは回路から切り離され、電流の集中が止まる。その後はこのコンデンサユニット内の充電エネルギーだけが短絡コンデンサに流れ続ける。この様子を Fig. 7 (b) に示す。 V_{unit} はコンデンサの充電電圧を表す。

短絡コンデンサに接続されている 4 台の抵抗器で消費されるエネルギーを見積もった。溶断時間を t_{arc} とし、ヒューズが切れる前の V_{unit} は常に 1700 V 一定と仮定する。ヒューズが切れた後の V_{unit} は指数関数的に減少する。電圧曲線を Fig. 8 に示す。 t_{arc} の間、4 台の抵抗器 (合成抵抗は 50 mΩ) に印加される電圧は 1700 V なので、溶断前の消費エネルギー U_1 は $5.78 \times 10^4 t_{arc}$ kJ と計算される。溶断後の消費エネルギー U_2 は 16.3 kJ と計算される。これは短絡コンデンサ以外の 3 台のコンデンサの充電エネルギーである。よって、全消費エネルギー U_{total} は

$$U_{total} = U_1 + U_2 \quad (1)$$

と表される。

Table 6 のエネルギー許容量 (IRV300LN) によると、 U_{total} は 44.4 kJ 以下でなければならない。よって、 $t_{arc} = 490 \mu\text{s}$ が得られる。

3. ヒューズ溶断試験

第 2 章で見たように、CB の安全はヒューズに強く依存している。ヒューズの信頼性を確かめるためにヒューズ溶断試験を行った。この試験ではヒューズ溶断時間および抵抗器のエネルギー吸収量を測定した。

3.1 試験設備

2 つの場合について短絡事故の回路シミュレーションを行った。一つは CBM 1 台の全コンデンサユニットを用いたフルスケールモデルで、もう一つはコンデンサユニット 2 台の 2 ユニットモデルである。後者はヒューズ溶断試験の最小構成であり、充電エネルギーは前者の 1/12 である。これら 2 つのモデルのヒューズに流れる短絡電流に違いがみられなければ、安全性を考慮して試験には後者のモデルを採用したい。

短絡したコンデンサユニットのヒューズに流れる電流実効値の時間変化をシミュレーションした結果を Fig. 9 に

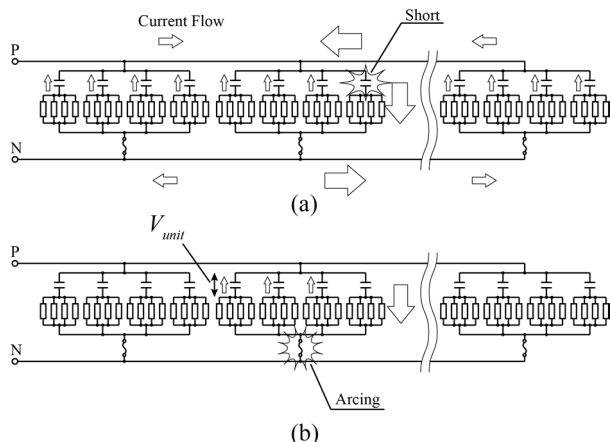


Figure 7: Current paths in the short-circuit fault before (a) and after (b) the fuse arcing.

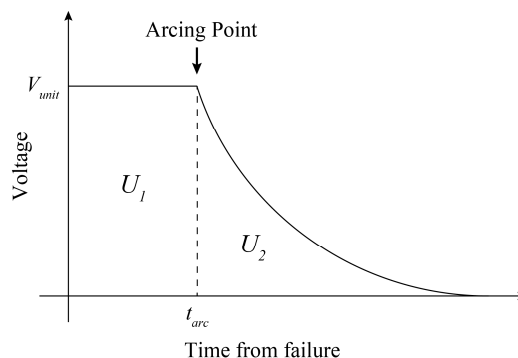


Figure 8: Voltage curve of capacitor in the short circuit fault.

示す。電流実効値と溶断曲線 ($I^2t = 390$) の交点がヒューズ溶断時間を表す。交点付近では 2 つの電流実効値曲線の時間差は $490 \mu\text{s}$ よりも十分小さい。そのため、溶断時間の測定に対しては 2 ユニットモデルで試験すれば十分であると結論付けられる。

シミュレーション結果に従って、2 ユニットモデルのセットアップが準備された。回路図を Fig. 10 に示す。短絡を模擬するためにコンデンサの一つが電磁接触器 MC3 に代えられている。抵抗器の数を最小化するため、MC3 を含んだコンデンサユニットだけに抵抗器が取り付けられている。ここでは IRV300LN ではなく、IRV600PN を使用した。もう一方のコンデンサユニットには抵抗器が無い。コンデンサユニットはダイオード整流器を通して充電される。定格電圧まで充電された後、電磁接触器 MC1 によってセットアップがシステムから切り離される。その後、MC3 が閉じる。

Figure 10 にあるように、4 台の電流プローブ CT1-4 と 2 台の高圧差動プローブ V1, V2 が取り付けられている。試験時に予期せぬ破片が飛んでくるのを防ぐために両方のコンデンサユニットを 1 mm 厚の鉄板で覆った。

3.2 試験結果

試験の結果を Fig. 11 と 12 に示す。MC3 が閉じた時間を Closing Point としている。縦軸の記号は Fig. 10 に示されているプローブに対応する。電流ピーク時が溶断したタイミングを表しており、溶断時間として $45 \pm 5 \mu\text{s}$ が得られた。よって、溶断時間が $490 \mu\text{s}$ 未満という要求を満

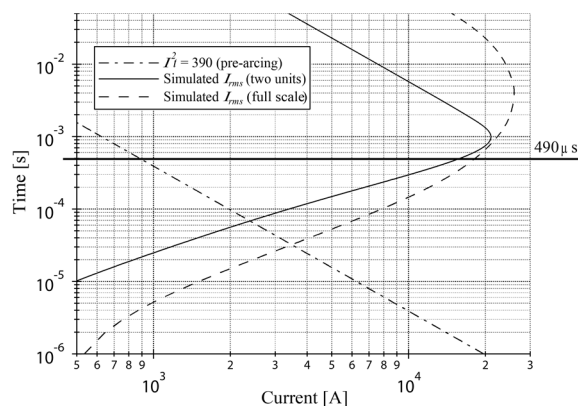


Figure 9: Simulated RMS currents that flow in the fuses of the failed capacitor units.

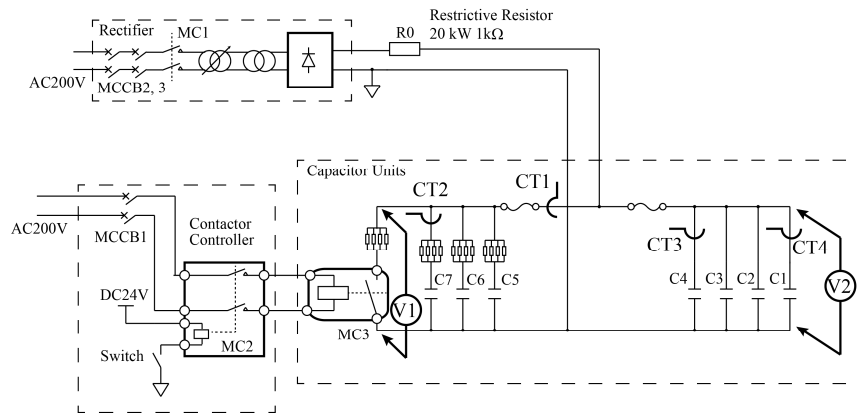


Figure 10: Circuit schematic of the fuse arcing test.

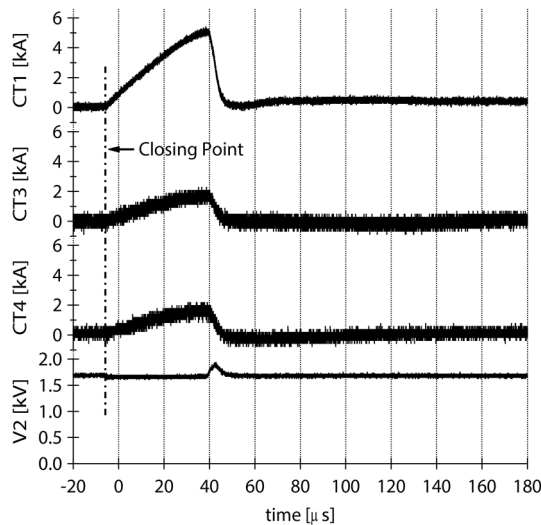


Figure 11: Measured currents and voltage of the fuse arcing test.

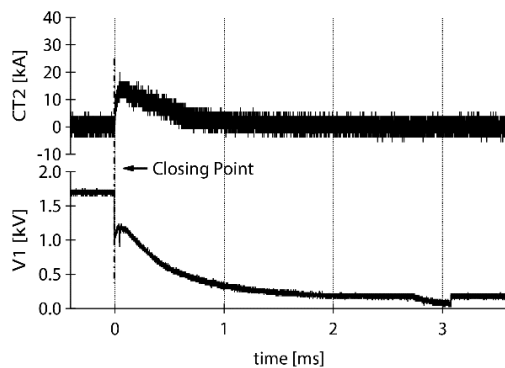


Figure 12: Measured current and voltage of the fuse arcing test. The time scale is different from that in Figure 11.

たすことを確認できた。フルスケールモデルの溶断時間も同様に 490 μ s よりも早いと期待される。ヒューズが正常に働いたので V2 の減少はほとんど見られない一方、V1 はゼロに近づいている。

CT1 と 2 のピーク電流から、MC3 に流れる電流は約 50 kA ピーク、1 ms 幅の三角波として近似できる。よって、MC3 に接続されている抵抗器 4 台で消費されるエネルギーは 20.8 kJ と見積もられる。これは抵抗器

(IRV600PN) 4 台のエネルギー許容量 69.8 kJ よりも小さい。試験の後、各素子を目視したところ、いかなる変形も認められなかった。

4. まとめ

ビームパワーを増強するために J-PARC MR の高繰返し化が進んでいる。その主要なコンポーネントとして新しい主電磁石電源を開発中である。ただし、この計画では系統の電力変動の増加が懸念されている。そのため、コンデンサによるエネルギー貯蔵方式を採用する。

CB は十分な安全検討に基づいて開発された。使用するコンデンサは SH タイプの乾式フィルムコンデンサである。4 台のコンデンサ毎(0.03 MJ)に 1 つのヒューズが取り付けられる。短絡したコンデンサに流れ込むエネルギーを消費するために全てのコンデンサには直列に抵抗器が接続されている。

ヒューズの設計溶断時間を確かめるためにコンデンサユニット 2 台によるヒューズ溶断試験が行われた。45 \pm 5 μ s という溶断時間が得られ、設計値である 490 μ s 以下を満たすことが確認できた。よって、フルスケールモデルのヒューズ溶断時間も設計値を満たす。試験の後、各素子の外観にはいかなる変形も認められなかった。

参考文献

- [1] W. Gagnon *et al.*, “Pulsed Power for Solid-State Lasers”, Tech. Rep. LLNL-BOOK-400175, LLNL (2008).
- [2] Y. Morita *et al.*, “Capacitor bank of power supply for J-PARC MR main magnets”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 901 (2018) pp.156-163
- [3] Y. Morita *et al.*, “Development of capacitor bank of J-PARC MR main magnet power supply for high repetition rate operation”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1056-1060.
- [4] T. Shimogawa *et al.*, “Status of new power supply for bending magnet in J-PARC Main Ring upgrade”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [5] 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, Japan, Aug. 7-10, 2018.