

# J-PARC 主リング高繰返し化に向けた主電磁石用電源のためのコンデンサバンクの開発

## DEVELOPMENT OF CAPACITOR BANK OF J-PARC MR MAIN MAGNET POWER SUPPLY FOR HIGH REPETITION RATE OPERATION

森田裕一<sup>#, A)</sup>, 大越隆夫<sup>A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 内藤大地<sup>A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>  
Yuichi Morita<sup>#, A)</sup>, Takao Oogoe<sup>A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>A)</sup>, Ryu Sagawa<sup>B)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Daichi Naito<sup>A)</sup>,  
Kazuki Miura<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> Universal Engineering

### Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) aims at achieving a megawatt-class proton accelerator facility. One of the promising methods for increasing the beam power is to shorten the repetition cycle of the Main Ring (MR) from the current cycle of 2.48 s to 1.3 s. However, in this scheme, the increase in the output voltage and the power variation of the electric system are serious concerns for the power supplies (PSs) of the main magnets. We have been developing a new PS that provides solutions for these issues. We adopted the capacitive-energy-storage scheme as the solution for the power variation. The energy of the magnet excitation is transferred to the capacitor bank without the energy return to the electric system. This paper introduces the capacitive-energy-storage scheme in J-PARC MR and the development of the capacitor bank.

### 1. はじめに

陽子ビームは物質科学、素粒子・原子核物理学や ADS (Accelerator-driven System)、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) など様々な分野で利用されている。陽子シンクロトロンにおいてビーム強度向上のための方法の一つとして繰返し周期を速める方法が挙げられる。高繰返し化によってビームバンチが実験ホールへより頻繁に取り出されることにより、ビーム強度が向上する。

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の MR (Main Ring) は大強度陽子シンクロトロンの一つである。MR から取り出されるビームを用いた実験の中に T2K (Tokai to Kamioka) 実験がある。T2K は大強度陽子ビームを必要とする長基線ニュートリノ実験である。この要求に応えるため、MR はビーム大強度化を目指して高繰返し化する計画である。

高繰返し化によって主電磁石(偏向、四極、六極電磁石)の励磁電流のパターン変化が急峻となる。急峻な変化は大きな電圧を電磁石に発生する。結果として電磁石電源の定格出力電力が増加するため、電磁石電源のアップグレードが予定されている[1]。昨年度から新電源 1 号機が実運転に導入されている段階である[2]。現行の電源は電磁石の励磁エネルギーをパターン毎に系統へ返しており、2.48 s 周期の運転で系統に約 60 MVA の電力変動が生じている。高繰返し化後は電力変動が増加し、電力会社の許容を超えるため、新電源ではコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式を採用する。系統に返していた励磁エネルギーをコンデンサに貯えることで系統の電力変動を抑える方式である。本報告では MR におけるコンデンサを用いたエネルギー貯蔵方式の概要と

コンデンサバンクの開発について紹介する。

### 2. 電力変動とエネルギー貯蔵

MR の主電磁石の一覧を Table 1 に示す。偏向電磁石 (BM) およびアーク部の四極電磁石 (QFN, QFX, QDN, QDX) の電源は他の主電磁石電源と比べて負荷が大きく出力電力が大きいので大型電源と呼ぶ。その他は小型電源と呼ぶ。主電磁石はパターン電流で励磁されている。例として T2K 実験へのビーム供給運転における偏向電磁石の現行の励磁パターンを Figure 1 に示す。Figure 1 上が励磁電流パターンである。3 GeV のエネルギーでビームが入射後、1.4 s かけて 30 GeV まで加速して取り出しており、ビームエネルギーに応じて励磁電流を変化させている。Figure 1 下は出力電圧  $V_{out}$  であり、

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

と表される。ここで、 $R$  と  $L$  はそれぞれ負荷の抵抗値とインダクタンス値、 $I$  は励磁電流である。よって、 $I$  の時間変化が  $V_{out}$  の振る舞いに影響を与え、励磁電流増加時には  $V_{out}$  が正となり、減少時には負となる。電源の電力  $P$  は

$$P = IV_{out} \quad (2)$$

であるから、1 サイクルの間に  $P$  が変動し、これが系統の電力変動となる。

一方、電源アップグレード後は大型電源にコンデンサバンクを導入する。これにより、負荷の励磁に使われるエネルギーは運転周期毎に負荷とコンデンサバンクの間で往復し、回路の抵抗損失分のみが系統から給電される。主電磁石電源の電力変動合計の計算値を Figure 2 に示す。破線が現行の 2.48 s 周期、実線が高繰返し後の 1.3 s 周期の電力変動である。現行の電力変動はピーク間で約 60 MVA となっており、これ以上の増加は電力会社が

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

許容しない。電源アップグレード後は大型電源では励磁エネルギーを系統へ返すことなくコンデンサバンクに貯えるため、負の値はほぼ無くなり、変動の大半は回路の抵抗損失分を補うための給電によるものである。

Table 1: Parameters of Main Magnets

Magnet Family	Number of Magnets	Load Resistance per PS [ $\Omega$ ]	Load Inductance per PS [H]
BM1~6	16	0.75	1.47
QFN	48	1.96	2.93
QFX	48	1.71	2.39
QDN	48	2.21	3.46
QDX	27	1.18	1.75
QFR	9	0.49	0.57
QFS	6	0.29	0.30
QFT	6	0.31	0.32
QFP	6	0.28	0.20
QDR	6	0.37	0.44
QDS	6	0.32	0.35
QDT	6	0.35	0.37
SFA	24	1.14	0.42
SDA	24	1.14	0.41
SDB	24	1.23	0.41

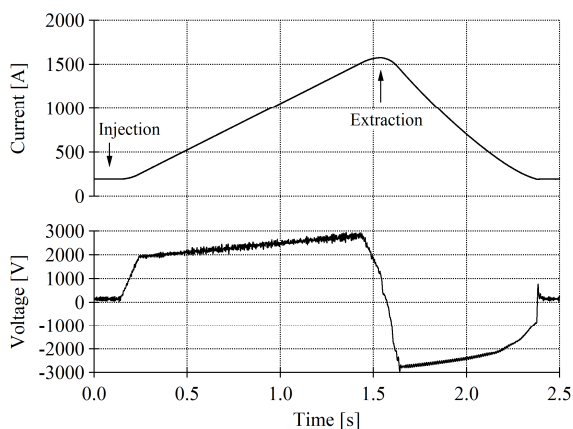


Figure 1: Patterns of exciting current and output voltage of bending magnet.

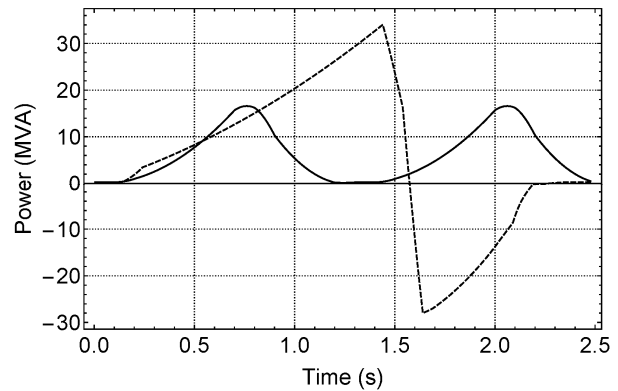


Figure 2: Total value of calculated power variation for main magnets.

### 3. 新しい電源の構成[3]

偏向電磁石用新電源の回路の概略を Figure 3 に示す。出力電圧ピーク値は 5 kV を超える。高電圧を出力するために新電源では 6 台の DC/DC 変換器を直列にする。それぞれの DC/DC 変換器は 480 mF のコンデンサバンクに接続される。2 台のコンデンサバンクは AC/DC 変換器を通して系統へ接続される。残り 4 台は系統とはつながっておらず、所謂フローティングコンデンサ方式となっている。本方式により、電源のコンパクト化およびコストダウンが見込める。

1 つのスイッチは並列にした 2 つの IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) で構成される。各 DC/DC 変換器は 3 台の同一な変換器が並列に接続されており、定格出力電流を 1575 A としている。電力変換器ユニットの仕様を Table 2 に示す。

さらに回路全体が接地点に対して対称であるので出力電流に現れるコモンモードノイズを低減できる。電流リップルをさらに低減するために 6 直列の DC/DC 変換器のスイッチング位相を互いにずらすことによって等価スイッチング周波数を向上し、出力フィルタでスイッチングリップルを落とす。

Table 2: Specifications of Power Converter Unit

スイッチング素子	CM1200HC-66H(三菱電機)
回路	ハーフブリッジ
IGBT の並列数	2
定格電圧 [V]	1667
定格電流 [A]	525
IGBT スwitchング周波数 [kHz]	1
冷却方式	水冷

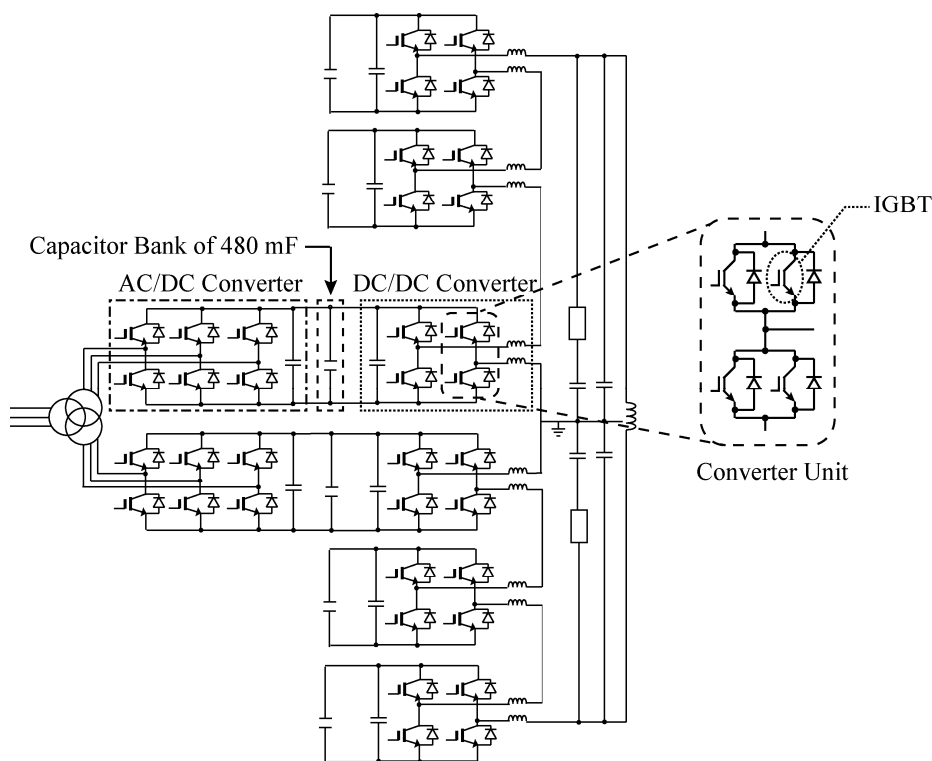


Figure 3: Schematic of new PS for bending magnet.

## 4. コンデンサバンク

### 4.1 乾式フィルムコンデンサ

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用いる。誘電体フィルムに電極を蒸着してロール状にしたものが複数集まり、コンデンサを構成する (Fig. 4)。誘電体が絶縁破壊するとその箇所の蒸着面が蒸発し絶縁が回復する。この仕組みを SH という。さらに、蒸着面をセグメント化しており、セグメント同士をつなぐ細かい蒸着部がヒューズの役割を果たす。SH の回復限界を超えて絶縁破壊が起こった場合でも過電流によってヒューズ部が切断され絶縁が回復する。このような安全機構によって安全性の高いタイプのコンデンサとなっている。

### 4.2 回路構成

Figure 3 に示した通り、1 電源当り 6 台のコンデンサバンクがある。コンデンサバンク 1 台の回路図を Figure 5 に示す。96 台の 5 mF 乾式フィルムコンデンサから成り、静電容量は計 480 mF である。コンデンサ 4 台当たり 1 本のヒューズを割り当てる。各コンデンサには 4 並列の 0.2 Ω 抵抗器 (0.05 Ω 相当) が直列に接続される。コンデンサ 4 台、ヒューズ 1 本、抵抗器 16 本で構成される構造をコンデンサユニットと呼ぶ。コンデンサユニット 1 台当たり約 140 kg である。メンテナンス性と充電エネルギーの大きさからコンデンサ 4 台が妥当であると判断した。コンデンサユニット 3 台を 1 つの架台に収める。8 台の架台で 1 つのコンデンサバンクが構成される。架台の写真を Figure 6 に示す。各コンデンサバンクはアース電位から

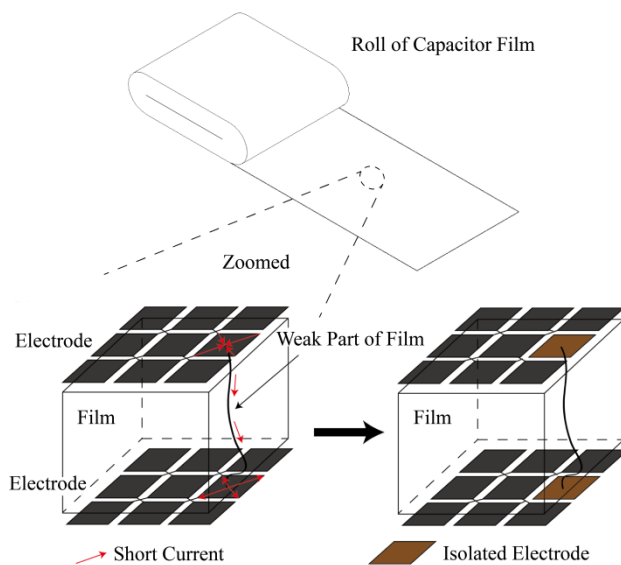


Figure 4: Recovery process of insulation for metallized film.

浮く。コンデンサの N 端子 (あるいは P 端子) は架台に接続されており、架台ごとアース電位から浮く設計にしている。これにより、コンデンサバンクの対地電圧をコンデンサ筐体ではなく Figure 6 の碍子に受け持たせることができる。

コンデンサ充電電圧は 1650 V なのでコンデンサユニット 1 台の充電エネルギーは約 30 kJ である。安全機構により安全性の高いコンデンサであるが、もし短絡した

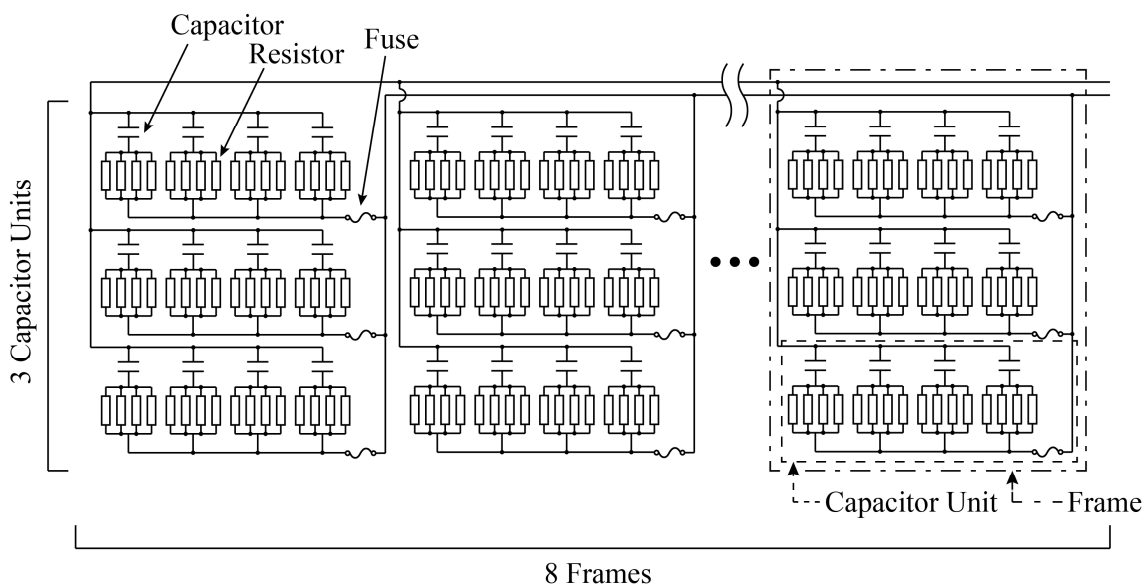


Figure 5: Circuit diagram of capacitor bank.

場合であっても、ヒューズ溶断後のコンデンサユニットのエネルギーを安全に消費できるように抵抗器を選定している。抵抗器の主な役割は短絡時のエネルギーを消費して短絡箇所にエネルギーが集中するのを防ぐこと、および、短絡時のコンデンサ間の電流バランスをとることである。

#### 4.3 コンテナ

コンデンサバンクを収める構造物として 40 フィート・ハイキューブのリーファーコンテナを用いる。Figure 7 に概観図を示す。片端は通常の出入りを目的とした観音開きの全面扉であり、もう一端には非常時脱出用の小扉を設ける。1 台のコンテナ内にはコンデンサバンクが 2 台入る。よって、電源 1 台あたりコンテナが 3 台となる。コンテナ内には LED 照明、エアコンおよび空気を積極的に循環するためのファン等が取り付けられる。

#### 4.4 制御部

コンデンサバンクそれぞれの充電電圧はアナログ電圧

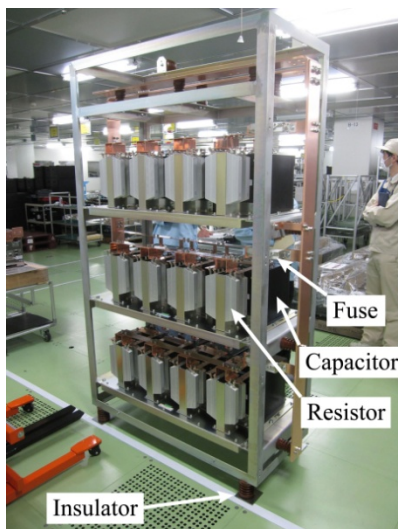


Figure 6: Frame with 3 capacitor units.

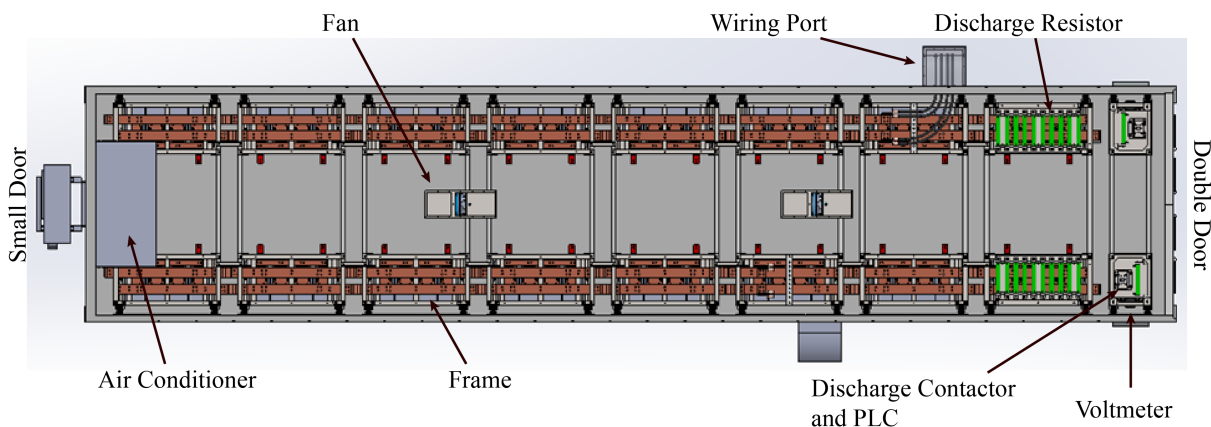


Figure 7: Internal appearance of container (top view).



計により目視で確認できる。コンテナ壁面に窓を設け、コンテナ外部から確認できるようにしている。充電電圧はPLC(Programmable logic controller)でも取り込むが、コンテナ内の2台のコンデンサバンクは電位が異なるので、各電位に1台のPLCを割り当てている。これらのPLCは各コンデンサバンクに1台ずつ用意されている放電器に対する開閉信号の出力やヒューズのマイクロスイッチの接点取り込み等も行う。扉開、ファン回転数減少などのアース電位の接点はアース電位にあるもう1台のPLCで取り込む。よって1台のコンテナには3台のPLCがある。これらのPLCと変換器盤や制御盤のPLCとは光ケーブルで接続される。

#### 4.5 メンテナンス

メンテナンス等でコンデンサを取り出す場合は、コンデンサユニット単位で取り出す。このとき、特注品である手動巻き上げ式のリフターを用いる。当該リフターは車輪が全て自在車輪であることが特徴である。コンテナ中央の通路幅はコンデンサユニットの横幅よりも狭い。当該リフターを用いればコンデンサユニットを引き出し後、旋回することなく全面扉までコンデンサユニットを運ぶことができる。

### 5. まとめ

J-PARC MRではビーム増強を目的として運転周期の高繰返し化を計画している。高繰返し化に伴って、主電磁石のための新しい電源を開発中である。

大型電源に対してはコンデンサバンクを導入して系統の電力変動を抑制する。コンデンサバンクにはSHタイプの乾式フィルムコンデンサを用いる。メンテナンス性と充電エネルギーの大きさを考慮して、コンデンサ4台毎にユニット化している。480 mFのコンデンサバンク2台が40フィート・ハイキューブのリーファークンテナに収められる。

今秋に3台のコンテナを含む偏向電磁石用新電源1式が設置される予定である。コンデンサバンクに関わる制御の開発も進めており[4,5,6,7,8]、当該偏向電磁石用新電源を用いた制御試験を今年度末から開始する。

### 参考文献

- [1] Y. Morita *et al.*, “Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation,” JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, “First New Power Supply of Main Magnet for J-PARC Main Ring Upgrade,” Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017.
- [3] Y. Morita *et al.*, “High Power Testing of Power Converter Unit of J-PARC MR Main Magnet Power Supply for High Repetition Rate Operation,” Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp.712-716.
- [4] Y. Morita *et al.*, “Prototype Development of J-PARC Main Ring Main Magnets Power Supply for High Repetition Rate Operation,” Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp.1157-1161.
- [5] Y. Kurimoto *et al.*, “A High Power Test Method for Pattern Magnet Power Supplies with Capacitor Banks,” Proceedings

- of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp.1171-1174.
- [6] T. Shimogawa *et al.*, “Demonstration of Prototype Power Supply of J-PARC Main Ring Main Magnets for high Repetition Rate Operation,” Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp.1152-1155.
- [7] K. Miura *et al.*, “Development of compact power supply for capacitor bank control test at J-PARC MR,” Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017.
- [8] Y. Morita *et al.*, “Stability test for power converters in high-powered operations for J-PARC MR main magnets,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.026>