

J-PARC メインリング 速い取出しキッカー電磁石システムのアップグレード UPGRADE OF THE COMPENSATION KICKER MAGNET FOR J-PARC MAIN RING

杉本拓也^{*A)}、石井恒次^{A)}、松本浩^{A)}、芝田達伸^{A)}、Kuanjun Fan^{B)}
Takuya Sugimoto^{*A)}, Koji Ishii^{A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Tatsunobu Shibata^{A)}, Kuanjun Fan^{B)}

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

^{B)}Huazhong University of Science and Technology (HUST)

Abstract

Fast extraction (Fx) kicker system for J-PARC Main Ring is upgraded to extract 8 proton bunches to T2K experiment with the shorter repetition period of 1.3 Hz. To shorten the charging period to be less than 1.3 second to realize the designed output beam power of 750 kW, a new charging power supply of the PFL is developed and tested. Minimum charging time of 200 ms is measured using the existing PFL (total load capacitance is 1.2 μ F). During the user operation continued from 2010, shunt-diodes and resistors mounted in the pulse modulator were broken due to the discharge of the resistors. In addition, the coaxial high voltage cable for the DC charging power supply was broken down due to the shortage between the center core and the shield. Improvement of these components is also reported in this paper.

1. はじめに

J-PARC 加速器は、400 MeV の線形加速器 (Linac)、3 GeV の Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、30 GeV のメインリング (MR) の 3 つの加速器から構成される。上流の RCS で 3 GeV に加速された陽子バンチは、合計 8 バンチを 40 ms 毎に 2 バンチずつ 4 回に分けて MR へ入射される。MR は、長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) とハドロン実験に向けて大強度の陽子ビームを供給している。9 台の RF 加速空洞によって 30 GeV にまで加速された陽子ビームを、5 台のキッカー電磁石と 6 台のセプタム電磁石を用いて、ニュートリノ 1 次ビームラインへと 1 ターンで取り出す (早い取り出し)。2017 年 4 月までに、2.48 秒の繰り返し周期で、最大 470 kW の陽子ビーム (2.4×10^{14} 個に相当) を、ニュートリノ生成ターゲットへ供給する事に成功した [1]。

ニュートリノの CP 非保存をより高統計で研究するには、J-PARC 加速器の設計値である 750 kW のビーム出力が必要不可欠である。そのため、MR ではビームの入射から取り出しまでの周期を、2.48 秒から 1.3 秒へ短縮する事を計画している。現在、MR の主電磁石電源 [2] や射出電磁石 [3] などの、高繰り返し化に向けた改修が MR 全体で進行中である。本論文では、これまでに実施した速い取り出しキッカー電磁石のアップグレードについて報告する。

2. 早い取り出しキッカー電磁石システム

集中定数型のキッカー電磁石 [4] と、それらを励磁するパルス電源 [5] が 2010 年に製作され、これまで稼働している。Table 1 にキッカー電磁石システムの諸元を、Figure 1 にマグネット側に取り付けた CT で測定したパルス励磁電流波形を示す。フラットトップにおける電流は約 6500 A で、5 台合わせた蹴り角は 6.08 mrad である。MR の加速高周波ハーモニック数は 9 であるが、早い取り出し用キッカー電磁石の立ち上がり時間が約 1 μ s であるため、1 つのバケツが空になっている。8 個のバンチ (取り出し時のバンチの間隔は 581 ns) を

4.5 μ s のフラットトップを持つパルス磁場で蹴り出している。

Figure 2 に、キッカー電磁石システムの回路図を示す。パルス励磁電流の形成には、Blumlein 型の PFL を用いている。システムの特異インピーダンスは 5 Ω が選ばれ、PFL は 60 段のコンデンサ (1 段あたり 20 nF) とインダクタ (1 段あたり 500 nH) から構成される。高圧充電器 (松定プレジジョン社製 HAR-40P30、最大電圧 40 kV、最大電流 30 mA) を用い、約 1.8 秒間かけて PFL を定格の 33 kV にまで充電し、サイラトロンを導通させる事でパルス電流を形成している。早い取り出し直線部では、T2K 実験への取り出しだけでなく、ビームアポートダンプへの取り出しも行なっている。ビームの振り分けは、キッカー電磁石の電流極性を変えることで行う。1 つの PFL の両端には、正負それぞれの極性に対応したサイラトロンがあり、サイラトロンへのトリガー信号を制御することで、蹴り出す方向を変更している。

2010 年から稼働し始めた Fx キッカーシステムであったが、運転中に故障を起こすことが何度かあった。故障による誤動作が起こると、大きなビームロスの原因となるだけでなく、復旧するまでビームを止めなければならない場合もあるため、可能な限りの対策を実施する必要があった。また、繰り返し周期の短縮に伴い、より短い時間で充電が可能な急速充電器を導入する必要があった。

3. 機器の故障と対策

3.1 抵抗器とシャントダイオードの破損

2012 年の運転中に、シャントダイオードと、それに直列に接続されていた抵抗器 (Figure 2 参照) が破損し、ビーム運転が停止した。Figure 3 に、破損した抵抗器の写真を示す。1 本あたり 4.4 Ω の抵抗器 (東海高熱社製 SP 抵抗器) を 6 本並列 (3P \times 2P、合成抵抗 R = 0.76 Ω) し、1 本のダイオードスタック (CKE 社製 3HV12M24A、57.6 kV 耐圧) と接続した回路を 2 本並列 (合成抵抗 R = 0.37 Ω) に接続し、ニュートリノ側と

*takuya.sugimoto@j-parc.jp

Table 1: Kicker System Parameters[4]

Item	Design Value	Unit
Kick angle	6.08	mrad
Magnet length	1000	mm
Kick strength	0.627	Tm
Physical aperture	150(H) × 130(V)	mm
Magnet inductance	3	μH
Number of magnets	5	
Charging voltage	33	kV
Excitation current	6.5	kA
Flat top length	4.5	μs
Rise time (1% to 99%)	1.0	μs
Characteristic impedance	5	Ω

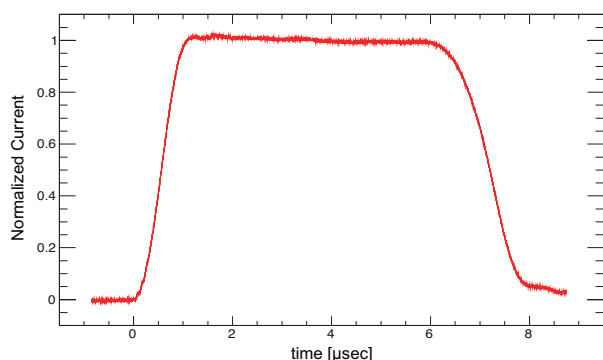


Figure 1: Pulse waveform of excitation current measured by CT mounted before the magnet.

アポートダンプ側のそれぞれのサイクロトロンに対して実装していた。破損した抵抗器は、モジュレータのオイル中に拡散していたため、フィルターを用いてオイルを濾過した。抵抗器とダイオードの交換を含め、作業は数日を要した。

抵抗器が破損した原因については、同じ時期に発生していた、入射キッカー電磁石のインピーダンス整合用抵抗器の放電による抵抗器の破損との類似性から、導電性セラミックの抵抗体とアルミ電極の間の接触不良による放電であると考えられた [6]。接触を改善するために、電極と抵抗体の間に焼鈍した銅ワッシャ（厚さ 0.1 mm）を挿入する方法や、電極をセラミック抵抗体にろう付けする方法などを開発した。さらに、アルミ電極が中心軸方向に引っ張られないような取り付け方

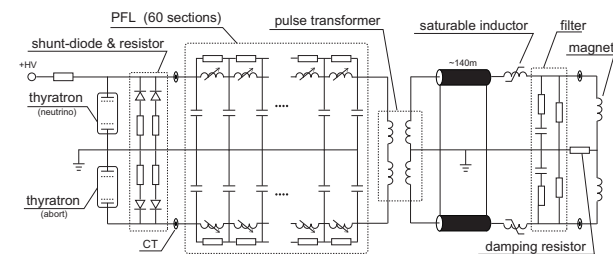


Figure 2: Circuit diagram of the Fx kicker magnet system[4]



Figure 3: Broken ceramic resistors connected with the shunt-diode.

法にも変更した。また、ダイオードもより高耐圧なもの（CKE社製 3HV10M18LF、36 kV 耐圧を 2 直列）へと変更した (Figure 4 参照)。

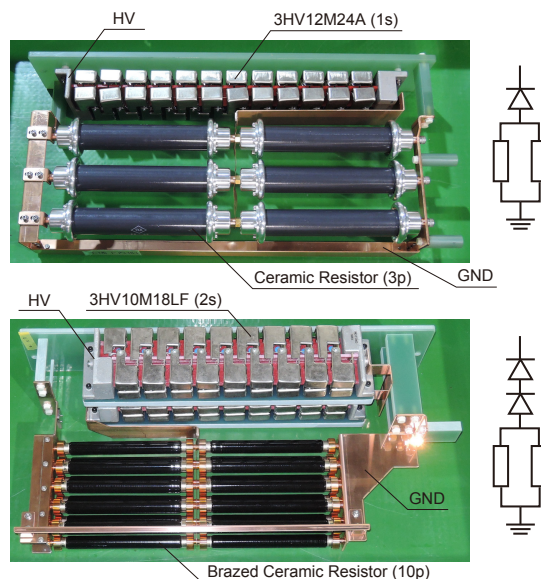


Figure 4: (Top) Original shunt diode and resistor unit. (Bottom) New unit.

早い取り出しキッカー電磁石では、ビームを蹴り出した後は次のビーム入射までリング内にはビームが存在しないため、インピーダンスを整合させて反射波を無くす必要はなく、反射波が 300 μs ほど続いていた。しかし、長時間に渡り反射波が回路内に存在することが原因と思われる、PFL 用の充電器の故障が発生したため、シャント抵抗器をろう付けタイプに変更することと同時に、抵抗値を PFL の特性インピーダンスと同じ 5 Ω へと変更した。この時の抵抗器は、1 本あたり 200 Ω のものを 40 本並列 (20P×2P) に接続した。Figure 5 に、PFL 内に取り付けた CT で測定した、合成抵抗を変更する前後の電流波形を示す。電源側でインピーダンスを整合した事により、反射波が減衰していることを確認した。試験用として、5 台あるモジュレータのうち 1 台のみインピーダンスを整合させていたが、2017 年夏のシャットダウン中に 5 台全てを整合させる予定である。

3.2 充電器高圧ケーブルの破損

2014 年の夏季メンテナンス中に、充電器とモジュレータの間を繋ぐ高圧用同軸ケーブル (40 kV 耐圧) が絶縁

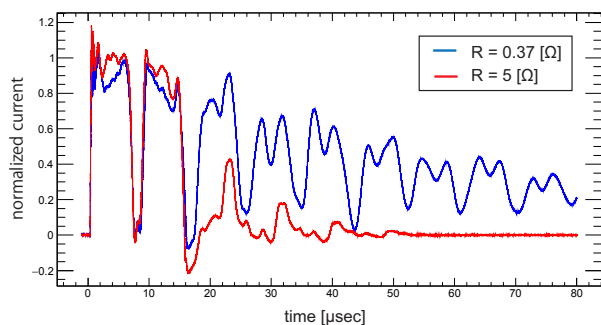


Figure 5: Pulse waveform measured by CT mounted in the PFL modulator.

破壊を起こし、芯線とシールドが導通する事象（いわゆるパンク）が発生した。また、充電器側に接続された高圧コネクタを取り外すと、放電によるものと思われる腐食が見られた。Figure 6 に、損傷したケーブルの写真を示す。充電器は直流電源であり、充電電圧もケーブルの耐圧以下であったにもかかわらず、ケーブルのパンクが発生したことから、サイラトロン導通時のパルス状のノイズが電源へと戻って来てしまっている事が疑われた。そのため、新しい充電器には、高圧出力部にサージ電流をブロックするためのダイオードを取り付ける事にした。

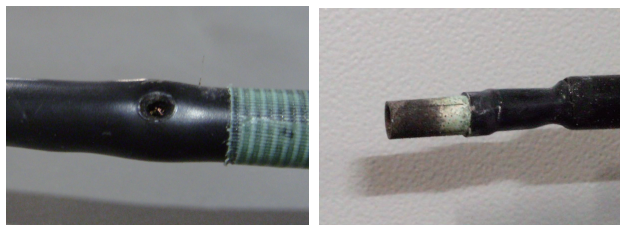


Figure 6: Pictures of the broken coaxial high voltage cables (left) and its connector (right).

4. 充電器の改良

MR の繰り返し周期を 1.3 秒以下にするためには、充電時間を現行の 1.8 秒から 1 秒以下へと短縮することが必要である。一定電流 I_{chg} でコンデンサ C を充電する場合、時間 T_{chg} で電圧 V まで充電する際に必要な電流 I は、以下の式で求められる。

$$I_{\text{chg}} = \frac{CV}{T_{\text{chg}}} \quad (1)$$

よって、 $C=1.2 \mu\text{F}$ のコンデンサを、 $T_{\text{chg}}=1$ 秒で定格電圧 ($V=33 \text{ kV}$) にまで充電するには、 $I_{\text{chg}}=40 \text{ mA}$ の電流が必要となる。将来、繰り返し周期がより短くなる事も想定し、最大電流 200 mA で出力可能な充電器（日本高周波社製）を導入する事にした。これにより、最短 0.2 秒で 33 kV まで充電することが可能となる。

Table 2 に新しい充電器の仕様を、Figure 7 に充電器のブロック図を示す。充電電圧を制御回路内の FPGA

Table 2: Specification of the PFN Charger

Item	Design Value	Unit
Load Capacitance	1.2	μF
Charging Voltage	0 - 40	kV
Voltage Jitter (pk-pk)	≤ 0.1 (Flat top)	%
	≤ 1 (Ramping)	%
Max. Output Current	200	mA
Min. Charging Time	200	ms
Repetition Rate	1 - 8	s
PWM SW Freq.	5 - 35	kHz

へフィードバックし、PWM コントローラにてスイッチングのパルス幅を調整することで PFN への出力電流を微調し、充電電圧を安定する。高い精度での充電電圧の制御を行うためには、モジュレータ内部で充電電圧を測定し、それを制御回路にフィードバックするのが最良である [7]。しかし、モジュレータの構造上、高圧プローブをモジュレータ内部に設置することが難しかったため、パルストランスで昇圧した直後の電圧をフィードバックに用いる制御方式を採用した。また、このキッカー電磁石は、ビームインターロック事象が発報した際の、アポート取出しキッカー電磁石としての役割も持っている。そのため、任意のタイミングでビームをアポートダンプへ蹴り出せるようにするには、主電磁石の加速パターンに合わせた充電を行える必要がある。これを実現するために、PLC でアナログ電圧 ($0-5 \text{ V}$) を生成し、それをパターン電圧 (V_{ref}) として充電器に与えて制御する方式を採用した。2016 年に充電器の設計と製作をし、2017 年に実機を用いてその性能を評価した。

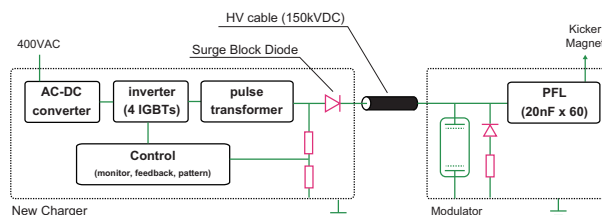


Figure 7: Block diagram of the new charging unit.

Figure 8 に、サイラトロン陽極に直接取り付けられた高圧プローブで測定した PFL の電圧 (V_{PFL})、充電器内部の抵抗器で $1/1000$ に分圧し FPGA へフィードバックしている電圧モニター (V_{mon})、ならびに抵抗器で分流した電流モニター (I_{mon}) を示す。(a) は、最大出力での充電時間を測定するため、立ち上がり時間 $T_{\text{chg}} = 0 \text{ s}$ のパターンを入力した波形を、(b) は $T_{\text{chg}} = 1 \text{ s}$ のパターンを入力した波形を示す。この図より、最短 200 ms で PFL を充電可能であることを確認した。

しかしながら、パターン電圧に追従させた場合、充電中の波形の安定性が良くなかった。パターン電圧に対する追従性を評価するために、入力パターンに対する追従誤差 ($\Delta V / V_{\text{ref}}$) を測定した。Figure 9 に、2 種類のパターン電圧 ($T_{\text{chg}} = 400 \text{ ms}$ と $T_{\text{chg}} = 1 \text{ s}$) に対する誤差を測定した。充電開始からしばらくの間は、数

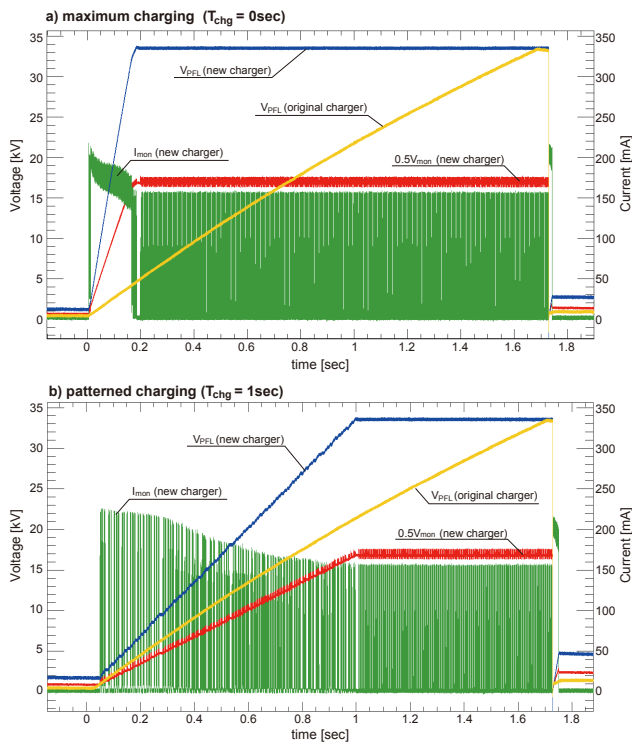


Figure 8: Waveform of the charging voltage measured at the anode of Thyatron in the PFL.

%の追従誤差を持つが、フラットトップに近くにつれて $\pm 1\%$ で制御出来ていることを確認した。また、フラットトップの安定性は、概ね $\pm 0.1\%$ 以内を達成しているが、PFLの漏洩電流による電圧降下を補充する前後において、 $\pm 0.1\%$ の範囲を超えてしまう場合があることがわかった。今後、PWMコントローラのスイッチングタイミングを最適化する事や、FPGAに電圧をフィードバックしている部分のノイズ対策を強化するなどを実施し、より安定に制御できることを目指す予定である。

5. まとめ

J-PARCメインリング早い取り出しキッカー電磁石システムは、2010年の稼働以来、様々な問題に直面し、それらを解決して来た。中でも、抵抗器の放電による損傷を解決するために、新たに開発したろう付けタイプのセラミック抵抗器を導入し、電極とセラミック抵抗体との接触を改善した。また、1.3秒の繰り返し周期で運転可能な高速充電器を導入し、最短0.2秒でPFLのコンデンサを定格の33kVに充電出来るようになった。さらに、主電磁石の加速パターンに追従する電圧パターンでの充電についても評価し、充電中はパターン電圧に対し数%の追従誤差があるが、フラットトップでは概ね $\pm 0.1\%$ 以内での制御が実現できており、実用上は問題ないことを確認した。2017年夏のシャットダウン中に、5台全ての充電器ならびにダイオードユニットを新しいものに置き換える予定であり、10月からの運転では、主電磁石の加速パターンに合わせた充電が可能となる予定である。

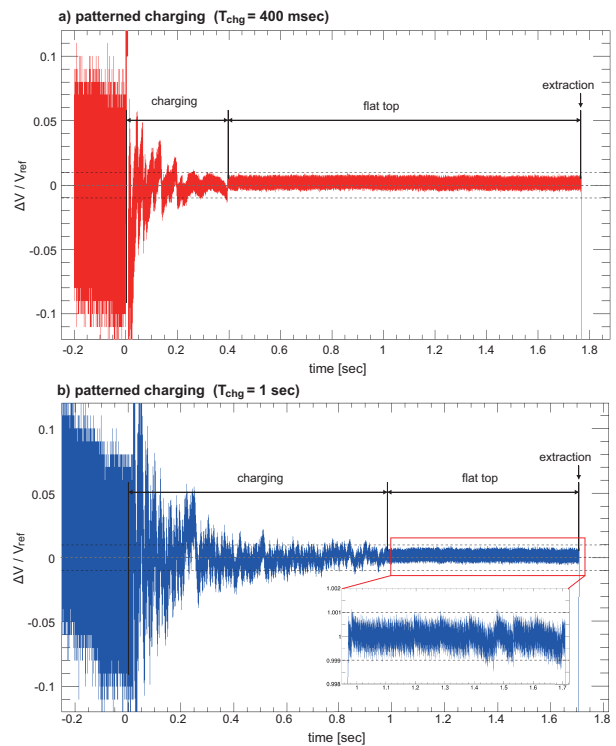


Figure 9: Tracking error for patterned charging of PFL.

謝辞

モジュールの改良ならびに充電器の開発では、日本高周波株式会社 秋川藤志氏をはじめとする多くの方々に、設計、測定、調整に渡り、多大な協力を頂いたことに、深く感謝します。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, "Performance and status of the J-PARC accelerators", *Proc. IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017.
- [2] T. Shimogawa *et al.*, "First new power supply of main magnet for J-PARC main ring upgrade", those proceedings.
- [3] T. Shibata *et al.*, "The development of a new low field septum magnet system for fast extraction in main ring of J-PARC", *Proc. IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017
- [4] K. Koseki *et al.*, "The fast extraction kicker for J-PARC with a novel pulse compression system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **739** (2014) pp.63-67
- [5] K. Koseki, "The fast extraction kicker power supply for the main ring of J-PARC", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **729** (2013) pp.3-7
- [6] T. Sugimoto *et al.*, "Development of a non-inductive ceramic resistor", *Proc. IPAC2013*, Shanghai, China, 2013
- [7] C. Kondo *et al.*, "Developments of high voltage power supply using PWM control", *Proc. PASJ2013*, Nagoya, Japan, 2013