

## J-PARC MR 高繰り返し化に向けた主電磁石電源のアップグレード

### UPGRADE OF MAIN MAGNET POWER SUPPLY SYSTEM IN J-PARC MR FOR HIGH-REPETITION RATE OPERATION

三浦一喜<sup>#, A)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 森田裕一<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>, 織井安里<sup>A)</sup>, 大越隆夫<sup>A)</sup>, 国安祐<sup>C)</sup>, 吉成柁<sup>D)</sup>, 五十嵐進<sup>A)</sup>  
Kazuki Miura<sup>#, A)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Yuichi Morita<sup>A)</sup>, Ryu Sagawa<sup>B)</sup>, Asato Orii<sup>A)</sup>, Takao Oogoe<sup>A)</sup>,  
Yuu Kuniyasu<sup>C)</sup>, Masaki Yoshinari<sup>D)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> KEK, <sup>B)</sup> Universal Engineering, <sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd., <sup>D)</sup> NAT Corporation

#### Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), we plan to shorten the driving cycle from 2.48 sec to 1.36 sec for higher beam power. To achieve this, replacement of the power supplies of main magnets is mandatory. During the long-term shutdown period of J-PARC MR in FY2021, a wide range of upgrades were carried out, including new power supply installations, rearrangement of present power supplies, load splitting of main magnets, and cable rewiring. After a large-scale upgrade, it is essential to carefully check the correctness of wiring work and various safety. In this report, we will introduce various confirmation work carried out after the rearrangement about the status of the main magnet power supply system for high-repetitive rate operation in J-PARC MR.

#### 1. はじめに

J-PARC ではビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒へと速める高繰り返し化が求められており、その実現のためには主電磁石電源の高繰り返し化対応が必要となる。この要求に対し我々は 2 つの手法で対応することにした。

一つは、高繰り返し対応の新電源開発である。この新電源については過去にも報告[1]しているため、詳細は省略するが、既存電源の約 2 倍の高出力電圧に対応したうえで、交流系統における電圧変動の抑制、デジタル制御に対応した電源である。ただし、全ての主電磁石電源を新電源に交換するには莫大なコストが必要となる。そこで我々はもう一つの手法として既存主電磁石電源の再編成を検討した。この再編成では既存の大型電源を負荷の軽い電磁石ファミリー用に変更することで高繰り返し化に対応する方法と、既存の 1 ファミリーを 2 分割することで負荷を半減させたうえで、既存電源 2 台でドライブする方法の 2 通りで検討を行った。

我々はこの新電源インストールおよび既存電源再編成を 2021 年度長期シャットダウンにおいて平行して実施することで、J-PARC MR の主電磁石システムを高繰り返し化に対応した状態にアップグレードした。このアップグレードによる電磁石ファミリーと電源の対応および変更点について概要を Table 1 に示す。本報告では新電源インストールおよび既存電源再編成の概要、それら大規模アップグレードに伴う各種配線作業の確認手法や実施した安全性確認について紹介する。

Table 1: Summary of Upgrade of Main Magnet Power Supply

Mag family		PS	Changes
-2021	2022-		
BM	BM	New	New PS with C-BANK
QDN	QDN	New	New PS with C-BANK
QFN	QFN	New	New PS with C-BANK
QDX	QDX1	Pre-BM5	Halved load & PS replacement
	QDX2	Pre-BM6	Halved load & PS replacement
QFX	QFX1	Pre-BM1	Halved load & PS replacement
	QFX2	Pre-BM2	Halved load & PS replacement
QFP	QFP	Pre-QFR	PS replacement & rewiring
QDR	QDR	New	New PS & rewiring
QFR	QFR	Pre-QDX	PS replacement
QDT	QDT	New	New PS & rewiring
QFT	QFT1	Pre-QFT	Halved load
	QFT2	Pre-QDT	Halved load & PS replacement
QDS	QDS1	Pre-QDS	Halved load
	QDS2	Pre-QDR	Halved load & PS replacement
QFS	QFS1	Pre-QFS	Halved load
	QFS2	Pre-QFP	Halved load & PS replacement
SDA	SD	New	New PS & Family integration & rewiring (SDA & SDB)
SDB			
SFA	SFA	New	New PS

<sup>#</sup> kazuki.miura@kek.jp

## 2. 新電源インストール

既存電源の流用では対応できないファミリーについては、開発を進めていた新電源で対応した。この新電源は、既存電源に対して出力電圧 2 倍、系統変動抑制、デジタル制御[2]を可能としたもので、2016 年度の初号機を始めとして順次インストール準備を進めてきたものである。2021 年度長期シャットダウン中に最終納品分が全て J-PARC に納品され、計画された新電源 12 台全てがインストールされた。なお、新電源中最大となる BM 電源では一台当たりで電源本体全長約 20 m に加えてコンデンサバンク[3]として使用する海上コンテナ 3 台という規模の大型電源となり、BM 電源 6 台を設置するために新たに電源棟 3 棟の新築が行われ、既存の D1~D3 電源棟に加えて、J-PARC MR では電源棟 D1~D6 までの全 6 棟編成となった。

この新電源であるが、インストールに際しては受電系の新規配線作業、既存電源からの負荷配線接続など大規模なケーブル敷設工事が行われた。これら配線工事の確認として新電源立ち上げに先行して受電配線の確認を実施した。新電源受電配線の確認としては新電源の受電部ケーブルをリフトし、トランスからの 3 相交流受電部の電圧をオシロスコープで確認した。結果としてケーブルスワッピングが発生していた箇所が見つかった。発見されたケーブルスワッピングの一例として Fig. 1 を示す。

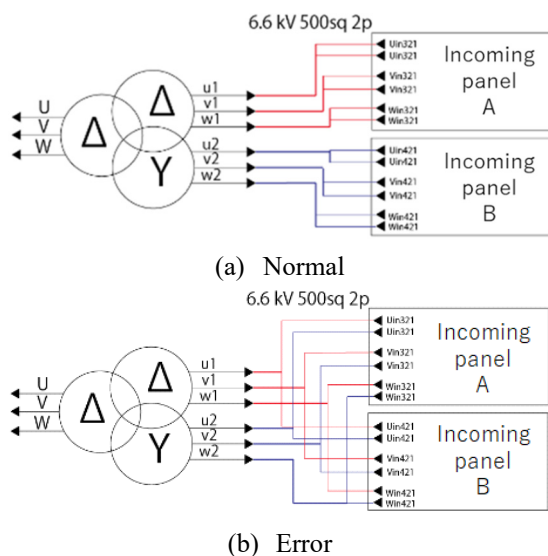


Figure 1: Example of power receiving wiring error.

新電源では Dd0y11 形式の受電トランスを採用しており、受電トランス二次側からデルタおよびスターの 2 系統で受電している。このデルタとスターそれぞれで 3 相を 2 並列にケーブル配線している訳であるが、その並列配線が新電源受電盤とデルタ、スター間で混在した状態になっていた。このまま電源を立ち上げればデルタ、スター間の位相差(30°)によって受電ケーブル間に電流がループしてしまい、ケーブル損傷の危険もあった。この結果を基にした再配線および再度の受電電圧測定において正

常性が確認され、新電源は無事に立ち上げ調整が実施された。大電力機器のインストール、立ち上げにおいては今回のように事前の安全確認が非常に重要である。

## 3. 既存電源再編成

既存電源を高繰り返し化対応にして使用するための再編成においては、2 種類のアプローチが行われた。一つは元々高負荷の磁石ファミリー用に使用していた大型電源を負荷の軽い電磁石ファミリーに流用して再利用(出力電圧 2 倍での運用が可能な既存電源への置き換え)する方法、もう一つは主電磁石負荷を半減(現状の磁石ファミリーを 2 分割して、半減させた負荷を出力容量の近い 2 台の既存電源でそれぞれにドライブ)する方法である。更に一部ファミリーではこれらの手法を併用することで、高繰り返し運転に対応させた。それぞれの手法について下記の通り紹介する。

### 3.1 既存大型電源への置き換え

負荷の重いファミリーをドライブしていた大型の既存電源については、出力電圧 2 倍での運転が可能な負荷の軽いファミリー用に再編成を行い、既存電源での 1.36 秒運転に対応させた。この一例として QFR ファミリーの電源流用について Table 2 を示す。

Table 2: Example of PS Replacement (QFR)

PS	Previous	New
Rated output current	1038 A	1037 A
Rated output voltage	800 V	2100 V
Output power (Peak)	0.81 MW	2.07 MW

この大型電源への置き換えであるが、単純に定格出力電力が大きければ良いという訳では無い。主電磁石電源ではパワー素子として IGBT や IEGT が使用されている。パワー素子は最小パルス幅で最小出力が決まるため、それらで構成された電力変換ユニットは定格出力に対して小さすぎる出力は制御できない。そのため、今回のように 2 倍の出力電圧を目的とする場合には、出力電力において約 2 倍のものを選定する必要がある。我々はそれらを前提としたうえで事前にシミュレーションによる検討を実施し、置き換え先の既存電源を決定している。

### 3.2 主電磁石負荷の 2 分割

これまでの主電磁石ファミリー 1 つを 1 台の電源がドライブする構成から変更し、一部ファミリーの主電磁石負荷を 2 分割することで、負荷を半減させて既存電源の定格容量での高繰り返し運転に対応させる。これには電源棟、MR 加速器トンネル内およびそれらをつなぐサブトンネルを含めて各ファミリーで数百メートルを超える大規模な配線変更が多岐にわたって実施された。負荷分割に伴う配線変更の一例として QDS を Fig. 2 に示す。

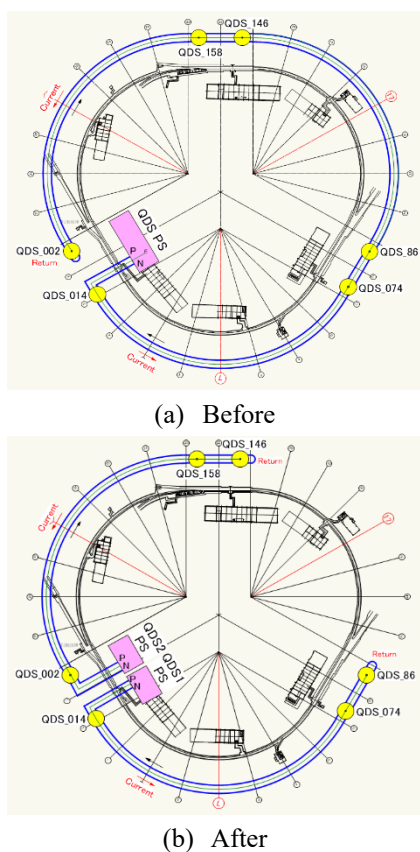


Figure 2: Load split example (QDS).

青線がパワーケーブルを表しているが、元々は MR トンネル内を一周して QDS 主電磁石全 6 台を繋いでいた配線経路を電源棟から最遠部で分割している。これは光学的な対称性を崩すことになってしまうが、コスト削減のためにケーブル長がなるべく短くなる形での再編成を行っている。また高繰返し対応に伴い、一部ファミリーでは敷設していた低圧ケーブルを全区間において高圧ケーブルに張替えする作業も実施された。これらケーブル撤去、敷設工事は莫大な量であり、2021 年度長期シャットダウン期間中における主電磁石系アップグレード作業においても大きな割合を占める工程となった。

#### 4. 電源再編成後の確認

電源の再編成においては、地上部の電源棟やトンネル内も含めて大規模な配線変更や新規敷設(電力ケーブル:約 35 km、制御線:約 12 km)が実施された。配線変更においては、ケーブルの配線間違いを予防するためにケーブルのタグ付け目視確認や導通チェック、電源出力部でのインピーダンスアナライザでの負荷測定などといった方策は取られ、それらの成果として配線間違いの発見、修正が随時行われた。しかし、これらの手法では配線のショートなどといった負荷として異常が現れるものまでしか発見は出来ない。ケーブルが長大であることもあり、配線作業が完了した後、ビーム運転前の最終確認として全ての配線変更部における確実性のある健全性確認方法について検討が行われた。

主電磁石のパワーケーブルの配線が間違っていた場合であるが、もし極性が反転して配線されていた場合でも、電源から見た場合には負荷としては正常であるため、インピーダンスアナライザによる負荷測定や電源の試験運転では異常に気付くことが出来ない。もし、この状態のままビーム運転を実施した場合には主電磁石は想定外の逆磁場を発生させている状態であるため、ビームの大ロスや、それによる加速器機器の重大な故障に繋がる可能性もある。それらトラブルを防ぐためにも、配線確認は確実な方法で行う必要がある。そこで我々がとった方法は小型アンプを使用して配線作業完了後の主電磁石をドライブし、その磁場を測定することで主電磁石の極性が正しい方向に働いているかを確認する手法である。今回は DC 2.5 kW 容量のアンプを使用して 12 A の電流を流すことで主電磁石を励磁した。この電流値での磁場は主電磁石ファミリーによって異なるものの 10~20 mT 程度である。これは主電磁石電源の定格運転時に比べれば非常に小さな値ではあるが、主電磁石の残留磁場 ~3 mT 程度に対しては十分に有意な値であり、今回のように磁場極性の確認を目的とする場合には充分である。

この方法を選択した理由は 3 点ある。1 点目は配線変更直後にはまだ再編成後の主電源が通電可能な状態まで立ち上げ出来ていないため、通電がそもそもできないことである。もし通電可能状態になるまで待ってこの磁場測定を行う場合、工程上ビーム運転開始までに極性確認が間に合わない。2 点目は、磁場測定は通電状態の主電磁石に接近する必要があるため、定格運転時(高電圧)の主電磁石の磁場測定には危険が伴うため、今回のように多くの対象に対して、磁場測定を行うのは危険である。3 点目として、仮に配線間違いがあった場合の事故(ケーブルや主電磁石の破損)を懸念したものである。以上の点から、今回は低容量の小型アンプを用いてドライブするこの手法を採用した。

結果としては、配線間違いから極性が反転している磁石が 3 ファミリー発見され、配線の修正が実施された。これらは懸念していた通りに極性のみ反転して配線されていたもので、電源側からのインピーダンスアナライザ測定では発見できなかったものである。この簡易磁場測定による配線確認の有用性が確認された。

#### 5. アップグレード後の出力電流較正

J-PARC MR の既存主電磁石システムであるが、各ファミリーの電源は指令値に対する出力電流値にそれぞれ異なるオフセット(1 A 未満)が乗っており、それが個体差となっていた。我々は主電磁石システムのアップグレードの準備として、これら電源間個体差を把握するために各電源の出力電流値を 1 台の可搬型 DCCT を用いて同一測定条件下で測定するシステム(測定エラー 1 mA 以内)を用意し、2018 年から電源間個体差の測定を実施していた[4]。

J-PARC MR では高繰返し化対応に向けて、主電磁

石システムだけでなく、RF システムやビーム入出射システムなども含めた多岐にわたるアップグレードが行われており、アップグレード後のビーム試験初期では、アップグレード前のビーム状態を再現できるかが重要となる。そこで我々はアップグレード後の主電磁石電源に対して、可搬型 DCCT による出力電流測定およびアップグレード前の各主電磁石ファミリーの個体差を再現させるための較正を実施した。

出力電流較正の手法としては、アップグレード前後で可搬型 DCCT による各電源の出力電流測定結果を比較することで補正値を算出し、各電源制御盤のパラメータ調整や出力電流指令値を作成する際に補正値を自動で適用するように上位制御ソフトの改修が行われた。較正後の出力電流測定結果として、各電源の出力電流値の個体差はオフセット 10 mA 未満までアップグレード前の状態を再現した。この値は電源の持つ出力電流偏差(約 100 mA)に対して十分小さく、較正結果としては充分である。

## 6. まとめ

J-PARC ではビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.48 秒から 1.36 秒へと速める高繰り返し化が求められており、その実現のためには主電磁石電源の高繰り返し化対応が必要となる。この要求に対し我々は、高繰り返し化対応の新電源開発および既存電源の再編成という 2 つの手法を 2021 年度長期シャットダウンにおいて平行して実施することで、J-PARC MR の主電磁石システムを高繰り返し化に対応した状態にアップグレードした。

しかしながら、J-PARC MR 主電磁石電源のような大電力機器においては、大規模アップグレードによる多岐にわたる変更に対して、各種配線作業の確認や安全性確認について入念な検討が必要である。本報告ではアップグレード概要に加えて、それら確認作業についても一例を紹介した。約 1 年間(2021 年 7 月~2022 年 5 月)という長期シャットダウン期間ではあったが、本報告で紹介した以外にも制御システム系の配線変更や更新などの作業も行われており、これだけ大規模なアップグレードを重大な故障や事故無く完遂することは困難を極めた。実際に各種確認の結果として修正を行った点も多く、いずれも確認を怠っていれば機器故障やビーム試験に多大な影響を与えるものであったが、それぞれを事前に把握、修正することで、Fig. 3 に DCCT によるビーム測定結果を示す通り 2022 年 6 月から行われた J-PARC MR ビーム試験[5]において、ビーム試験初期からビームは正常に MR を周回、加速開始前の 0.13 秒で取り出しが行えている。

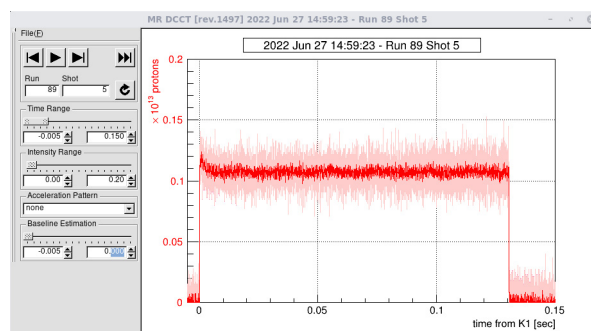


Figure 3: J-PARC MR beam current measurement.

これは我々の主電磁石システムアップグレードが確実に行われた結果であり、主電磁石システムにおけるアップグレード後の各種確認が正しく行われた証明である。現在 J-PARC MR はビーム試験を終えて夏季シャットダウン期間に入っており、我々は今秋からのビーム試験再開に向けて、アップグレード後の J-PARC MR 主電磁石電源システムの調整を鋭意進行中である。

## 謝辞

本報告で紹介した J-PARC MR 主電磁石の高繰り返し化対応アップグレードは、2021 年に KEK を退職された栗本佳典氏の多大な活躍があつて実現された。栗本氏は我々 J-PARC MR 主電磁石グループのリーダーとして強力でプロジェクトを牽引し、今回の報告で述べた通りアップグレードを成功に導いた。この場を借りて栗本氏に改めて感謝の意を表す。

## 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.*, “A Control System of New Magnet Power Converter for J-PARC Main Ring Upgrade”, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 66, pp.1236-1241, Jul. 2019.
- [3] Y. Morita *et al.*, “Capacitor bank of power supply for J-PARC MR main magnets”, Nuclear Instrument and Method, Vol. 901, pp. 156-163, Sep. 2018.
- [4] K. Miura *et al.*, “Magnet Power Supply Calibration with a Portable Current Measuring Unit at the J-PARC Main Ring”, Proceedings of the IPAC'19, 19–24 May 2019, Melbourne, Australia.
- [5] T. Yasui *et al.*, “Results of high repetition beam commissioning in J-PARC MR” Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18 - 21, 2022, Kyushu-University Online, Japan.