

# J-PARC 加速器の現状

## STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

小栗英知<sup>#, A)</sup>

Hidetomo Oguri<sup>#, A)</sup>

A) J-PARC Center

### Abstract

The J-PARC facility consists of three accelerator facilities: Linac, RCS (Rapid Cycling Synchrotron) and MR (Main Ring synchrotron), and three experimental facilities: Materials and Life Science Experimental Facility (MLF), Hadron Experimental Facility (HD) and Neutrino Experimental Facility (NU). In the MR, the operation was suspended from the summer of 2021, and a major modification was made to shorten the repetition rate of the NU beam cycle from 2.48 s to 1.36 s. In April and June 2023, power supply fires occurred in MR and HD, respectively, and the beam operation was suspended for a long period of time. The operation was resumed after preventive measures and safety confirmation for the entire J-PARC. In December 2023, the beam power of 760 kW, which exceeds the initial target, was delivered to NU, and the power was further increased to 800 kW in June 2024. The beam power for HD was also successfully increased from 65 kW to 80 kW in 2024 through the upgrade. In the RCS, the beam power has been gradually increased while continuing the beam loss reduction study, and in April 2024, the beam power of 1 MW, which is almost the nominal power, has been supplied to the MLF target.

## 1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、RCS (Rapid Cycling Synchrotron) および MR (Main Ring synchrotron) の 3 加速器施設と、RCS から 3 GeV ビームを利用する物質・生命科学実験施設 (MLF) と、MR から 30 GeV ビームを利用するハドロン実験施設 (HD) およびニュートリノ実験施設 (NU) の 3 実験施設から構成される。MR においては、2021 年の夏から運転を長期休止し、2023 年までサイクルの繰り返し周期を 2.48 秒から 1.36 秒に短縮する大改造を行った。RCS においては、ビームロス低減スタディを続けながら徐々にビームパワーを増強してきた。一方で、2023 年 4 月と 6 月に 2 回、電源装置から火災が発生し、ビーム運転を長期間停止する事態に至った。ここでは、ビームパワー増強のプロセスや火災事象など、最近の加速器の運転状況について報告する。

## 2. 運転状況

### 2.1 2023 年度の稼働率および各機器停止時間

2023 年度の運転統計を Fig. 1 に示す。MLF ユーザへのビーム供給時間および稼働率は、2,478 時間、93 % であった。また NU ユーザへのビーム供給時間と稼働率は 453 時間、60 % であった。HD の利用運転は、2023 年度は実施しなかった。

加速器機器ごとのダウンタイムを Fig. 2 に示す。2023 年度でもっともダウンタイムが長かったのは、MR の偏向電磁石電源の不具合に起因するもので 167 時間であった。これは、6 月に発生した偏向電磁石 1 と 12 月に発生した偏向電磁石 3 の電源不具合であり、いずれも IGBT ユニットのトラブルであった。2 回とも、故障原因調査と予備の IGBT との交換作業を行ったため、それぞれ復旧に 4~5 日間を要した。

<sup>#</sup> oguri.hidetomo@jaea.go.jp

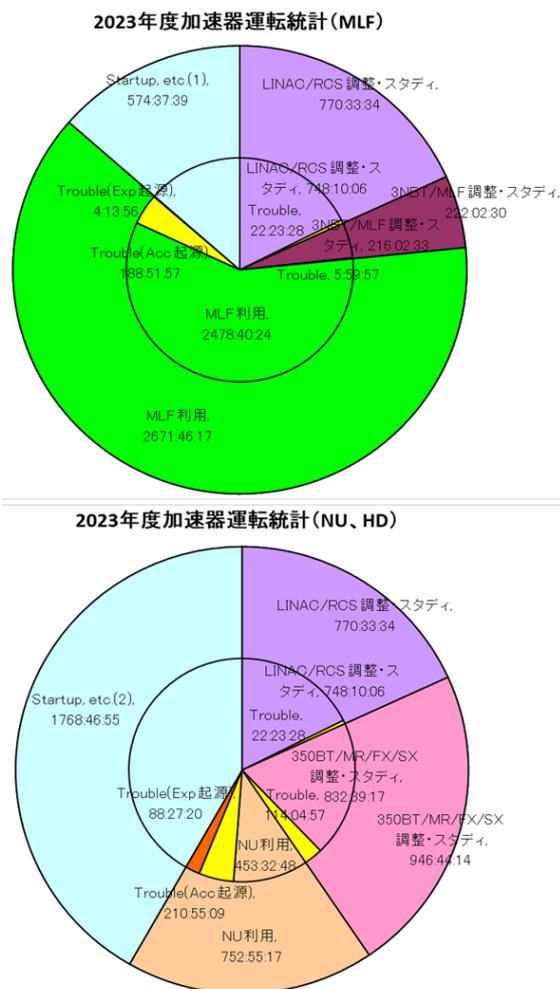


Figure 1: Operation statistics for the MLF (top) and for the NU and HD (bottom).



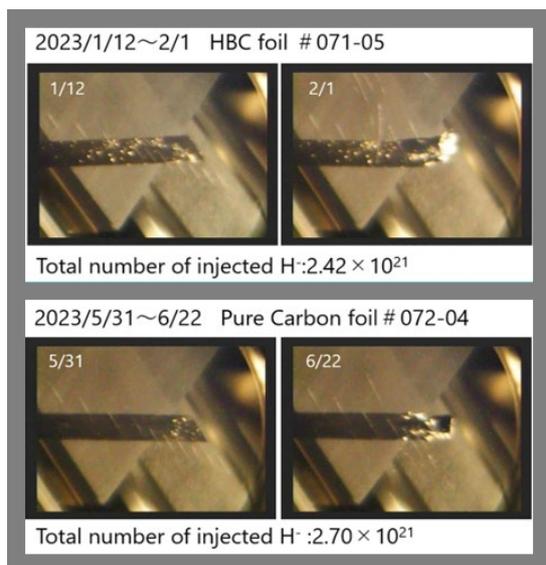


Figure 5: Comparison of the HBC foil (top) and pure carbon foil (bottom) under beam irradiation.

寿命については、今後も研究を続ける予定である。

4月25日のビーム調整中に、MRの高繰り返し用新4極電磁石(QDN)電源で火災が発生し、J-PARCのビーム運転を中断した[4]。本火災事象の発火場所は、電源盤内のトランスであった(Fig. 6)。発火原因は、チョッパ回路から初充電回路のトランスに回り込む高周波ノイズの影響により、トランスの2次巻線と宣伝シールド間でコロナ放電による絶縁劣化が進行し、焼損に至ったものである。再発防止策として本電源をトランスを使用しない初期充電方式に変更し、変更後、動作試験を行い健全性と安全性を確認したうえで、MRの運転を再開した。

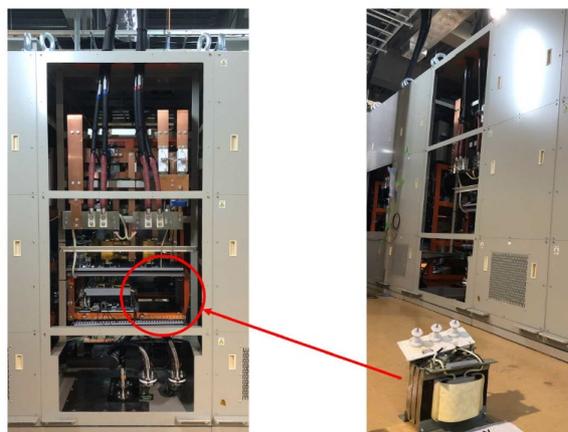


Figure 6: Location of the transformer in the power-supply panel (left) and the transformer (W 24 cm x H 24 cm x D 27 cm) removed from the power-supply panel (right).

6月22日の深夜にHDで火災が発生し[5]、2023年の夏期メンテナンス前のビーム運転はこの日で終了することになった。本HD火災事象は、直流安定化電源部の転極器(Fig. 7)からの発火であった。本転極器は、電磁石の極性を変更するための装置(当時は、転極はさせず

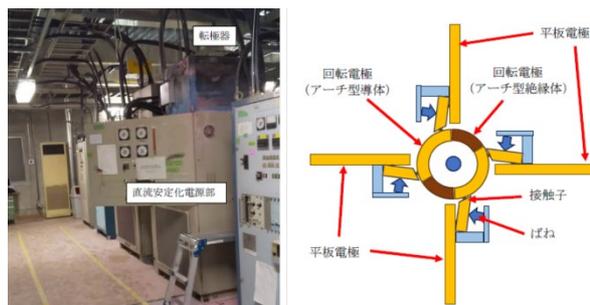


Figure 7: Location of the regulated DC power supply and the polarity-changer (left), and schematic diagram of the inside of the polarity-changer (right).

電磁石への通電のみを行っていた)である。出火原因は、回転電極のアーチ型導体が瞬間的に本来の位置から動いた結果、回転電極のアーチ型導体と接触子との間の接触抵抗が増大して発熱し、それにより周囲の樹脂が発火したと考えられる。アーチ型導体が動いた原因は確定できないが、平常運転時を想定したシミュレーションから、アーチ型導体の熱膨張により円盤型絶縁体の特定の箇所に応力が集中することが分かった。当該転極器は1980年代より使用されており、通電と停止を繰り返すことで疲労によりその部分の強度が低下し、最終的に円盤型絶縁体が破損しアーチ型導体の位置が保持できなくなる可能性があることが示された。

### 2.3 2023年夏期停止期間中の主な作業

J-PARCでは、各施設において毎年夏期に長期間メンテナンス作業を実施している。2023年度の夏期メンテナンスでは、通常メンテナンスのほかに、2度の火災事象をうけてすべての施設において、火災再発防止策を講じるとともに、インターロック機能の強化を行った。

リニアクにおいては、通常の保守作業の他に、SDTL15A空腔のRFカップラで放電痕が見つかったため、予備のカップラと交換した。また、ACS19用972MHzクライストロンにおいて、集束コイルから微量な漏水が発生したため、予備のクライストロンと交換した。最近毎年実施していたSDTL空腔の内面洗浄[6]は、2023年度夏期メンテナンスではスキップした。本作業は、一部のSDTL空腔がマルチパッキング領域の拡大により定格の高周波パワーを入力できなくなる現象を解消するために行っていたものである。2022年度は、本現象が生じていたSDTL04Aおよび04B空腔について洗浄を行ったが、1年間の運転で再発が無かったこと、他のSDTL空腔でも同現象が見られなかったため、2023年度は本作業をスキップすることができた。本内面洗浄作業は、対象となる空腔をビームラインから移動させて実施する必要があったため、作業による空腔破損のリスクや作業期間が作業準備を含めて長期間に及んでいた。今回この作業をスキップすることで、時間を他の作業に振り替えることができた。

RCSにおいては、通常の保守作業の他にRF空腔の置き換え作業を実施した。RCSではRF空腔を新タイプに置き換える作業を2021年より行っている。新タイプの空腔(「シングルエンド型」と呼ぶ)は従来タイプ(「プッシュ

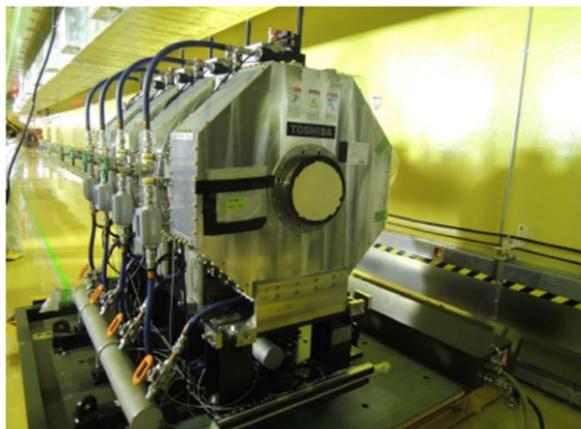


Figure 8: Installation work of the new RF cavity (single-ended cavity) at RCS in 2023 summer.

「ダブル型」と呼ぶ)と比較して消費電力を 40%低減できる [7]。2023 年度は 2 台の空胴を新タイプに置き換えた (Fig. 8)。RCS には RF 空胴が全部で 12 台使用しており、2022 年夏期メンテナンス時に 1 台すでに新タイプと交換しているため、2023 年度時点で 3 台が新タイプに置き換わっている。残り 9 台については順次交換していく予定である。

MR においては、通常の保守作業の他に 750 kW 安定運転を行うために、RF 空胴の追加や電源の拡張等を行った。当初、RF 空胴は 4 ギャップタイプを 9 台使用し加速電圧を 510 kV にする予定であったが、検討の結果、460 kV でもビームパワー 750 kW の定常運転は可能であることが分かったため、3 ギャップタイプを 3 台、4 ギャップタイプを 6 台に変更した (Fig. 9) [8]。将来的に 1.3 MW にビームパワーを達成するには、550 kV の加速電圧が必要となる。



Figure 9: Reassembling work of the RF cavity at MR in 2023 summer.

#### 2.4 2023 年 11 月から 2024 年 3 月まで運転状況

2023 年度の夏期メンテナンスを 11 月中旬に終え、その後ビーム運転を再開した。当初、MLF の利用運転は 11 月 21 日再開予定であったが、MLF の夏期メンテナンスの終了が遅れたため、12 月 3 日からの再開となった。

MR では、11 月 19 日から、新しい繰り返し周期である

1.36 秒でビーム調整を開始した。ビームの詳細チューニングや NU 施設検査を実施したのち、12 月 5 日より NU 利用運転を開始した。運転開始初日の 12 月 5 日に NU 利用運転時の今までの記録を超えて約 710 kW を達成し、さらに 12 月 25 日には、所期目標であった 750 kW を超える 760 kW に到達した。

#### 2.5 現在のビームパワー

MLF および MR のビームパワーの推移を Fig. 10 に示す。MLF では、2008 年に運転を開始して以来、加速器や水銀標的などの様々な機器の改良を行いながら、段階的にパワーを上げていき、2024 年 4 月 8 日から定格出力である 1 MW 相当の利用運転を開始した [9]。MR についても、2008 年の運転開始以来、段階的にビームパワーを上げてきた。2021 年から実施した加速器機器の大改造とその後の詳細なビームチューニングにより、2024 年 4 月に HD において 80 kW [10]、6 月に NU において 800 kW の運転をそれぞれ開始した。今後さらにビームチューニングを行いながらビームパワーを上げていく予定である。

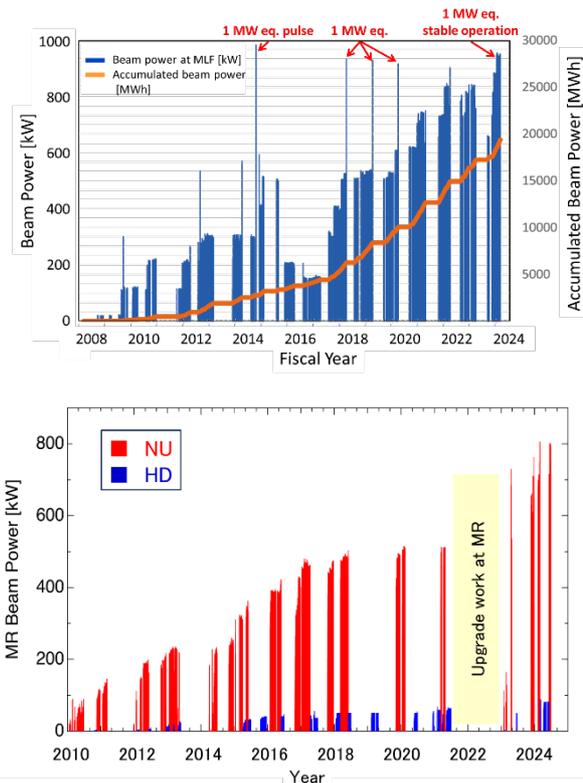


Figure 10: Beam power history at MLF (top), and NU and HD (bottom).

### 3. まとめ

2023 年度の運転では、4 月と 6 月に 2 回、電源装置から火災が発生し、ビーム運転を長期間停止する事態に至った。これらの事象に対し、原因調査を行い、必要なインターロックの強化など再発防止策を十分に講じたうえで、ビーム運転を再開した。MR においては、2023 年から 1.36 秒繰り返し周期によるビーム運転を行い、同年 12 月にこれまでの最高となる 760 kW のビームパワーを

NU に出射することに成功した。さらに詳細なビームチューニングを進めた結果、2024 年 6 月には 800 kW を達成した。運転モードの異なる HD については、繰り返し周期を 5.20 秒から 4.24 秒に短縮することにより、大改造前の記録である 65 kW から 80 kW にビームパワーを増強することに成功した。RCS においては、ビームロス低減スタディを続けながら徐々にビームパワーを増強し、2024 年 4 月からは MLF ターゲットに 1 MW 相当のビーム供給を開始した。加速器のビームパワー増強は着実に進んでおり、今後も安定な運転実績を積み上げながら加速器の高度化を目指していく。

## 謝辞

J-PARC 加速器の運転や高度化は、多くの方々のご支援により達成できているものである。関係者の皆様に深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR operation with the high repetition rate upgrade”, Proc. 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC2023), Venice, Italy, May 7-12, 2023, pp. 1294-1298.
- [2] K. Shinto *et al.*, “Operation status of the J-PARC high-intensity RF-driven negative hydrogen ion source”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Aug. 29- Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 928-931.
- [3] T. Nakanoya *et al.*, “Challenge to charge exchange with pure carbon foil in the J-PARC 3GeV synchrotron”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Aug. 29- Sep. 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 937-941.
- [4] <https://j-parc.jp/c/information/2023/06/08001216.html>
- [5] <https://j-parc.jp/c/information/2023/10/24001223.html>
- [6] T. Ito *et al.*, “Cavity cleaning for suppression of multipactor occurred at J-PARC SDDL”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Oct. 18-21, Online (Kyushu University), Japan, 2022, pp. 193-196.
- [7] M. Yamamoto *et al.*, “Development of a single-ended magnetic alloy loaded cavity in the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid cycling synchrotron”, Prog. Theor. Exp. Phys., 2023, 073G01.
- [8] K. Hasegawa *et al.*, “Preparation status 2024 of RF system for J-PARC MR upgrade”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2024, THP004, this meeting.
- [9] P. K. Saha *et al.*, “Beam loss and beam emittance minimization at J-PARC RCS for simultaneous operation to the MLF and MR”, Proc. 15th International Particle Accelerator Conference (IPAC2024), Nashville, TN, USA, May 19-24, 2024, pp. 939-942.
- [10] R. Muto *et al.*, “Status and outlook on slow extraction operation at J-PARC Main Ring”, Proc. 15th International Particle Accelerator Conference (IPAC2024), Nashville, TN, USA, May 19-24, 2024, pp. 1905-1910.