

J-PARC 加速器の現状

STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

小栗英知^{#, A)}

Hidetomo Oguri^{#, A)}

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。

[#] oguri.hidetomo@jaea.go.jp

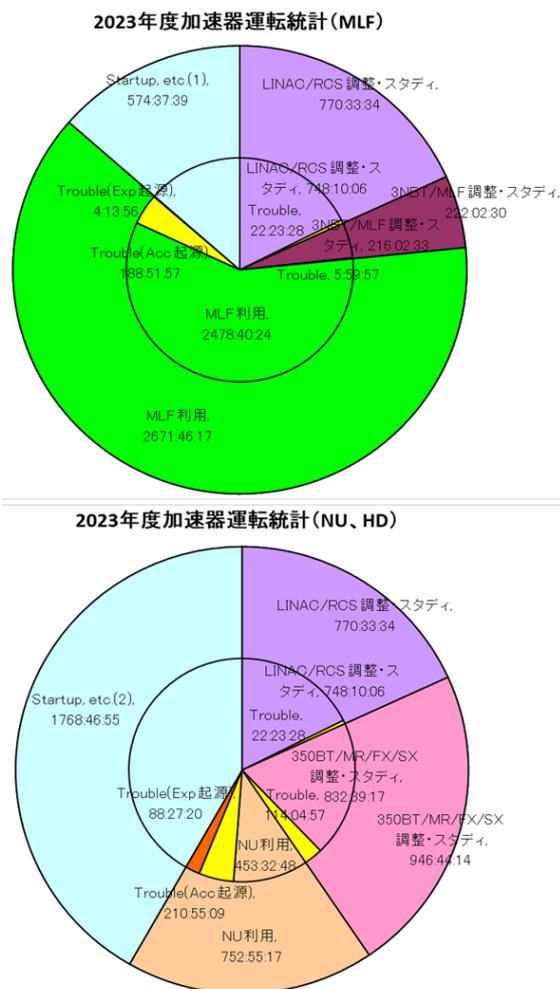


Figure 1: Operation statistics for the MLF (top) and for the NU and HD (bottom).

加速器機器のダウンタイムで次に長かったのは、RCS の冷却水設備の不具合によるものである (Fig. 2 には「Others」と表記)。このときは、冷却水設備の二次系 (加速器機器を直接冷却するのが一次系であり、二次系は一次系の水を冷却するための系統) のポンプが故障した。予備のポンプと交換する必要が生じ、交換にはクレーンなどの大型機器の手配が必要であったため、復旧作業に 4 日間程度を要した。

次に長かったのは、同じく RCS の RF 関連機器の不具合である (Fig. 2 には「RF」と表記)。この不具合は軽重含めて何度か発生したが、その中でも最も復旧に時間を要したのは RF 空洞終段増幅器内のコンデンサの破壊であった。これは、冷却水配管の継ぎ手部分から漏れた水がコンデンサ表面に付着し、そこで放電が生じて破壊されたものである。コンデンサ交換及び冷却水配管補修作業のためにビーム運転再開までに 18 時間程度を要した。

上記ほどの長時間ではないが、リニアックではクライストロン高圧電源 (Fig. 2 では「HVDC」と表記) の不具合で 34 時間ほど加速器が停止した。こちらも軽重含めて何度か発生したが、最も長かったのは ACS17 用 972MHz クライストロン交換作業であった。当クライストロンは、2024 年 2 月下旬に急にトリップレートが増加したため交換に至った。トリップは、電子銃のボディとアノード間の放電に起因するもので、経年劣化が原因と考えられる。

加速器機器ではないが、Neutrino で 129 時間のダウンタイムが発生した。これは、ニュートリノターゲットで使用しているヘリウム容器用ヘリウムコンプレッサの故障によるものである。本故障により当初計画していた 2023 年度の NU ビーム利用運転は、約 5 日間前倒しで終了することになった。

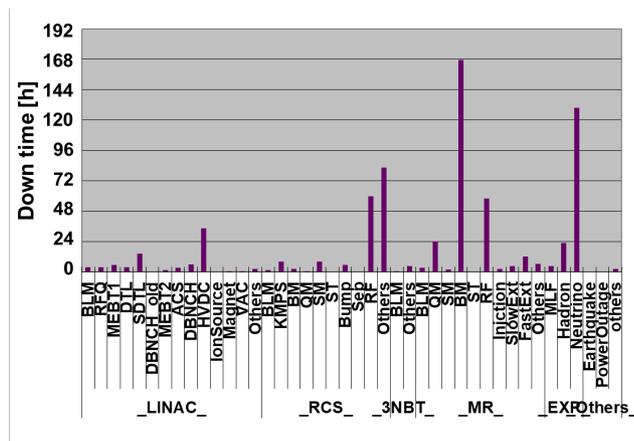


Figure 2: Downtime for each components.

2.2 2023 年 4 月から 2023 年 6 月までの運転状況

2023 年度は、4 月 16 日から MLF 利用運転と MR の NU 向けのビームチューニングをそれぞれ開始した。MLF 利用運転では、6 月 8 日まで 840 kW のビームパワーで運転を行っていたが、外気温が上昇し RCS の冷却水設備の冷却能力が不足したため、それ以降パワーを 700 kW に下げて運転することになった。

MR については、サイクルの繰り返し周期を 2.48 秒から 1.36 秒に短縮するために、2021 年度から約 2 年間かけて、主電磁石電源の増強、加速空洞の増設、加速シ

ステムの増強、入出射システムの増強およびコリメータシステムの増設など MR の大改造を行った。大改造後の運転再開初期には更新機器の初期故障が多発したが、4 月 16 日に 760 kW eq、30 GeV のビーム加速器に成功し、重要なマイルストーンの一つを達成した (Fig. 3) [1]。

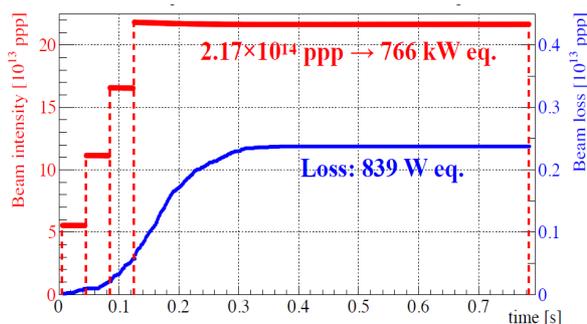


Figure 3: Beam intensity (red) and beam loss (blue) for the high intensity beam corresponding to over 750 kW equivalent beam power.

リニアックで現在稼働中の高周波 (RF) 駆動イオン源は、2014 年からのリニアックビーム電流増強開始から使用している。RF 駆動型イオン源の連続運転時間を律速するのはプラズマ生成室内で使用する RF アンテナの寿命と考えられ、RF イオン源使用開始当初はその寿命が未知数であったことから、イオン源を短期間で計画的に交換していた。運転実績を積みながら交換頻度を徐々に減らしていき、2022 年度の夏期メンテナンス後は、次回夏期メンテナンス (2023 年度) まで交換無しで運転することを試みた。その結果、2023 年 6 月 22 日まで一度も交換無しで運転することに成功し、連続運転時間はこれまでの記録を上回り 4,412 時間に達した (Fig. 4) [2]。これは、イオン源の高度化において重要なマイルストーンの一つを達成したことになる。

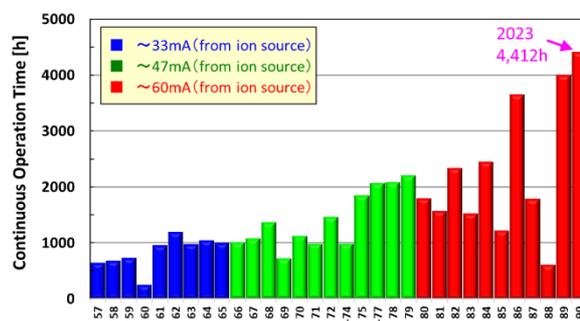


Figure 4: Operation history of the RF-driven ion source.

RCS ではこれまで、荷電変換フォイルに HBC (Hybrid type Boron-doped Carbon) フォイルを使用してきたが、最近では純炭素フォイルの開発を進めている [3]。Figure 5 に、ビーム照射中の HBC フォイルと純炭素フォイルの状態を示す。HBC フォイルでは大きな変形が生じている一方、純炭素フォイルでは、エッジがわずかに変形しているだけで元の形状を保っていることから、純炭素フォイルは HBC フォイルよりも変形が小さいと考えられる。両者の

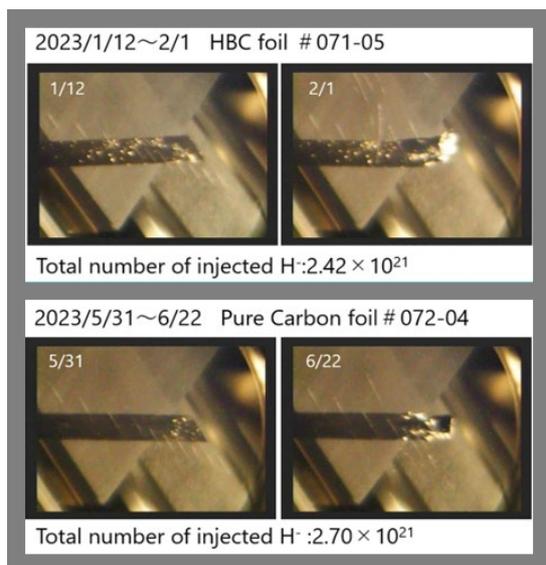


Figure 5: Comparison of the HBC foil (top) and pure carbon foil (bottom) under beam irradiation.

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。

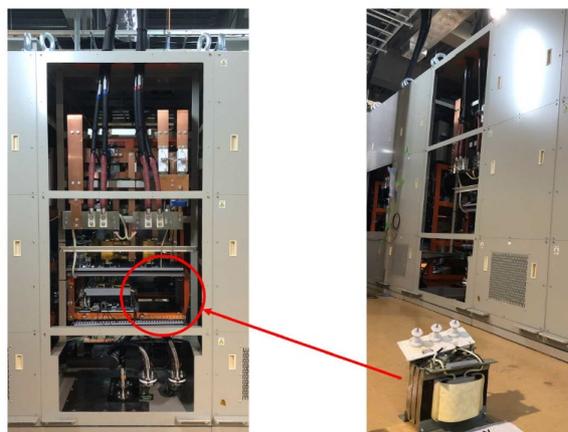


Figure 6: Location of the transformer in the power-supply panel (left) and the transformer (W 24 cm x H 24 cm x D 27 cm) removed from the power-supply panel (right).

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

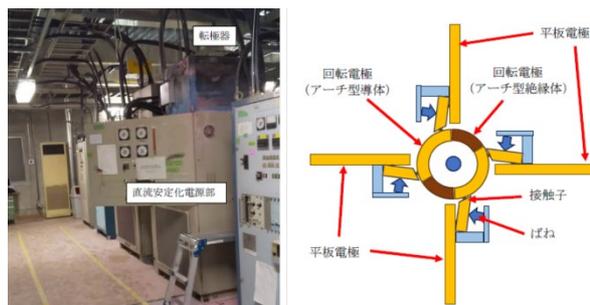


Figure 7: Location of the regulated DC power supply and the polarity-changer (left), and schematic diagram of the inside of the polarity-changer (right).

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。

リニアックにおいては、通常の保守作業の他に、SDTL15A 空洞の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空洞の内面洗浄[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空洞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空洞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空洞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、対象となる空洞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、作業による空洞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空洞の置き換え作業を実施した。RCSではRF空洞を新タイプに置き換える作業を2021年より行っている。新タイプの空洞(「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750kW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510kVにする予定であったが、検討の結果、460kVでもビームパワー750kW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1.3MWにビームパワーを達成するには、550kV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710kWを達成し、さらに12月25日には、所期目標であった750kWを超える760kW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1MW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80kW[10]、6月にNUにおいて800kW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。

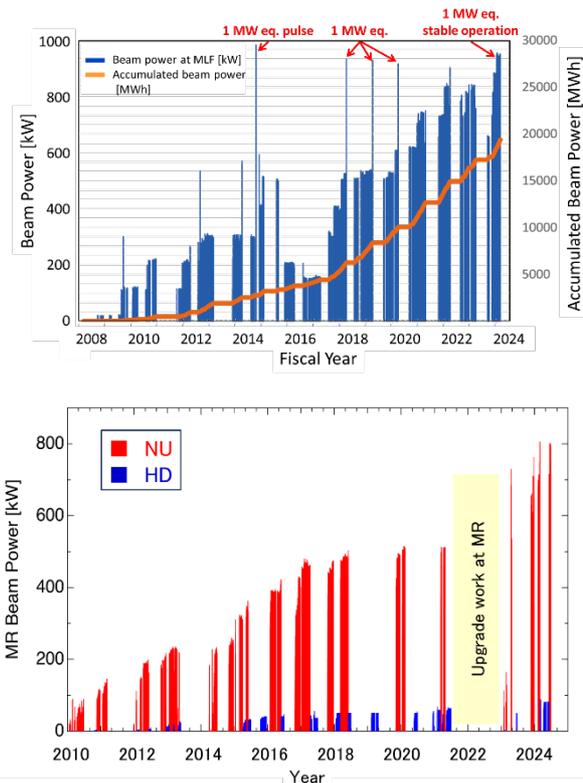


Figure 10: Beam power history at MLF (top), and NU and HD (bottom).

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760kW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.