

J-PARC 加速器の現状

STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

長谷川 和男^{#,A)}、金正 倫計^{A)}、小栗 英知^{A)}、山本 風海^{A)}、林 直樹^{A)}、山崎 良雄^{A)}、
内藤 富士雄^{B)}、吉井 正人^{B)}、山本 昇^{B)}、小関 忠^{B)}

Kazuo Hasegawa^{#,A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Naoki Hayashi^{A)},
Yoshio Yamazaki^{A)}, Fujio Naito^{B)}, Masahito Yoshii^{B)}, Noboru Yamamoto^{B)} and Tadashi Koseki^{B)}

^{A)} J-PARC Center, JAEA, ^{B)} J-PARC Center, KEK

Abstract

After the summer shutdown of 2017, the J-PARC restarted user operation in late October. The target of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) was replaced with a newly designed one in the summer shutdown. The beam power for MLF user operation was gradually increased from 300 kW to 500 kW, while it was limited to 150-200 kW before that. We have successfully demonstrated 1MW 1hour operation in July 2018. The beam power for the neutrino experimental facility (NU) was 440 kW to 470 kW. The beam was delivered to the hadron experimental facility (HD) from January to February, and June in 2018. The repetition rate of the main ring was shortened from 5.52 to 5.20 seconds, the beam power was increased from 44 to 50 kW. From March 2018, we delivered to the NU at 490 kW stably. In the fiscal year of 2017, the availabilities for the MLF, NU and HD were 93%, 89% and 66%, respectively.

1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring synchrotron)、RCS からの 3 GeV ビームを利用する物質生命科学実験施設 (MLF)、MR からの 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) から構成される。

2017 年夏季シャットダウン後、加速器の立ち上げや調整を経て、10 月下旬に MLF と NU の利用運転を再開した。前回の年会では、2017 年夏季シャットダウンまでの状況を報告[1]しており、ここでは、その後の進展や状況について報告する。

2. 運転状況

利用運転開始時からの MLF と、1年間の MR のビーム出力の履歴を Figure 1、および Figure 2 に示す。MLF では出力の累計も示しており、運転開始から約 6,500 MWh となる。MLF では、利用運転の出力を着実に向上し、2015 年 1 月には 1MW 相当(シングルショット)の加速を達成した。しかし 2015 年の 4 月と 11 月の 2 回、500 kW の利用運転時に中性子生成標的容器の不具合により停止し、その後、スペアの標的で 200-150 kW で利用運転を行ってきた。2017 年夏のメンテナンス期間に、新しい設計で製作した標的に交換し、標的の状況を確認しながら、11 月には 300kW、1月から 400kW、そして 4 月下旬から 500kW へ徐々に出力を上げてきた[2]。詳細は 2.3 に示すが、この入射器としてのリニアックと RCS は非常に安定に運転できている。MR でのビームパワーは、NU 向けの速い繰返し(Fast Extraction: FX)では、昨年は 470 kW であったのに対し、最大で 490kW(2.6 x10¹⁴ ppp)、また、HD 向けの遅い繰返し(Slow Extraction: SX)では、44 kW だったのが 50kW(5.4 x10¹³ ppp)で、多少で

はあるがビームパワーを向上させ、それぞれ利用運転に供してきた。

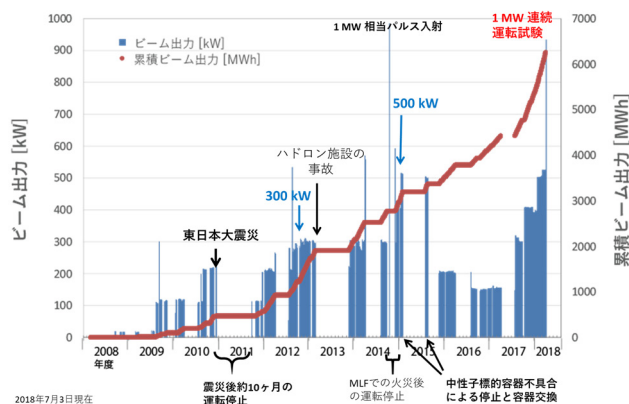


Figure 1: History of beam power and accumulated power for the MLF (by courtesy of the MLF).

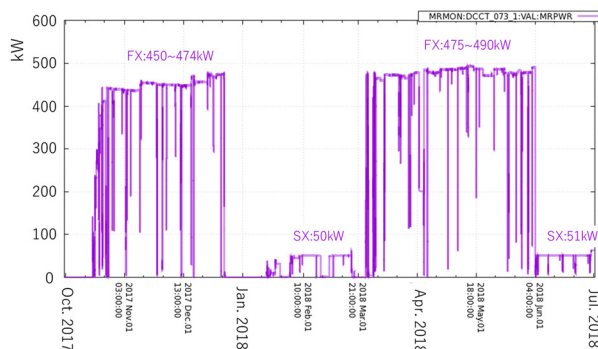


Figure 2: Beam power history for the Main Ring.

[#]hasegawa.kazuo@jaea.go.jp

2.1 2017年夏期停止期間での主な作業

リニアック

リニアックでは、2011年の震災以降、何台かのSDTL空洞で不安定な状態（定格の高周波電力付近で反射が大きくなる）となり、2015年から内部の拭き取り洗浄を行ってきた。この結果、高周波の反射が減るといった良好な結果を得た[3]。2017年もこの作業を継続し、3台のSDTL空洞の拭き取り洗浄を行った。Figure 3に、SDTL#5空洞（実際はタンクAとBの2空洞から構成される）のVSWRを示す。タンクBは安定であるが、タンクAは反射が高い領域があり、今回洗浄を行った結果、不安定な領域は消失したことがわかる。それまでは、不安定領域を避けるために、設計値より高いパワーを投入して運転していたが、設計値で運転できるようになり、空洞の放電頻度も抑えられ、安定な運転ができるようになった。

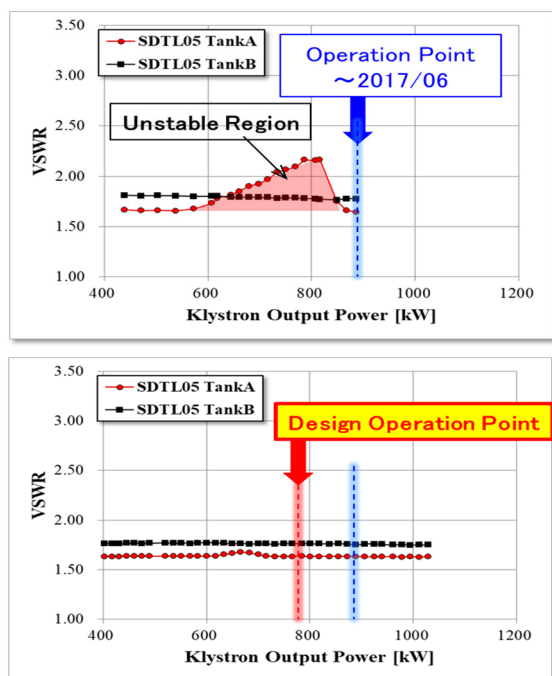


Figure 3: Voltage standing wave ratio for the SDTL#5 (Tank-A and B) cavities before (top) and after (bottom) the cleanup of the SDTL#05-tank-A cavity.

リニアックの数年来の課題が、数日～数週間にわたる運転に伴って、次第に加速空洞の冷却水流量が低下する現象であった。所定の流量以下に下がると、機器の保護のためにビームが停止し、トンネル内に入域し、流量の再調整が必要となる。そのために最低でも数時間の停止となり、稼働率を下げることになっていた。

1台の冷却水ポンプの流量を北行と南行の2つに大きく分岐し、さらにそれらが数多くの分岐を行うために、システムのバランスが崩れてくるのが要因の一つであった。それを解決するために、ポンプを増設

して北行と南行の2系統に分離した。また、増設するポンプもインバーター型とし、全体の流量の調整を容易にした[4]。

さらに機器側の対策として、特に細い流路での流量バランスが崩れやすいことから、Q磁石のコイル内面を、圧空と水を使って洗浄し、中にたまっていたスラッジの除去作業を行った。

これらの結果、各系統を流れる冷却水の流量が安定し、流量低下による停止はほとんどなくなった。

RCS

RCSでも通常の保守作業に加え、2016年4月に発生したコリメータの真空リークへの対応を行った。2016年夏期メンテナンス時には、第1段階として、固定式吸収体と遮蔽体から構成されるコリメータに交換した[1]。最終的なRCSの大出力化には、故障したものと同様に、可動式吸収体と遮蔽体からなるコリメータが必要であり、2017年夏に入れ替えを予定していた。しかし、取り付けの直前に、駆動コリメータ本体と真空容器を電気的になめらかに接続するための高周波コンタクトが破損していることが判明し、取り付けを2018年夏に延期することにした[5]。



Figure 4: A new collimator with movable blocks. The installation was postponed to summer 2018.

ビームパワーが向上してきたことから、RCSの真空粗排気に使っているドライスロールポンプから、微量ながらトリチウムが検出されるようになってきた。現時点では保守作業に支障が出るレベルではないが、今後、より強度が上がっていくことを見据え、常時負圧管理した保守専用のブースを製作し、準備を進めた。

メインリング(MR)

MRでは、ビーム増強計画の一環として、リングコリメータの配置換えを行った。それまでは5台のコリメータを使っており、4軸型のコリメータを更に2台追加する予定である。一番下流のコリメータには2軸型を使っており、下流に散乱ビームが漏れやすいことから、放射化がより厳しくなる前に、これを撤去して上流の4軸型のものを入れた(Figure 5)。今後、上流側に新規に製作したコリメータを据え付けてゆく予定である。



Figure 5: Collimators (in red) after the rearrangement.

これまでのMRでMPSの発報事象が発生すると、入射中や加速途中であっても、アポートは加速終了まで待つ必要があった。このため、例えば、加速途中で発報した場合、ビームがロスすることもあった。そこで2017年夏に、FXキッカ電源の改造、MPSの機能追加、トリガー回路の追加実装などを行い、加速エネルギーに追従してキックアポートできるように改良した。この結果、加速途中でもビームをダンプに蹴り出すことができ、ロスの低減を図ることができた[6]。

4月に故障した静電セプタム(ESS)によって、2017年6月の運転では1台体制で運転することになったが、夏のメンテナンス期間にチタン製[7]のものを据え付け2018年1~2月と6月のSXの利用運転を行った[8]。

2.2 2017年秋から2018年3月までの運転経過

夏期停止後、10月下旬からの利用運転に向け上流部からビーム調整を開始した。リニアックは10月2日、RCSは10月11日、MRは10月15日からビーム調整を開始した。ビームによる真空脱ガスを促進するために10月17日からNUへの供給を165kWで開始した。10月23日には440kWまで上がったが、真空度の低下に時間を要し、12月によりやく470kWまで増加することができた。

MLFは、新しい標的に交換が終了し、10月24日から調整運転を開始した。まずは、夏前の出力に近い約150kWで開始したが、10月26日に300kWに増やした。

12月22日朝までMLFとNUの利用運転を行い、その後加速器スタディを12月27日の朝まで行い、年末の停止に入った。

年末年始の保守停止後、1月7日にビーム調整を開始した。MLFの出力増強に向けた調整などを行い、1月10日にはMLFの利用運転を400kWに増加して開始し、3月末まで大きな故障もなく利用運転を行った。

一方、MRのビーム調整は1月13日に開始し、1月17日にハドロン利用運転を10.5kWで開始した。その後、利用運転の間にSXの調整を行った。1月24日には、SXの周期を5.52秒から5.20秒に短縮し、パルス当たりの粒子数が同じでも、単位時間あたりのビームパワーを約6%増やせるようにした。26日は44kWまで増加し、さらに調整を進めて1月31日からは51kWで2月26日まで利用運転を行った。その間、COMET(ミュオン電子変換)実験の準備として、8GeVの遅い取り出し

にも成功した[9]。

2.3 2017年度の運転時間、稼働率、停止要因

2017年度(2017年4月1日から2018年3月31日まで)の運転統計をTable 1及びFigure 6に示す。総運転時間6,448時間(加速器の立ち上げや調整等も含む)。Figure 6の各円グラフの総合計時間に当たる)中のユーザへの供給時間は、MLFは4,249時間で施設の利用時間に対する稼働率93%、NUは1,757時間で89%、HDは1,055時間で66%であった。

Table 1: Operation Time Summary in JFY2017

Facility	User time (hours)	Trouble, Acc. only (hours)	Trouble, Fac. only (hours)	Net time, (hours)	Availability, Total (%)
MLF	4,555	270 (5.9%)	35 (0.8%)	4,249	93.3
Neutrino (FX)	1,978	185 (9.4%)	35 (1.8%)	1,757	88.8
Hadron (SX)	1,601	506 (31.6%)	39 (2.4%)	1,055	65.9

機器ごとのダウンタイムをFigure 7に示す。リニアックは冷却水の流量低下への対応やクライストロン電源の放電対策などを行ったことで、前年度より相当に安定になったが、HVDCに分類される高圧ケーブルの絶縁劣化、バイアス電源故障、寿命に近づいたクライストロンの放電、などが主な原因となった。また、Others(Li)は、冷却水ポンプの振動増加による停止、制御システムやタイミングシステムの故障の影響を受けた停止によるものであった。

RCSは前年度と同様、全体的に安定であった。

MR(SlowExt)は、2017年4月に起きたESS故障、その他遅い取り出し機器関連の故障・停止の影響が顕著で、HDの稼働率を下げてしまった。また、MR(Others)はタイミングモジュールの故障などであった。前年度、高繰返しを目指した新しい電源システムの初期故障やノイズに伴う停止の影響が大きかったが、原因を調査して対処した結果、故障やトラブルの発生は大幅に抑えることができた。

2.4 2018年度(2018年4月~6月)の運転状況

年度切り替えに近い4月2日のメンテナンス日を境にRun番号を#78から#79に更新したが、実質的には利用運転は(メンテナンスでの停止を除き)継続した。

MRでは、真空度の向上とともに、調整を進めて、4月頭にはNUに480kW前後で供給できるようになり、5月末まで、最大494kWで供給した。5月31日の1日メンテナンスを利用してFXからSXへの切り替えを行い、51kWでHDにビームを供給し、6月29日に無事利用運転を終了した。

MLFでは、4月19日に400kWから500kWに出力を上げ、長時間停止するような故障やトラブルはなく6月29日まで、93%の高い稼働率で利用運転を終了した、

その後、加速器のビーム調整を行い、7月3日に、MLFの1MWの1時間連続試験に成功し、7月4日に夏季メンテナンス期間に入った。

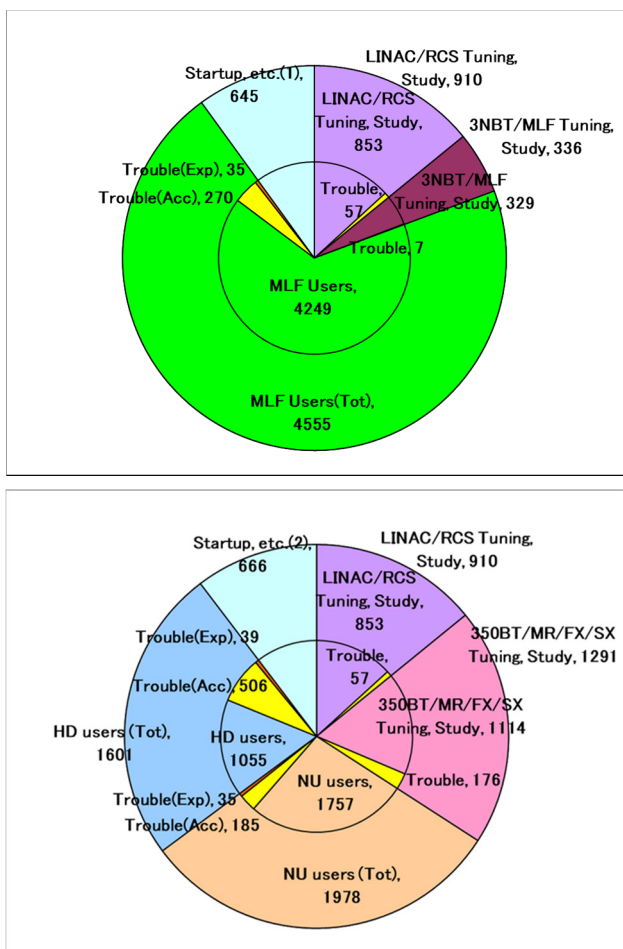


Figure 6: Operation statistics for the MLF (top) and for the MR (bottom) users in JFY 2017.

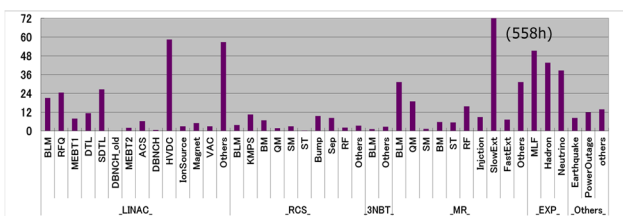


Figure 7: Downtime statistics in hours by components in JFY 2017.

3. まとめ

2017年度後半と2018年度6月までの運転では、MLF向けは、新しい設計の標的に交換した後、着実にビームパワーを向上し、現時点では500kWと、最終目標である1 MWの約半分であるが、長時間の停止に至る故障やトラブルは無く、93%程度の稼働率を達成した。また、1 MWの条件で1時間の連続運転に成功し、標的や加速器で得られたデータを精査し、今後、出力を向上した利用運転につなげてゆく予定である。

リニアックのピーク電流は、定格の50mAに対して現在は40mAであるが、イオン源は、連続3か月の利用運転に供しており、その経験も3回まで積んできた[10]。

MR-FXではビームパワーを徐々に向上してきた[11]が、MRとNU実験施設での停止要因を合わせると、2017年度での稼働率は90%を若干切ってしまった。稼働率の向上は両施設の課題であり、一つ一つ原因を究明し解決してきたことで、徐々に改善してきているが、運転維持費が十分確保できないことが課題となっている。

MF-SXでは、2017年4月のESSのトラブルにより、当初予定していた約2ヶ月半の運転が、1ヶ月ほど短縮された。しかし、2018年1月から2月の利用運転で挽回し、ビーム出力も、ESSを2台体制として51kWを連続的に供給できるようになった。

J-PARC加速器は、運転を開始してから10年近く経過し、タイミングや制御系、冷却水設備や電源などで更新時期に近づいてきており、これらの故障での停止も目立ってきた。また、屋外のトランスやコンデンサは、太平洋に近く塩害による腐食も進んでおり、RCSやMRでは大きな課題となっている。

2018年夏のメンテナンスでは、稼働率の更なる向上をめざし、リニアックでは、RFQの真空改善のためのマニホールドの設置、冷却水流量低下の改善のためのインバータポンプ化、熱交換器の交換など、RCSでは、延期した可動式吸収体を持つコリメータの据付、などを実施している。

MRでは、繰り返しを速くして大強度化を目指す[12]ための対応として、コンデンサを用いたエネルギー貯蔵型の主電磁石電源の調整を開始するところである[13]。

こうした夏季のメンテナンスや性能向上の作業の後、各機器を立ち上げ、10月半ばからの利用運転再開に備える予定である。

謝辞

本報告は、各加速器施設の責任者や加速器セクションリーダーが代表として行っているが、J-PARC加速器の運転や性能向上は、当然、多くの方々に支えられており、ここに感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, "Status of J-PARC Accelerators", PASJ2017, pp. 1317-1321, FSP002, 2017.
- [2] E. Wakai *et al.*, "Improvement of fabrication technologies and the design of spallation mercury target vessel for high-intensity operation", in these proceedings, FROM01.
- [3] T. Ito *et al.*, "Multipactor Problem of J-PARC SDTL", Proc. of IPAC2017, pp.4184-4186, Copenhagen, Denmark, THPIK039, 2017.
- [4] K. Suganuma *et al.*, "Present status of water cooling system at J-PARC LINAC 2018", in these proceedings, WEP012.
- [5] K. Okabe *et al.*, "An improvement of the beam collimator system in the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron", in these proceedings, WEP017.
- [6] T. Kimura *et al.*, "Development of a ms-abort System via J-PARC MR-MPS", in these proceedings, WEP099.
- [7] Y. Arakaki *et al.*, "An improvement and high voltage test of Titanium-ESS in J-PARC MR", in these proceedings,

WEP018.

- [8] R. Muto *et al.*, “Beam commissioning of slow extraction at J-PARC Main Ring”, in these proceedings, WEP011.
- [9] M. Tomizawa *et al.*, “8 GeV-slow extraction test for muon to electron conversion search experiment”, in these proceedings, FROL13.
- [10] K. Ohkoshi *et al.*, “Operation status of the J-PARC H- ion source”, in these proceedings, THP041.
- [11] S. Igarashi *et al.*, “Study on the beam intensity upgrade of J-PARC MR”, in these proceedings, THP014.
- [12] D. Naito *et al.*, “Performance estimation of a new power supply with high repetition rate operation in J-PARC MR”, in these proceedings, WEP065.
- [13] T. Shimokawa *et al.*, “Status of new power supply for bending magnet in J-PARC Main Ring upgrade”, in these proceedings, THP067.