

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)}、堀 洋一郎^{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)}, Yoichiro Hori^{B)}, Noboru Yamamoto^{B)} and Tadashi Koseki^{B)}

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

Abstract

After the summer shutdown in 2016, the J-PARC restarted user operation late in October for the neutrino experiments (NU) and early in November for the materials and life science experimental facility (MLF). The beam power for the NU was 420 kW in May 2016, but increased to 470 kW in February 2017 thanks to the change and optimization of operation parameters. For the hadron experimental facility (HD), we started beam tuning in April 2017, but suspended by a failure of the electro static septum. After the treatment, we delivered beam at the power of 37 kW. We delivered beam at 150 kW for the MLF. In the fiscal year of 2016, the linac, the 3 GeV synchrotron (RCS) and the MLF were stable and the availability was high at 93 %. On the contrary, the main ring had several failures and the availabilities were 77% and 84% for NU and HD, 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。

2016 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 NU、11 月上旬に MLF の利用運転を再開した。前回の年会では、2016 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

MLF と MR の利用運転開始時から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 4,500 MWh となる。いずれにも、2011 年 3 月に起きた東日本大震災と、2013 年 5 月に起きたハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故による計画外の長期停止の部分を示している。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) の加速を達成したが、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いる。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 でのビームパワーも着実に向上してきており、NU 向けの速い繰返し (Fast Extraction: FX) では最大 470 kW (2.4×10^{14} ppp)、また、HD 向けの遅い繰返し (Slow Extraction: SX) では、最大 44 kW (5.1×10^{13} ppp) で、それぞれ利用運転に供してきた。

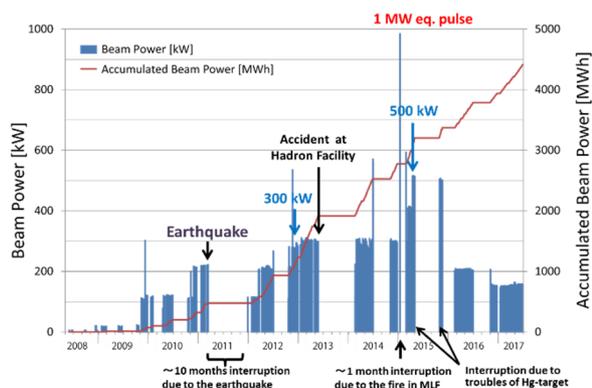


Figure 1: History of beam power and accumulated power for the MLF (by courtesy of the MLF).

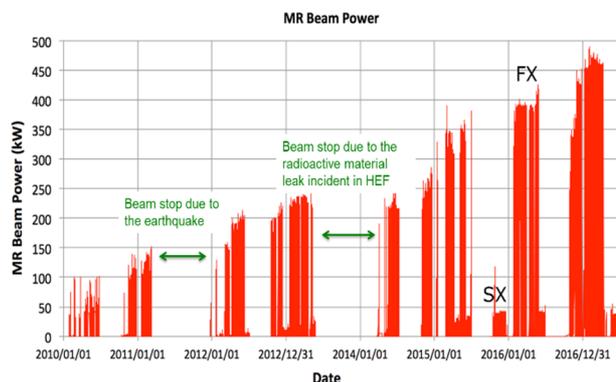


Figure 2: Beam power history for the Main Ring.

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

2.1 2016年夏期停止期間での主な作業

リニアックでは、昨年も報告した通り、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）となった。これは、ベローズが破損し清浄でない空気が空洞内に入ったためと推測しており、2015年の夏季停止期間に試験的に1台（SDTL#05B）の内部の拭き取り洗浄を行ったところ、反射が減るという良好な結果を得た[1]。これを受けて、同様に不安定なSDTLの05A, 06A, 06Bの3台の拭き取り洗浄作業を行った。その結果、05Aには多少不安定領域は残ったものの運転上は支障がなく、また、残りの空洞はほぼ完全に不安定領域が消失する良好な結果を得た[2]。これらの結果と経験から、2017年夏にも実施することにした。

リニアックでの2016年夏の大きな作業の一つが、RFQとDTLの間のマッチングセクション（Medium Energy Beam Transport-1: MEBT-1）に設置しているビームチョッパー部の改造であった。Figure 3に改造後の写真と、改造の概念を示す。それまでには、1台の高周波源で2台のチョッパー空洞を直列に励振しており、高周波のリングングで中間パルスの先頭に「切れ」が十分でない部分が発生していた。これを解決するために、高周波源を1台増設し、空洞毎に励振する方式に変更した。この結果リングングは消失し、良好にビームが切れるチョッピング特性を得ることができた[3]。

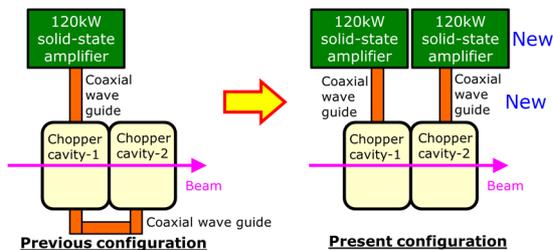
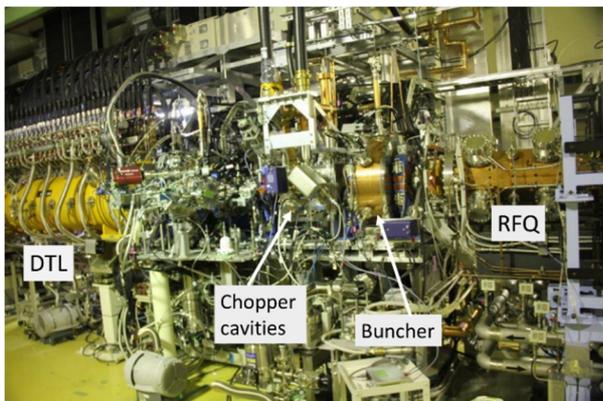


Figure 3: Photograph of the MEBT-1 (top) and scheme of the chopper system improvement (bottom). There are two chopper cavities in the center. In the photo, two black coaxial RF feeder lines from the top are shown for individual driving.

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。事象発生時は、早期の復旧を目指してリークしたコリメータを撤去して直管ダクトに交換して運転してきたが、2016年夏期メンテナンス時には、放射化による線量を抑制するために、Figure 4に示す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。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る。このため、真空リークを起こした原因の究明を行い、その結果を反映した改良機を製作することになっている[4]。

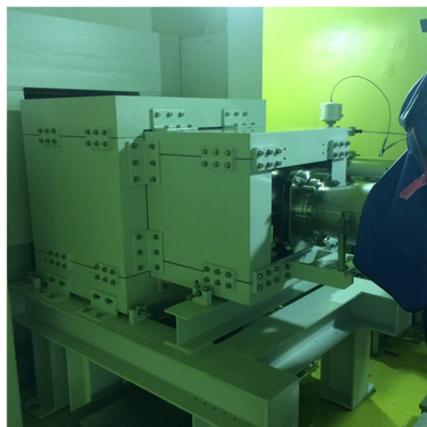


Figure 4: A fixed collimator with shield blocks installed in summer 2016.

RCSでは、ビーム出射に用いているパルススキッカがインピーダンスソースとなり、チューンやクロマティシティ等のパラメータに依存してビーム不安定性を起こす要因の一つとなっていた。加速初期から中盤のエミッタンス増大を低減するパラメータを選択すると、加速後半にビーム不安定性をエンハンスしてしまうことが観測されていた。そこで解決策として、2016年夏の作業で6極電磁石電源をバイポーラ化した。この結果、加速後半で逆極性とすることで不安定性を抑制し、加速初期から終盤まで安定に加速できる条件を見出すことができた[5]。

MRでは、高繰返し化によるビーム増強計画の一環として、従来の金属磁性体（FT3M）より高い加速勾配を可能とするFT3Lを使った空洞に、2014年夏から3年計画で入れ替えを行ってきた。2016年夏には全RF空洞の入れ替えが計画通りに完了し、2016年秋から新RFシステムで運転を行っている。その結果、共振周波数の多少の減少傾向が見られるものの、損傷等の兆候もなく安定に加速運転に使用されている[6]。

Table 1: Status and Plan of MR-RF Cavities

	2016	2017	2018	2019
Events				MR 1.3-sec operation
New FT3L Cavities	7	7	7	8
2 nd harmonic cavity(FT3L)	2	2	2	1
2 nd harmonic cavity(FT3M)	0	0	0	2
Operating voltage	300-390 kV	300-390 kV	300-390 kV	546 kV (448 kV)
(2 nd Harmonic)	110 kV	110 kV	110 kV	< 130 kV

2.2 2016年秋から2017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3日、RCSは10月18日、MRは10月24日からビーム調整を開始した。当初、10月28日からNU利用であったが、NUに供給しながらビームによる真空脱ガスを促進するために10月27日に開始を前倒した。

MLFは、11月1日から調整運転を開始し、変更に伴う施設検査を受検した後、11月7日から利用運転を開始した。このときの出力は155kWである。このパワーは、標的のピッチング損傷を避けるためのレベルとして設定された。通常の運転ではRCSは2バンチであるが、標的に許されたパワーの範囲でも、ユーザがより成果を出しやすいビームとして、時間的に短い1バンチで供給することにした。TOFで高い時間分解能を要する実験や、ミュオン実験のユーザから歓迎されている。一方で、本来加速するもう1バンチのビームは、RFQの下流のスクレーパーに捨てており、その部分の熱負荷が高くなることから、温度や損傷の監視を行いながら運転を行っている。

MLFは12月21日の朝まで、NUは12月26日の朝まで利用運転を行い、その後加速器スタディを12月28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6日にビーム運転を開始した。ここでは、速やかに利用運転に移行することとして、1月8日にはNU(450kW)、13日にMLF(146kW)の利用運転を開始した。加速器は順調に運転していたが、1月19日にNU実験施設のヘリウムコンプレッサーの故障によりNU利用運転は停止した。これが復旧したのは2月3日であった。その間、MLFの利用運転を継続するとともに、MRではスタディを行い、より最適なパラメータを探索したことで、復帰後は470kWの利用運転が可能となった。

2.3 2016年度の運転時間、稼働率、停止要因

2016年度(前年度で締めた2016年4月4日から、2017年3月31日24時まで)の運転統計をTable 2及びFigure 5に示す。総運転時間6,271時間(加速器の立ち上げや調整等も含む。Figure 5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3,483時間で施設の利用時間に対する稼働率93%、NUは2,726時間で77%、HDは515時間で84%であった。

Table 2: Operation Time Summary in JFY2016

Facility	User time (hours)	Trouble, Acc. only (hours)	Trouble, Fac. only (hours)	Net time, (hours)	Availability, Total (%)
MLF	3,743	257	2	3,483	93.1
Neutrino (FX)	3,532	570 (稼働率低下への寄与16%)	235 (稼働率低下への寄与7%)	2,726	77.2%
Hadron (SX)	612	92	4	515	84.1

機器ごとのダウンタイムをFigure 6に示す。リニアックは昨年度より相当に安定になったが、高圧電源(HVDC)や冷却水システムに懸念が残っている。特に、トンネル

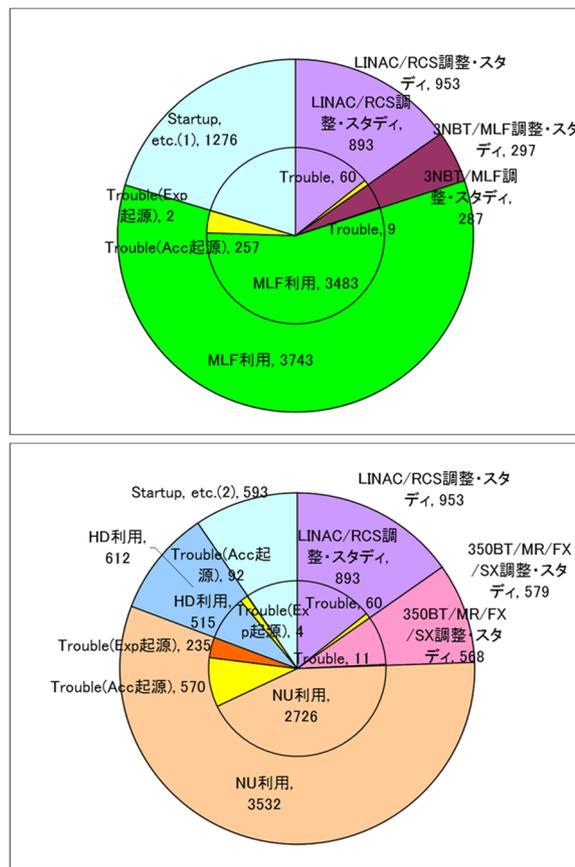


Figure 5: Operation statistics for the MLF (top) and for the MR (bottom) users.

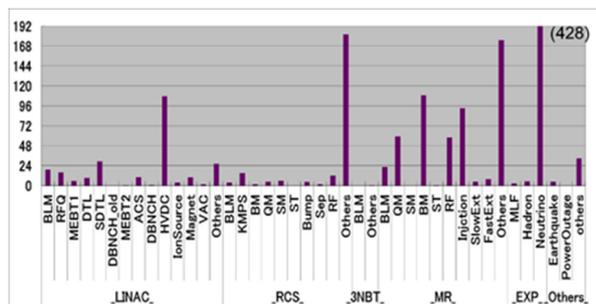


Figure 6: Downtime statistics in hours by components in JFY 2016.

内機器での冷却水流量の低下が発生しており、これが課題であった。毎週計画的に予定されているメンテナンス日にトンネルに入域し、機器の流量を調整しているが、流量の減少がメンテナンス日まで持たずに計画外で調整することも何度か発生した。1回の調整に数時間を要しているため、これを解決することが稼働率の確保に必要であった。そこで、ポンプの追加設置による系統の分離や、冷却水の入れ替えなどで汚濁を低減した結果、より安定な流量を確保することができるようになった[7]。

RCSは、「Others」に仕分けたコリメータの真空リーク事象で数日間停止したのを除けば、全体的に安定であった。

MRは何回か数日にわたる停止があった。「BM」は昨

年も報告した[1]が、3月の偏向磁石の故障によるもので、復帰は4月8日であったことから2016年度の停止時間の分を計上している。「Others」の大きなファクターは、5月3日に起きた屋外の電磁石電源用トランスへ小動物とみられる物体の侵入であり、その対応に約6日を要したものであった。「Injection」の主なものは、新セプタム電磁石電源のノイズによる故障[8]によるもので、こうした高繰返しを目指した新しいシステムの初期故障が特徴的で、その対処後の稼働率は改善している。

一方実験施設側では、MLFやHDは非常に安定であった一方、NUでは稼働率低下の要因として7%と高い寄与があった。その大きなものは、前述のヘリウムコンプレッサの故障であった。

2.4 2017年度(2017年4月~6月)の運転状況

年度切り替えに近い3月30日のメンテナンス日を境にRun番号を#73から#74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、4月12日の半日メンテナンス日を利用してFXからSXへの切り替えを行い、調整の結果、44kWでHDにビームを供給することができた。Run#74の運転は予定通り4月19日の朝に終了し、夏までの運転に備えてイオン源の交換を行い、リニアックとRCSのスタディの後、4月26日夜からMLFとMR(SX)への供給を予定していた。

MLFへは予定通りに利用運転を再開したものの、MRでは立ち上げ調整中に大きなビームロスが発生し、その直後、2台ある静電セプタムの内の上流側(ESS1)に高圧が印加できなくなる事象が発生した。翌日内部を確認したところ、リボン6本が断線し、うち1本の端部が対向する電極に接触していた。Figure 7にESS1の内部写真を示す。リボンはU字型の電極の端部に垂直方向に張られているが、何本かが断線し垂れている様子が見える。

この対応として、つくばで調整していたチタン製(放射化を抑制するため)の静電セプタム(Ti-ESS)を東海に搬送し、立ち上げることにしたが、暗電流が増加して定格の電圧まで印加できなかった。そこで下流のESS2を使って一台で運転することに決定した。ESS2をESS1の位置に移動し、高圧の印加試験などの後、5月24日にビーム調整を開始し、6月1日からHDの利用運転を37kWで再開した。

原因として、ESSに軌道を寄せるバンパ軌道確認中にビーム不安定性が生じてビームサイズが増大し、ビームコアがリボンをヒットしたと推測している。再発防止として、ビーム不安定性を防ぐため、バンパ起動の調整は低電流で、かつ、不安定性が起きにくい条件で行うとともに、軌道確認後にバンパ軌道をすぐに立ち下げるといった対策をとることとした。さらにハード的には、切れたリボンが対向する電極に接触することを避けるためのバッフルの設置、断線を検知するための金属ロッドの設置を検討している。

一方MLF向けでは、150kWのシングルバンチ運転を継続し、長時間停止するような故障やトラブルはなく、93%という高い稼働率で7月2日朝に利用運転を終了した。



Figure 7: Inside view of the ESS1.

3. まとめ

2016年度と2017年度6月までの運転では、MLF向けはビームパワーが最終目標である1MWより低い(150~200kW)ものの、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。

更に、2017年4月19日から7月6日までのRun#75は、J-PARCが運転を開始して以来、最長の77日間であり、イオン源も途中で交換なしで連続運転時間の記録を更新した[9]。リニアックのピーク電流が、定格の50mAに対して現在は40mAであることから、電流増加時の寿命の経験を積む必要があるが、3ヶ月の連続運転が視野に入る成果が得られた。

MR-FXではビームパワーを着実に向上してきたが、MRとNU実験施設での故障により、年度での稼働率は80%を切ってしまった。稼働率の向上は両施設の課題であるが、一つ一つ原因を究明し解決してきたことで、最近の稼働率は改善してきている。

MF-SXでは、2016年6月の利用運転はTable 2に示したように84%の稼働率であったが、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。ビーム出力も50kW近くを予定していたが、ESSが1台となったことで37kWに減少することになった。夏季メンテナンス期間での対応で復帰することを目指している。

J-PARC加速器は、運転を開始してから10年近く経過してきており、タイミングや制御系、リニアックの電源などで更新時期に近づいてきているものもある。2017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、SDTL空洞の内部洗浄、クライストロン電源のバイアス電源の更新、冷却水流量低下の改善など、RCSでは、新たな可動式吸収体を持つコリメータの据付、放射化したスクロールポンプの専用保守設備の増設などを実施している。

MRでは、繰返しを速くして大強度化を目指すための対応を行っている。前述のFT3Lを用いたRF空洞もその一つであるが、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開発や製作[10,11]が重要なポイント

トになる。

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ッ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”, PASJ2016, pp. 1409-1412, FSP028, 2016.
- [2] T. Ito *et al.*, “Multipactor Problem of J-PARC SDTL”, Proc. of IPAC2017, pp.4184-4186, Copenhagen, Denmark, THPIK039, 2017.
- [3] Y. Liu *et al.*, “Progresses of J-PARC Linac Commissioning”, in these proceedings, WEP029.
- [4] K. Okabe *et al.*, “A Failure Investigation of the Beam Collimator System in the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron”, in these proceedings, WEP021.
- [5] H. Hotchi *et al.*, “Recent Progress of J-PARC RCS Beam Commissioning: Efforts for Realizing a High-Intensity Low Emittance Beam”, in these proceedings, WEOL04.
- [6] K. Hasegawa *et al.*, “Status Report of the RF Cavity with FT3L MA Cores and Development of a Vacuum Capacitor”, in these proceedings, WEP040.
- [7] K. Sukanuma *et al.*, “Present Status of Water Cooling System at J-PARC Linac 2017”, in these proceedings, WEP025.
- [8] T. Shibata *et al.*, “The Development of New Injection Septum Magnet for Upgrading of J-PARC MR(3)”, in these proceedings, TUOM06.
- [9] K. Ohkoshi *et al.*, “Operation Status of the J-PARC H- Ion Source”, in these proceedings, TUP106.
- [10] T. Shimokawa *et al.*, “First New Power Supply of Main Magnet for J-PARC Main Ring Upgrade”, in these proceedings, TUOM07.
- [11] Y. Morita *et al.*, “Development of Capacitor Bank of J-PARC MR Main Magnet Power Supply for High Repetition Rate Operation”, in these proceedings, WEP076.