

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)}、内藤 富士雄^{B)}
Kazuo Hasegawa^{#,A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)} and Fujio Naito^{B)}

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

Abstract

After the summer maintenance in 2015, user operation for the hadron experimental facility (HD) and the life science experimental facility (MLF) was resumed in the middle of October after the tuning of accelerator at J-PARC. In December, we reduced the repetition cycle from 6.0 seconds to 5.52 seconds at the main ring (MR) and therefore, we have improved beam power to 42 kW, while it was 24 kW in April. The peak beam current at the linac by December 2015 was 30 mA, but we have increased to 40mA in January, and the tuning was followed by the 3GeV synchrotron (RCS) and the MR for user operation condition. As a result, we improved a beam power to the neutrino experimental facility (NU) to 390 kW by the tuning while it was ranged 300 to 330 kW at 30mA. User program was performed at 500kW at the MLF, but it was suspended by a defect of a target in November. It was replaced for a spare one and resumed at 200 kW in February. We have several faults to stop beam operations: ventilation system at the linac by a leakage current, a vacuum leak at the RCS collimator, a breakdown of bending magnet of the MR, etc.

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。

2015 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 月中旬に HD および MLF の利用運転を再開した。HD では、MR の繰り返し周期を短縮するとともに、調整を進めて 12 月には 42kW のビームパワー (4 月の運転開始時は 24kW) まで向上した。1 月からは、利用運転時のリニアックのピーク電流を 30mA から 40mA に向上して更なる大強度化に対応し、2 月には NU の利用運転を 330-360kW (30mA 時は 300-330kW) で開始し、その後の MR の調整により最大で 425kW まで向上した。MLF は 500kW で利用運転を行っていたが、11 月に標的の不具合により運転を停止し、予備の標的に交換して 2 月に利用運転を約 200kW で再開した。2015 年秋以降、主な加速器の不具合として、漏電によるリニアックの換気システムの停止、RCS のコリメータ部での真空リーク、MR の偏向電磁石の故障などがあった。ここでは、こうした運転の経過や不具合について報告する。

2. 運転状況

前回の年会では、2015 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。MLF の利用運転開始時からのビーム出力と累積出力の経過を Figure 1、MR の 2015 年 10 月から 2016 年 6 月までの出力履歴を Figure 2 に示す。

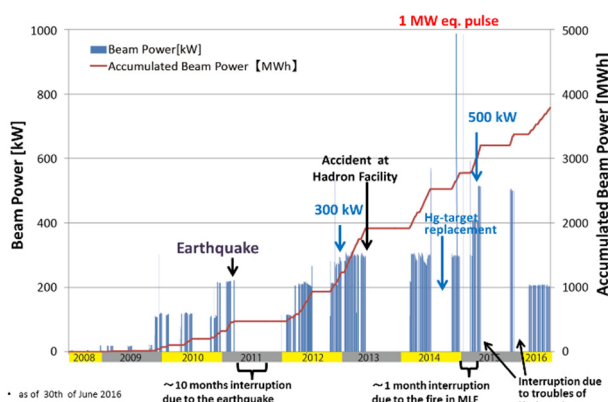


Figure 1: History of beam power and accumulated power for the MLF (by courtesy of the MLF).

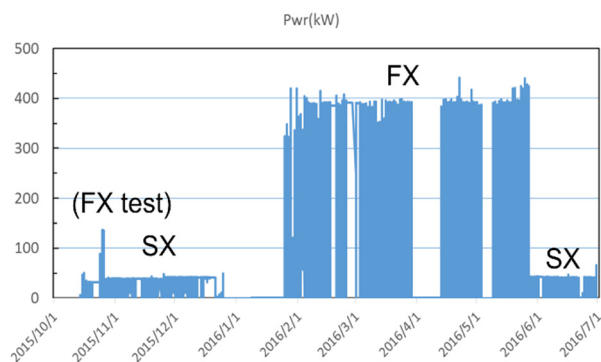


Figure 2: Beam power history for the Main Ring.

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

2.1 2015年夏から2016年3月までの運転経過

2015年の夏季停止期間中、通常の保守・点検作業に加え、リニアックでは、定格の運転電圧で放電しやすかったSDTL型加速空洞の1台(SDTL#5B)内部の拭き取り洗浄を行った。これは、2011年の震災以降に顕在化した状況で、空洞を接続しているベローズが破損して清浄でない空気が空洞内に入ったためと推測している。コンディショニングによって多少の改善は見られ、その状況で数年間は運転してきたが、次第に悪化する傾向が見られたため、試験的に1台を行って見たものである。Figure 3に内部写真を示すが、虹色の帯状の変色が内壁に何本か見られる。拭き取りではこうした変色を取ることはできなかったが、内面に付着したゴミなどを除去することができた。この作業の結果、不安定な領域がなくなり性能の回復が見られたため、2016年の夏には、同様の症状が見られる他の3台の空洞にも適用することにした。

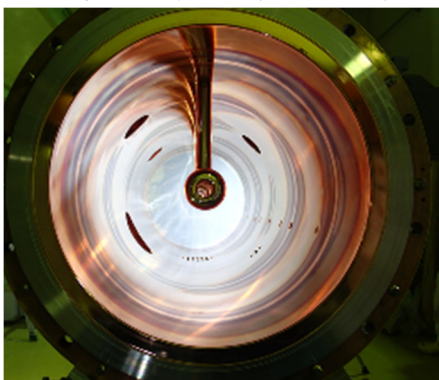


Figure 3: Inside view of the SDTL#5B cavity. Many discolored bands can be seen.

RCSでも通常の保守作業に加え、大強度のビームをより安定に加速できるよう、加速空洞のための電源を増強したり、入射時の電流平坦度を改善させるためのシフトポンプ電源の改修[2]など、性能を向上させるための作業も実施した。

MRでは、ハドロン実験施設に向けた遅い取り出しでの加速時間短縮の検討と試験を行った。この結果、繰り返し周期を6秒から5.52秒に短縮する目的があった。このときの電磁石の励磁パターンをFigure 4に示す。繰り返しが若干速くなる分ビームパワーの増強が期待され、HDの利用運転はこの条件で行うことにした。

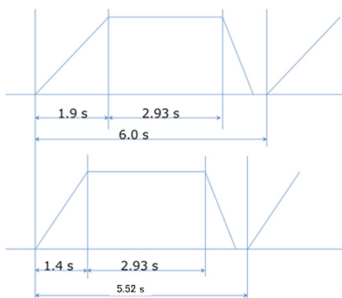


Figure 4: Ramping patterns of the magnet current for the MR-SX. Patterns of 6 seconds cycle by June 2015 (top) and 5.52 seconds cycle from October 2015 (bottom).

10月中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9月29日、RCSは10月9日、MRは10月14日からビーム試験を開始し、10月15日夜からHDの利用運転(ビーム出力35kW程度)を開始した。その後MLFのターゲットが利用可能となった10月15日からRCSの1MWの大強度試験を行った[3]。

一方、10月22日の夜、加速器調整中にリニアック中間トンネル排気系統の遮断器が漏電検知でトリップした。中間トンネルには上流と下流の2系統の排気系があり、下流側のみトリップであったため負圧は担保されていることが確認できた。絶縁測定等の調査を行ったが異常は確認できず、漏えい電流の監視をしつつ運転再開したが、10月24日以降は発生せず、根本的な原因の断定には至っていない。

MLFは10月27日に利用運転を開始(出力500kW)したが、11月2日、RCSのビームロスモニタで停止した。調査の結果、ビーム量が1発だけ通常より増加していることが確認された。原因は、リニアックでビームをOn/Offしているチョッパのゲート信号が抜けたためと判明した。不調となった回路モジュールを交換した後は再発していないが、電流モニタの積分値でビーム量をリミットし、過大なビーム量がリニアックからRCSへ入射しないような対策を施した。

MLF向けは11月20日に標的容器の不具合により利用運転を休止することになったが、MRのビームを使ったハドロン施設への利用は継続し、5.52秒に繰り返し周期を速くしたのに加えてビーム調整によって、より最適な運転条件を探索し、39kWのビーム出力だったものを12月には42kWに向上した[4]。

リニアックではトンネル内機器での冷却水流量の低下が見られている。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の調整することも何度か発生している。1回の調整に数時間を要しているため、稼働率を確保するための課題となっており、流量低下を防ぐことや、トンネルへ入域しなくても流量を調整できるようにする工夫を行うなどを検討し、一部は実施しているところである[5]。

MLFは11月20日に標的容器の不具合により利用運転を休止した。一方でMRのビームを使ったハドロン施設への利用を42kWのビーム出力で継続し、12月18日朝に予定通り終了した。その後、リニアックのビーム電流を、通常の利用運転条件である30mAから40mAに向上し、その条件での加速器パラメータのスタディを12月25日朝まで行い、年末の保守作業に入った。

年末年始の保守停止後、1月7日にビーム運転を開始した。まず、リニアックの電流を50mAとし、大強度の加速器スタディとして、リニアック[6]と3GeVシンクロトロン(RCS)の調整を行った。次に、1月15日に電流を40mAに変更し、この条件で利用運転に向けた調整を、リニアック、RCS、MRで行った。これは、昨年末までの利用運転はリニアックの電流30mAで行っていたが、ニュートリノ実験施設向けに強度を上げやすくするためである。これら調整の後、2月1日未明からNUの利用運転を330-360kW(30mA時は300-330kW)で開始した。その後の

調整によって 390kW までビーム出力を向上させたが、2月 25 日にメインリングアポートラインでの真空リークにより停止した。原因究明と対策を実施し、3月 3 日夜に NU の利用運転を再開した。その後は同様の不具合は発生せず、ほぼ予定通り NU の利用運転に約 390kW のビームを供給した。しかし 3月 29 日に主偏向電磁石のコイルに不具合が発生し、利用運転を休止することになった。電源棟にあった参照用偏向電磁石と交換し、4月 8 日に通電試験を完了した。Figure 5 は、参照用偏向電磁石と故障した BM#67 電磁石が、入れ替え途中に搬入口で並んだ様子である。



Figure 5: Photo of a failed BM#67 (top) and a reference BM (bottom).

MLF は予備の標的に交換し、減速材の準備が完了した 2月 14 日からビーム調整を始め、20日 21 時から 200kW で利用運転を開始した。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中でも、よりユーザが成果を出しやすいビームを出そうと努力し、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、温度の監視を行いながら運転を行っている。

2.2 2015 年度の運転時間、稼働率、停止要因

2015 年度(2015 年 4 月から、Run の区切りとして 2016 年 4 月 4 日朝まで)の運転統計を Table 1 及び Figure 6 に示す。総運転時間 6,350 時間(加速器の立ち上げや調整等も含む)中のユーザへの供給時間は、MLF は 1,477 時間で施設の利用時間に対する稼働率 41%、NU は 1,169 時間で 70%、HD は 1,517 時間で 86%であった。MLF の稼働率が低いのは、2回におよぶ標的の不具合に起因する。

Table 1: Operation Time Summary in JFY2015

運転時間: 6,350	利用時間、 Total	停止時間 加速器起源	停止時間、 実験器起源	利用時間、 正味	稼働率 (%)
MLF	3,579	145	1,957	1,477	41.3
NU	1,671	446	55	1,169	70.0
HD	1,752	220	15	1,517	86.6

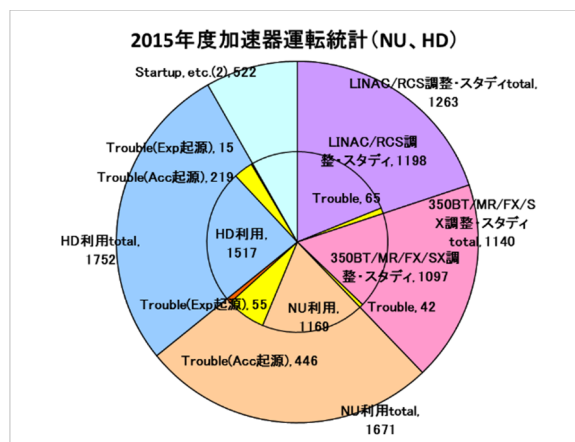
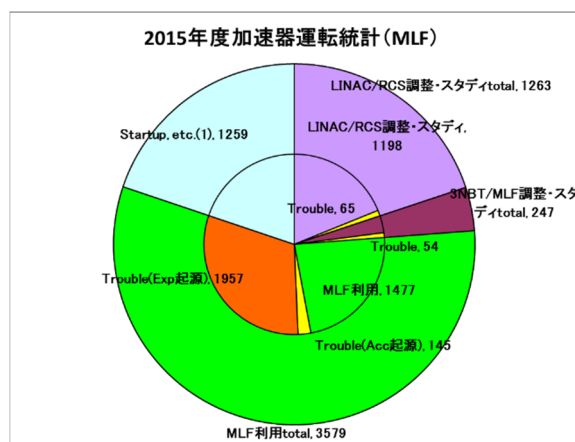


Figure 6: Operation statistics for the MLF (top) and for the MR (bottom) users.

機器ごとのダウンタイムを Figure 7 に示す。リニアックの DTL は冷却水流量低下による停止、HVDC はクライストロン電源関係の故障や不具合、Others には、地絡による空調の停止、冷却塔の故障による停止、タイミング系の不具合などが入る。MR は 3月の偏向磁石の故障によるものであり、復帰は 4月 8 日であったが、ここでは 2015 年度の停止時間の分を計上している。

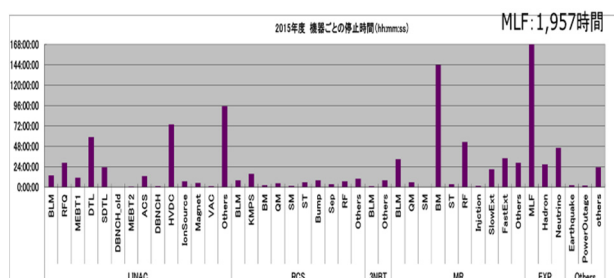


Figure 7: Downtime by components in JFY2015.

2.3 2016 年度(2016 年 4 月~6 月)の運転状況

3 月から継続した MLF の利用運転は 4 月 4 日 7 時に無事終了した。その後イオン源の交換を行い、新年度の

Run#68を開始した。しかし4月5日、3GeVシンクロトロン保守作業中にコリメータ部の真空リークが発生[7]し、その復旧のため、当初予定していた4月10日の利用運転開始が、ニュートリノは4月13日夕方、物質・生命科学実験施設(MLF)は4月15日に遅延した。

再開後のニュートリノとMLFでの出力は、それぞれ390kW、207kWと、不具合の発生前と同じ水準で、4月中はほぼ予定通りに利用運転を行った。しかし5月は、リニアックの高圧電源の故障により累計で約13時間、リニアックの冷却水流量低下で5時間半ほどの停止があった。6月にはタイミングシステムの不具合と、それに続くリニアックのクライストロン電源に用いているバイアス電源の故障等が続いた。

一方MRでは、5月3日に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があり、その対応に約6日を要し、5月9日の夕方に運転を再開した。ニュートリノ実験施設へのビーム出力は390kWで再開したが、その後のビーム調整の結果、23日からは410~420kWに向上し、最大では425kWを達成した。27日にはニュートリノ実験施設からハドロン実験施設に行き先を変更し、6月30日まで42kWで利用運転を行った。

4月から6月までの運転統計をTable 2に、機器毎のダウンタイムの要因をFigure 8に示す。RCSのOthersはコリメータの不具合であり、これが支配的となっている。リニアックのHVDC(バイアス電源の故障)も割合としては高い。リニアックとRCSの不具合は、下流の実験施設に対して同時に稼働率を低下させるため、上流側の安定運転の確保は特に重要である。MRはBMの故障の4月分の時間、Othersはトランスの不具合であり、NUの稼働率を下げる主な要因となった。

Table 2: Operation Time Summary from April to June 2016

運転時間: 2,168	利用時間、 Total	停止時間 加速器起源	停止時間、 実験側起源	利用時間、 正味	稼働率 (%)
MLF	1,359	130	(0.2)	1,228	90
NU	892	217	22	652	73
HD	612	92	4	515	84

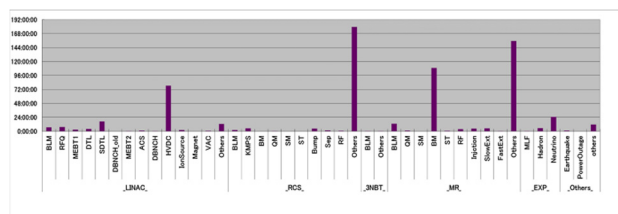


Figure 8: Downtime by components from April to June 2016.

3. まとめ

2015年度と2016年度6月までの運転では、故障やトラブルによる停止が比較的多かったが、MR-FXやSXではビームパワーを着実に向上しており、ニュートリノ(T2K)

実験[8]やハドロン実験の進捗に寄与している。

J-PARC 加速器は、運転を開始してから10年を経過するものもあり、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。2016年夏のメンテナンスでは、稼働率の向上をめざし、リニアックでは、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、冷却塔の増設などを行っている。RCSでは、真空リークをしたコリメータの対応や、冷却水ポンプの交換などが重点項目である。

MRでは、繰り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。このための電磁石電源の開発[9]を進めるとともに、現場では、シャントインピーダンスの高いFT3L空洞への入れ替え[10]、入射セプトム電磁石と電源の入れ替え[11]、コリメータの性能向上などの作業が進捗している。

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月後半から11月の利用運転再開に備える予定である。

謝辞

本報告の著者は、各加速器施設の責任者が代表して連ねることにしたが、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、これらの方々に感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa, "Progress of Beam Intensity in the J-PARC Accelerators", PASJ2015, pp. 5-9, WEOLP02, 2015.
- [2] T. Takayanagi *et al.*, "New Injection Bump Power Supply of the J-PARC RCS", PASJ2015, pp. 1169-1174, THP073, 2015.
- [3] H. Hotchi *et al.*, "1-MW Beam Tuning for Beam Loss Mitigation in the J-PARC 3-GeV RCS", in these proceedings, MOOM30.
- [4] M. Tomizawa *et al.*, "Present Status and Future Plans of J-PARC Slow Extraction", in these proceedings, MOOM05.
- [5] K. Suganuma *et al.*, "Present Status of Water Cooling System at J-PARC Linac", in these proceedings, MOP002.
- [6] Y. Liu *et al.*, "Progresses of J-PARC Linac Commissioning", in these proceedings, MOP006.
- [7] K. Yamamoto, "A Malfunction of the Beam Collimator System in J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron", in these proceedings, MOP007.
- [8] S. Igarashi, "Accelerator Based Neutrino Experiments T2K J-PARC", in these proceedings, MOOLP04.
- [9] Y. Morita *et al.*, "High Power Testing of Power Converter Unit of J-PARC MR Main Magnet Power Supply for High Repetition Rate Operation", in these proceedings, MOP114.
- [10] K. Hara *et al.*, "Status Report of Development of RF Cavities with FT3L MA Cores in J-PARC MR", in these proceedings, TUP002.
- [11] T. Shibata *et al.*, "The Development of New Injection Septum Magnet for Upgrading of J-PARC MR(2)", in these proceedings, TUOL09.