

J-PARC 加速器のビーム強度の増強

PROGRESS OF BEAM INTENSITY IN THE J-PARC ACCELERATORS

長谷川和男^{#, A)}

Kazuo Hasegawa^{#, A)}, for J-PARC Accelerator Division

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

Abstract

This paper summarizes the progress and operation of J-PARC accelerators. The linac beam current was upgraded from 30 to 50 mA by replacing a new ion source and a radio frequency quadrupole linac. At the 3 GeV synchrotron, injection bump magnet power supply system was modified and the bump orbit was stabilized. A high power beam of 8.41×10^{13} protons per pulse was demonstrated at 3 GeV, which was equivalent to 1 MW if the repetition would be 25 Hz. Beam power at the Materials and Life science experimental Facility (MLF) for user operation was increased from 300 to 500 kW after the linac beam current upgrade. At the main ring, beam loss was reduced by suppression of transverse instabilities and so on. The beam power for the neutrino experiment was increased from 260 to 320 kW in February, and recorded up to 360 kW in May. The total number of protons on the neutrino facility target exceeded 1×10^{21} on March 26. Operation of the hadron experimental facility had been suspended since the accident in May of 2013. The countermeasures had been taken and user operation was resumed in this April.

1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS, Rapid Cycling Synchrotron)、メインリング (MR, Main Ring synchrotron) の 3 台の加速器、および RCS から 3 GeV ビームを利用する物質生命科学実験施設 (MLF)、MR から 30 GeV ビームを遅い取り出しで利用するハドロン実験施設、MR からビームを速い取り出しで利用するニュートリノ実験施設の 3 つの実験施設から構成される^[1]。目標ビーム出力は、RCS で 1 MW、MR で 0.75 MW であり、この目標に向けてビーム強度の増強を図っている。

2013 年 5 月 23 日にハドロン実験施設で放射性物質漏えい事故を起こし、当該施設の運転を停止していた。これに対する再発防止策や安全管理の強化に取り組み、本年 4 月 24 日に利用運転を再開した。

本稿では、J-PARC 加速器におけるビーム強度の増強や事故の対策について報告する。

2. ビーム強度の増強

2.1 リニアック

J-PARC の目標ビーム出力を実現するためには、リニアックはピーク電流 50 mA、エネルギー 400 MeV で設計されていたが、181 MeV リニアック部を当初に建設し、それに伴い、ピーク電流も最大 30 mA で運転を行ってきた。目標の 50 mA を実現するには、リニアックの強度向上だけでなく、RCS 入射時における空間電荷効果によるチューンシフトを抑えるため、エネルギーを 400 MeV にする必要がある。Figure 1 に性能向上前後のリニアックの構成を示す。ここではバンチャーやデバンチャー空洞の表

記は省略している。エネルギー増強には 181 MeV リニアックの後段に新規に 400 MeV までの加速空洞を設置して対応し、電流増強は、初段部のイオン源と高周波四重極リニアック (RFQ) を 50 mA に対応できるものに交換して対応した。リニアックの増強に関しては、文献[2]が詳しいので参照されたい。

エネルギー増強計画は 2008 年度に開始した。中心となったのは、環状結合型リニアック (ACS, Annular-ring Coupled Structure linac) であり、加速モジュール 21 台、バンチャー 2 台、デバンチャー 2 台の合計 25 台のモジュールから構成され、2013 年夏のメンテナンス期間を利用して加速器トンネルに据え付け、翌年 1 月に 400 MeV の加速に成功した^[3]。

ビーム電流の向上のためには、イオン源と RFQ の開発を進めてきた。イオン源は、LaB₆ 製フィラメントを用いたものを、セシウムを添加しない条件で使用してきたが、最大の引き出し電流は 36 mA 程度であった。そこで、より大電流の引き出しが期待される高周波駆動型の負水素イオン源の開発を進めた。イオン源の主要部品となる高周波アンテナ (Figure 2

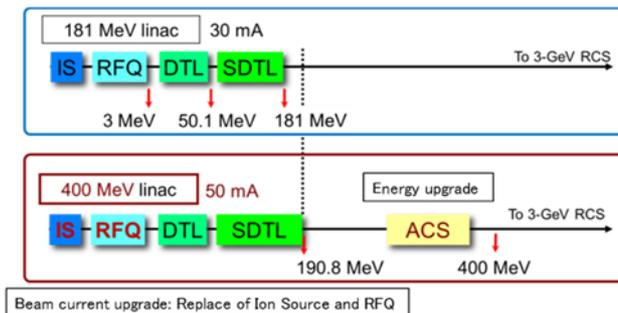


Figure 1: Schematic diagram of linac upgrade.

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

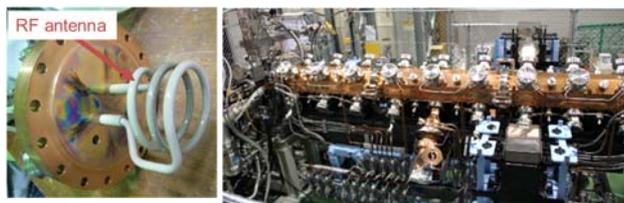


Figure 2: An RF antenna for a new ion source (left) and a new RFQ (right).

写真左)は、米国 ORNL 研究所の SNS (Spallation Neutron Source)で使っているものを採用している。J-PARC 独自には、電極形状や引き出し部分の磁場分布などの最適化により電流の向上を図るとともに、高周波電力とセシウム量の添加量の制御による電流の安定化を図るなど、実用化への開発も進めた^[4]。

既存の RFQ は 30 mA の加速に最適化されたもので、それ以上の電流では透過率の低下が顕著となってくるため、電極のパラメータを 50 mA で最適となるように新たに設計した。また、高周波構造を真空槽で囲む構造だったものを、長手方向に 3 分割したロウ付け一体構造で製作した (Figure 2 写真右)。これらイオン源と RFQ を組み合わせたテストスタンドを構築し、オフラインでのビーム試験を約 1 ヶ月間行い、連続運転の経験を含めた性能確認を行った^[5]。その後、2014 年の夏季メンテナンス期間を利用して既存のものと入れ替えを行った。9 月からビーム試験を開始し、10 月に 50 mA での加速を確認した。Figure 3 は、このときのリニアックの各点におけるビーム電流モニタの測定値であり、顕著な電流の低下 (ロス) が認められずに加速できていることが示される。また、その後の長時間の利用運転でも大きなトラブルは無く、懸念していたイオン源の高周波アンテナの寿命も、30 mA の運転条件では 1,100 時間の連続運転を達成し、フィラメント型と同等であることが確認された。現在、約 50 日周期の定期メンテナンスで予防的にアンテナを含めたイオン源を交換しており、実際の寿命の評価までは至っていないが、今後のオフラインでの長時間試験などで評価したいところである。

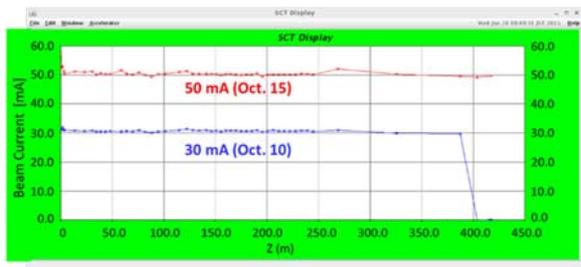


Figure 3: Beam current along the linac for 30 mA and 50 mA.

一方で、Figure 4 に示すように、リニアックのビームプロファイルを見ると、30 mA の加速に比べて、50 mA のときのハロー成分の生成が顕著であることが観測されている。また、リニアック内での各マッチングセクションで測定したエミッタンスでは、MEBT1 (RFQ と DTL の間) での測定値から、SDTL 出口 (190 MeV) までの増加が顕著である結果が得られた。MEBT1 以降、より最適なマッチングを取るスタディにより、ハロー生成やエミッタンス増加を抑制することが今後の課題である^[6]。

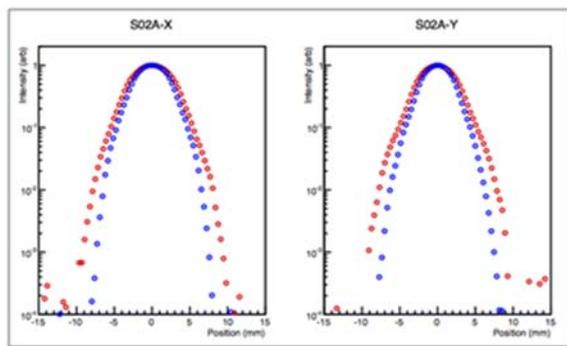


Figure 4: Beam profiles in the X and Y directions at the upstream of the SDTL section. Blue and red dots show profiles at 30 mA and 50 mA, respectively.

2.2 RCS

リニアックの増強に伴い、RCS でもいくつかの改良や増強が必要であった。その代表的なものが水平シフトバンプ電源であり、400 MeV の入射のために 181 MeV 時に比べて電源容量を 3 倍にし、さらに、ビームロスを低減するために電流リップルノイズを低減した電源を開発し、据付を行った^[7]。

リニアックの電流とエネルギーの増強によって、RCS への 1 MW 加速の準備が整ったことから、そのための試験を 2014 年 12 月に行った。入射の粒子数を徐々に増やしてゆくと、820 kW 相当で、加速中盤の 10 msec 付近で空洞の電源がトリップする現象が観測され、それ以上の加速ができなくなった。これは、高周波空洞を駆動する電源のアノード電流が過電流で停止したためであった。この対応として、加速空洞の共振点を調整して大強度加速時に必要なアノード電流の低減を図るとともに、連続的な加速ではなく単発ショットの運転に限定して電流インターロックの値を引き上げた。これらの対策の結果、2015 年 1 月、Figure 5 に示すように 1 MW 相当の加速 (8.4×10^{13} ppp) に成功した^[8,9]。

このとき観測された入射部でのビームロスの大部分が、荷電変換フォイルでの散乱によるものであることが確認された。そこで、散乱の数を減らすことで入射部のロスの低減が期待され、その対応として補正四極磁石を用いたペイント範囲の拡大の調整を行った。ペイント範囲を広げると、ビームをより早くフォイルから遠ざけることができ、散乱回数の減

少が期待される一方、入射バンブ電磁石のエッジ効果がより顕著となり対称性が崩れることから、その調整も合わせて行った結果、従来の $100\pi\text{ mm.mrad}$ のペイントエリアに比べて、 150π とすることで散乱回数を 4 分の 1 に低減することに成功した。この結果、1 MW 定常運転時に予想される入射部近辺の残留線量が、約 40 mSv/h から 10 mSv/h と大幅に低減されることが期待される^[10]。

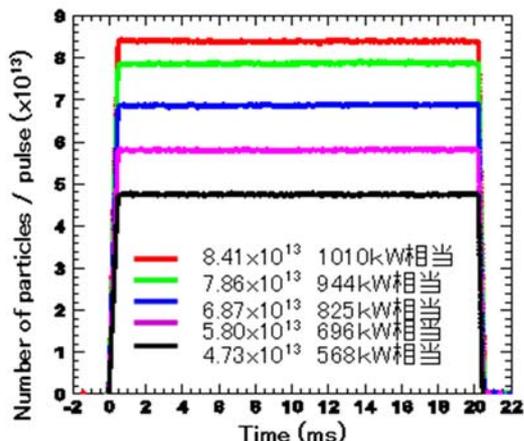


Figure 5: Beam current in the RCS from injection to extraction for various proton numbers per pulse.

Figure 6 に、RCS から MLF へのビーム出力の履歴を示す。2008 年 12 月に 4 kW で開始した MLF の利用運転の出力は、リニアックや RCS におけるビーム調整の進展やハードウェアの改良などによって着実に向上してきた。2011 年の震災で一時中断したが、リニアックのエネルギー増強前後では 300 kW で利用運転を行ってきた。リニアックの電流増強により、

1 MW 相当の大強度試験に成功し、利用運転としては 500 kW まで向上することができた。MLF では 19 台の中性子実験装置と 2 つのミュオン実験装置が稼働しており、施設の名称が示す通り、物質科学や生命科学を中心とした実験が並行に行われている。ただ残念ながら、4 月 30 日、中性子標的の不具合により MLF への利用運転は休止することになった^[11]。現在、不具合を改良した標的容器の製作を行っており、秋には利用運転を再開する予定である。

2.3 MR

Figure 7 の MR のビーム出力の履歴で示されるように、コリメータや高周波空洞の増強とともに、バンチ毎のフィードバック、バンチ内のフィードバックでのビーム不安定性の抑制^[12]、共鳴線補正用電源の増強、ビームオプティクス補正の高度化など、多くのハードウェアの性能向上とビーム調整の改良によって、ニュートリノ実験へ供給するビーム出力を着実に向上してきた^[13]。リニアックの電流増強後、2014 年 11 月は 220 kW で利用運転を開始したが、その後 250 kW に、そして 2015 年 2 月からは 320~330(最大で 360) kW で供給できるまでに向上した。この結果ニュートリノ実験には、一つのマイルストーンとなる、累積で 1×10^{21} 個の陽子の供給を 3 月 26 日に達成した。

ニュートリノ実験では、2014 年 5 月から反ミュオンニュートリノモードで運転を行っており、以前から測定しているミュオンニュートリノ振動との違いを調べている。最新の実験の結果では、反電子ニュートリノの出現事象候補として 3 イベントを検出したが、統計が少なく、確定的なことは未だ言えない状況にある。一方ミュオンニュートリノ消失モードの解析からは、ニュートリノと反ニュートリノの振動パラメータが誤差の範囲で一致していることが示された^[14]。今後更にデータを蓄積して統計精度を上げるた

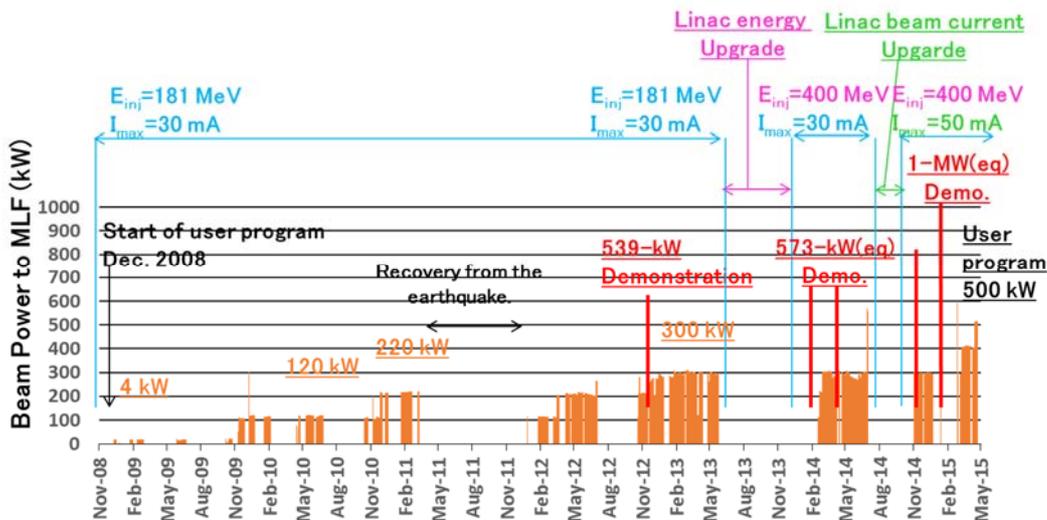


Figure 6: History of beam power from the RCS to the MLF.

めに、より強い出力でのビーム供給が期待されている。

Figure 8 に遅い取り出しでの出力の履歴を示す。ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故以降、運転を停止していた当該施設の性能確認を4月9日に3 kWの出力で開始した。その後慎重に調整を進め、施設検査に合格した後、4月24日に事故前と同じ出力である24 kWで利用運転を再開した。その後も調整を進め、夏季停止前までに33 kWに向上し、予定通り利用運転を終了した。

MRの更なる大強度化に向けた試験として、現行のチューン(22.40,20.75)でのスタディの結果、370 kWを超える出力のパラメータ探索に成功した。また、新しいチューン(21.239,21.310)での調整も行っており、更に調整を進めてビーム損失の低減を図ることができれば、現行チューンでの出力を超える可能性も持っており、今後の調整の進展が期待される^[13]。

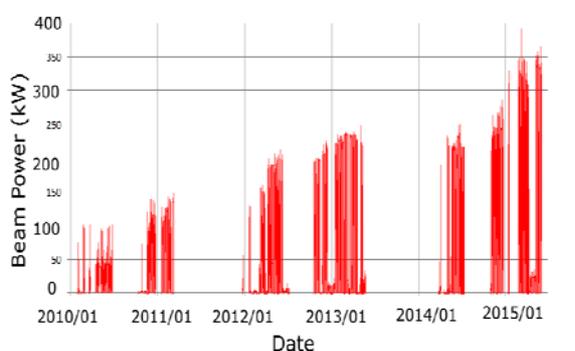


Figure 7: History of beam power from the MR.

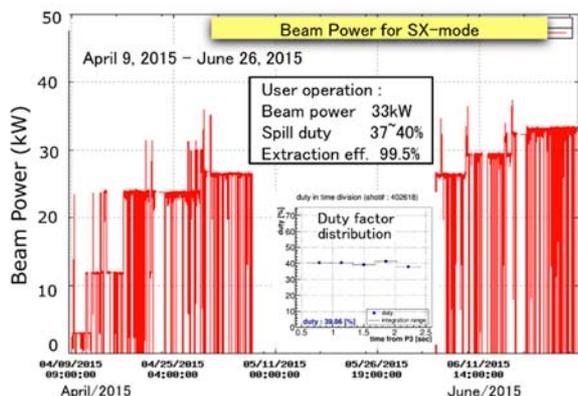


Figure 8: History of beam power at the slow extraction from the MR. Duty factor is also shown in the figure.

3. ハドロン実験施設の事故の対策

2013年5月のハドロン実験施設の事故は、通常2秒かけて取り出される遅い取り出しが、EQ電磁石電源の誤作動により5ミリ秒で取り出され、標的の金が高温になり損傷し、標的内の放射性物質が飛散・漏えいしたことによって発生した。

事故対応の問題点として、①放射性物質を施設外及び周辺環境に漏えいさせたこと、②ホール内で作業員が放射性物質を吸入し内部被ばくしたこと、③国・自治体等の関係機関への通報連絡と公表が遅れたこと、があげられた。これらの事故の詳細、経過や再発防止策については、文献[15]やJ-PARCのWeb^[16]に詳細が述べられており、ここでは要点を示すことにする。

ハード面の対策として、新しい標的を気密容器に入れたり、一次ビームライン境界の気密の強化といった閉じ込めや、実験ホールの空気を監視し排気はフィルターを通すこと、実験ホールの作業員に放射線モニタ情報を提供して事故発生時には迅速な退避を促せるようにする、などについて、改修が2015年1月に完了した。

事故の原因となったビーム取り出し(EQ)電磁石電源の誤作動は、Figure 9に示すように、電流指示値を電源内部で伝送するシステムの一部に一時的な不具合が発生したためと確認された。定電圧電源基板に使っている部品の発熱対策が不十分であったために経年劣化が進み、誤作動に至ったと考えている。このため、発熱対策を強化した基板に交換した。さらに、電流偏差異常が発生したときには電源やビーム運転を停止するとともに、停止開始までの応答速度の高速化を図るなどにより、たとえ誤作動が生じても、放射性物質の発生を最小限にするような仕組みを設けた。

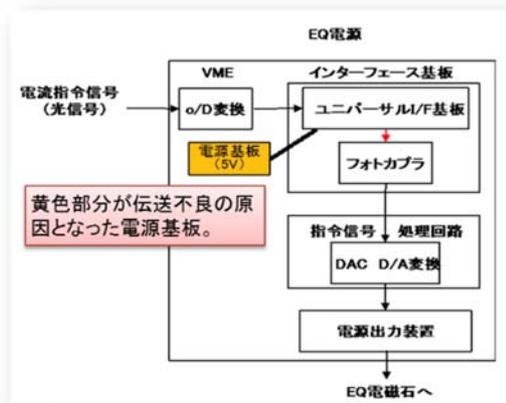


Figure 9: Flow of the control signal in the Extraction Quadrupole magnet power supply. The failure was resulted from voltage drop in a circuit board of constant voltage power supply in the yellow box.

ソフト面での安全対策として、安全管理体制を強化するとともに、綿密な放射線安全の評価、通常と異なる事象では注意体制を設定して対応すること、リスクの高い作業を見落とさない仕組みを構築する、などの対応を取った。

こうした再発防止策や安全管理強化策に取り組み、措置結果について茨城県知事及び東海村長に報告し、地域の方々への説明会や報道関係者への説明などを行い、運転を再開した。

4. まとめ

各加速器施設のビーム強度の増強には、ハードウェアの整備とともに、ビームスタディによりロスを低減することによって進めてきた。今後ともこれらを継続し、目標強度の実現を早期に達成するとともに、それ以上の出力の可能性の検討も開始したところである。また、加速器の性能として、ビーム強度だけではなく、稼働率も重要なファクターであり、この低下を抑えつつ強度の増強を図ることが、今後更に重要となってくる。

こうした調整や運転は、ハドロン実験施設の事故の教訓や安全対策のもと、安全確保を最優先にすることで進めており、今後ともこれを継続することが大切である。

最後に、本報告にあたり、J-PARC 加速器のメンバー、実験施設や安全ディビジョンの方々に協力をいただき、ここに感謝を申し上げる。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki editor, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-44.
- [2] T. Morishita et al., "Upgrade of J-PARC Linac", High Energy News, 33 (4) pp. 270-278 (2015), 加速器 Vol. 12, No.1 pp.22-30 (2015).
- [3] H. Ao and T. Sugano, "Development of the Annular-ring Coupled Structure for J-PARC", Proc. of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. pp. 160-164 (2014).
- [4] K. Ohkoshi et al., "Status of the J-PARC RF Ion Source", in these proceedings, THP037.
- [5] T. Morishita et al., "High-Power Test Results of the RFQ III in J-PARC Linac", Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland, pp. 649-652 (2014).
- [6] T. Maruta et al., "Recent Progress of Beam Study in the J-PARC Linac", in these proceedings, WEP014.
- [7] T. Takayanagi et al., "New Injection Bump Power Supply of the J-PARC RCS", in these proceedings, THP073.
- [8] 山本風海 他 "J-PARC 3GeV シンクロトロンでの1MW 出力の達成", 高エネルギーニュース, 第34巻1号, pp.19-28 (2015).
- [9] K. Yamamoto and M. Kinsho, "Status of J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron Under the High Power Operation", in these proceedings, FSP031.
- [10] H. Hotchi and J-PARC RCS beam commissioning group, "Recent Progress of J-PARC RCS Beam Commissioning", in these proceedings, THOL06.
- [11] 「中性子標的容器の不具合の原因に関する調査結果及び再発防止に向けた対策について」
<http://www.j-parc.jp/ja/topics/20150710press.html>

- [12] T. Toyama et al., "Status of the Intrabunch-Feedback at J-PARC Main Ring", in these proceedings, WEP090.
- [13] Y. Sato et al., "Recent Commissioning and Prospect of High Power Beam Operation of the J-PARC Main Ring", in these proceedings, WEP031.
- [14] 「T2K 実験、反電子型ニュートリノ出現現象に関する最初の結果を発表」
<http://www2.kek.jp/ipns/articles/t2k-antineutrino-first-result/index.html>
- [15] 小松原健, "ハドロン実験施設における事故と利用運転再開までの経緯" 高エネルギーニュース, 第34巻1号, pp.56-61 (2015).
- [16] 「J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故関連情報」
<http://www.j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>