

STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

Kazuo Hasegawa, and J-PARC Accelerator Group

J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization / Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Abstract

The status and progress of the J-PARC accelerators are reported. After nine-months of beam shutdown by the Great Earthquake, the J-PARC facility resumed beam operation. In December 2011, operations were carried out at low duty such as single-shots or 1 to 2.5 Hz for beam tuning. At the beginning of January 2012, we started beam tuning at the full repetition rate of 25 Hz at the linac and the RCS. After the tuning, user programs of the MLF, NU and HD started. The beam power was increased from 100 to 200 kW to the MLF users, from 3.3 kW to 6 kW to the Hadron users, and from 140 to 200 kW to the Neutrino users. The beam availability, however, went lower to 73 % in JFY 2011 due to the trouble of the linac klystron power supply in March, but it has got back to 90-94 % as of June in JFY2012. We have also much upgrade work during the shutdown period or in parallel to the operation.

J-PARC 加速器の現状

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。

2011 年 3 月 11 日の地震でライフラインを含めて施設に大きな被害を受け、運転を休止せざるを得なくなったが、施設利用を再開するため、精力的な点検や復旧作業を実施した。その結果、J-PARC センターが 5 月に策定した復旧計画通り、12 月からビーム調整運転を再開し、年度内に約 2 ヶ月の利用運転を行った。2011(平成 23)年度末にリニアックのクライストロン電源が故障して約 2 週間停止することになったが、2012 年度に入ってから大きな故障もなくユーザー利用運転を行い、震災前以上のビームパワー供給を行っている。

2. 震災からの復旧

震災の状況や復旧の詳細は文献[1,2,3]に譲り、ここではビーム運転再開までの特徴的な点に絞って述べる。

リニアック棟は上流西側のエントランス前の陥没と加速器トンネルの浸水など大きな被害を受け、トンネル床面は、震災前に比べて最大 40 mm の沈下と東側に最大 25 mm の変動が観測された。機器を震災前のように直線に再アライメントを行うのは短時間では困難なため、V 字状に曲げた（とは言っても、その曲りの程度は 1mrad 以内である）ライン上に機器を再アライメントし、早期のビーム運転に対応した。

3GeV シンクロトロンは、建家自体の損傷はさほど大きなものではなかったが、屋外ヤードの被害が甚大であった。部分停電で期間をかけるより、全域停電としてヤードの受電設備の復旧を最短で実施し、その後、装置側の復旧に専念する方策を採った。トンネル内の電磁石は、水平方向に 6 mm、垂直方向に 4 mm(p-p)の凹凸が認められたが、シミュレーションで出力 300kW までは大きなビームロスが発生しない結果が得られ、数か月を要する再アライメントはリニアック増強のシャットダウン時に合わせて行うことにした。

MR は、主トンネルへの地下水漏水を止水するなどの必要があった。機器の数が多いために点検にも時間を要し、また、全周にわたってアライメントがずれ（大きい箇所では 20 mm の変位）たため、すべての電磁石の再アライメントを複数チームで実施するなど工程を短縮し、ビーム運転のスケジュールに間に合わせる事ができた。

3. 2011 年度の調整・利用運転

3.1 調整運転

10 月中旬、復旧作業の進捗状況に照らし、12 月の具体的な運転計画を策定した。12 月 12 日のリニアックビーム運転開始を皮切りに RCS、MR の調整と MLF、NU へのビーム輸送を低デューティ（シングルショットか 1-2.5Hz）で行い、震災前との再現性や健全性の確認を行うものである。J-PARC の加速器メンバーは、この具体的目標に向かって精力的に復旧作業にあたるとともに、工程に遅れそうな項目にテコ入れするなど、12 月 9 日、3 日前倒しでリニアックの調整を開始することができた。

リニアックに続いて RCS の調整後、MR と MLF へは 12 月 22 日、ニュートリノには 12 月 24 日から、

予定通り調整を行うことができた。この中では、RCS から 300kW 相当の試験を行い、震災前後でのビームロスの比較のデータ取得も行うことができた。

3.2 利用運転

1 月の立ち上げ時の調整では、主に MLF 向けの 25Hz の繰り返しでの調整と確認を行い、1 月 24 日から予定通り MLF への利用運転を開始した。このときの出力は約 115kW である。約 1 か月連続運転を行い、運転後のトンネル内残留放射線量や中性子ターゲットの健全性等を確認し、3 月には震災前と同じ出力となる 210kW での利用運転を開始した。

MR では、ニュートリノ施設への連続利用を計画していたが、ホーン電源の故障により 2 月はハドロン施設の利用に変更した。このときのビームパワーは 3.3kW で、震災前の 2010 年 11 月と同等程度である。ホーン電源が復旧した 3 月にはニュートリノ施設への 140-150kW 供給を行った。

12 月からの調整と利用の運転を順調に行ってきた J-PARC 加速器であったが、3 月 22 日 4:10、リニアックのクライストロン電源の故障によりビーム運転を停止せざるを得なくなった^[4]。調査の結果、交流電圧を昇圧し、直流に整流する変圧整流器のダイオードモジュールの故障であることが判明した。故障した変圧整流器を予備機と交換し、4 月 8 日に利用運転に復帰した。

2011 年度（2011 年 12 月から 2012 年 3 月）の稼働実績を図 1 に、ビーム停止時間の原因別の集計を図 2 に示す。2,455 時間（加速器の立ち上げや調整等も含む）中のユーザーへの供給は 1,210 時間、故障による停止は 322 時間であった。年度末のクライストロン電源の故障による停止は 238 時間で、これによって稼働率が下がり 73% となった。

それ以外でも、RFQ や SDTL といったリニアックの加速空洞に関連する寄与が時間的に大きな割合を占め、それぞれ 60 時間、24 時間であった。

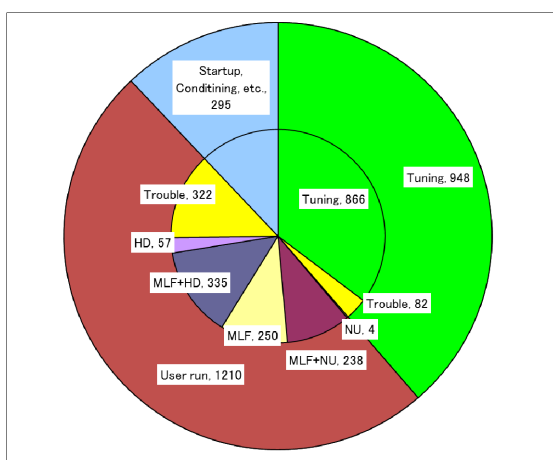


図 1 : 2011 年度の稼働実績 (2,455 時間)
ユーザー供給 1,210 時間、内トラブル 322 時間

4. 2012 年度の調整・利用運転

4.1 2012 年度の運転計画

2012 年度は 176 日のユーザー利用運転を計画した。基本的にはイオン源の交換寿命から約 50 日を 1 つの運転ラン構成とし、4-6 月、10-12 月、1-3 月の 3 か月をそれぞれ 2 つのランとして運転スケジュールを立てている。

4.2 2012 年 4-6 月の運転統計

2012 年度夏までの稼働実績を図 3 に示す。運転時間はトータルで 2,104 時間、ユーザー利用の稼働率は、MLF 向け 94%、NU 向け 90%、HD 向け 94% であった。ビーム停止要因の原因別集計を図 4 に示す。相変わらず RFQ の寄与が高いが、真空の条件が徐々に回復して 1 日あたりの停止回数が減少してきた (1~2 月は 50~60 回/日であったのに対して、6 月は約 20 回/日) ことと、運転再開時の放送内容の簡略化などで復帰までの時間を短縮し、他の要因と比較しうる程度まで停止時間の寄与は小さくなってきた。

4.3 大強度化に向けた調整・試験

MLF の利用運転時のビームパワーと累積ビームパワーを図 5 に示す。累積では 900MWh を超え、着実にビームを供給していることが示される。6 月 29 日から 7 月 2 日の朝まで、10 月からの出力上昇に備え 275kW での利用運転を試験的に行った。その結果、運転後の残留放射線量も連続運転可能なレベルであることを確認した。

また、RCS では 420kW 相当の粒子数でのビーム試験を実施し、ビーム入射後、数%のロスが発生するが、その後大きくロスすることなく加速・取り出しが行えることを確認した。同じ条件での震災前のビームロスと比較すると、コリメータ付近でのロスが 2 倍に増加していることが観測されたが、そのロス量は、約 0.8% (設計値は 3%) である。この増加は地震によりアライメントがずれたことに起因するもので、400kW レベルでは連続運転は可能であるが、設計値である 1MW を達成するためには再アラ

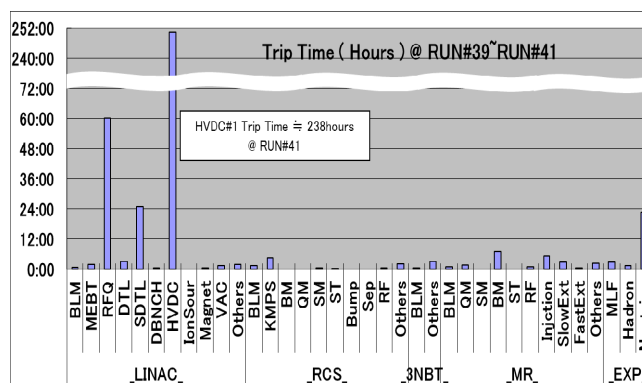


図 2: 機器別ビーム停止時間の累計 (2011 年度)

イメントは必須である。このため来年夏のリニアック増強に伴う停止期間に実施する予定である。

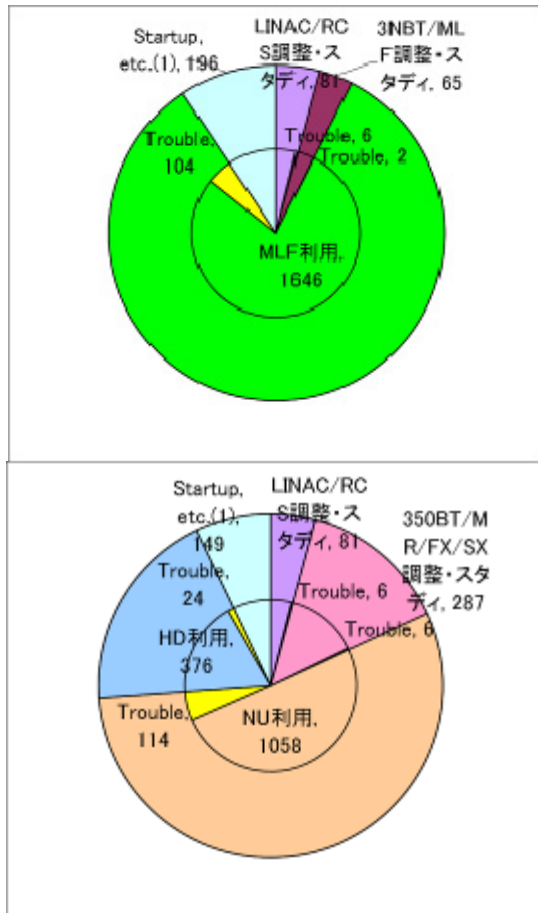


図 3: 2012 年度 4 月から 6 月の稼働実績
上: MLF 利用、下: MR 利用

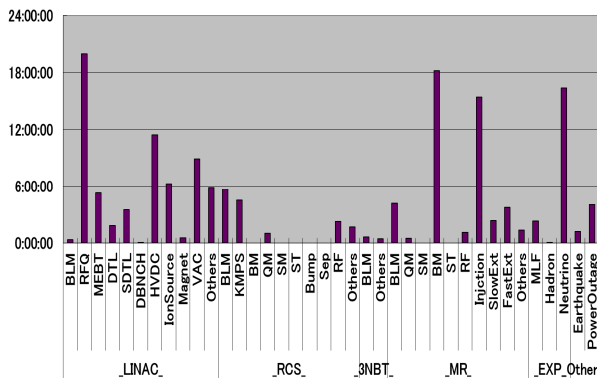


図 4: 機器別ビーム停止要因の累計
(2012 年 4 月~6 月)

図 6 に MR の速い取り出し (ニュートリノ利用) での 1 日あたりの陽子数と累積陽子数の履歴を示す。

2012 年 3 月までは繰り返し 2.92 秒で運転して 150kW 程度であったが、4 月以降は 2.56 秒に短くし、連続供給でのビーム強度は 190-200kW に向上した^[5]。このときの陽子数は 100Tppp(protons per pulse)を超え、陽子シンクロトロンでの取り出しビーム粒子数では世界最高となった。

ただ、常時 200kW 以上のビームパワーの供給は、次の 2 つの理由でできなかった。①入射キッカーの整合回路での抵抗器の劣化で波形が乱れビームロスが増加したこと、および②機械棟の 1 つからの排出ガスの放射能濃度がビーム出力につれて有意に高くなり規制値内に抑える必要があった。これらについては、夏季停止期間中に対応しており、秋以降は連続的な大強度ビーム供給が可能となることを期待している。

2 月のハドロン施設へのビーム強度は 3.3kW であったが、6 月は 6kW に向上することができた^[6]。ダイナミックバンプにより取り出し効率は 99.5%を達成し、ビームデューティは transverse rf を印加することで震災前 (2010 年 11 月) の 17%から 30%に改善した。また、シングルショットでの大強度の試験では、14kW 相当の調整も行い、秋以降は 10kW の利用運転を試みる予定である。



図 5: MLF の 1 日あたりのビーム出力と累積ビーム出力 (MLF 提供)

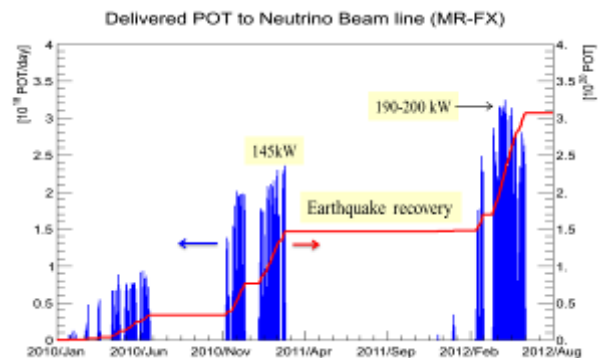


図 6: MR 速い取り出しでの 1 日あたりの陽子数と累積陽子数

5. 性能向上

5.1 リニアックの性能向上

平成 20 年度にエネルギー増強計画が認可され、現在 181 MeV で運転しているリニアックを 400 MeV まで加速するための整備を行っている。

当初計画では 2012 年度に据え付けの予定であったが、今年度はユーザーへのビーム供給を優先することになり、2013 年夏からの半年間で据え付けと調整を行うことになった。

リニアックの加速空洞である環状結合型空洞 (Annular-ring Coupled Structure, ACS) の量産はほとんど終息しているが、リニアック建家の震災復旧工事のため、多くをメーカーの工場に保管している。2011 年 1 月、量産となる最初の加速空洞の大電力試験に成功したが、2 台目の空洞に移行しようとした矢先に震災に合い、大電力試験は中断している。建家復旧後に試験再開を予定しているが、全数のオフライン試験は工程上間に合わないため、全空洞の大電力投入はトンネル内で行うことになる。

RCS の出力を 1MW に増強するためには、エネルギーだけでなく、初段部 (イオン源、RFQ) のビーム電流を 30mA から 50mA に向上させる必要がある。現在はフィラメントタイプのイオン源を使っているが、高周波駆動型の大電流イオン源の開発 (図 7) をテストスタンドで行っている^[7]。電流では仕様値となる 60mA 以上の引出に成功しているが、寿命の評価など、実用化に向けた R&D が急がれる。RFQ では、電極のパラメータを 50mA 用に最適化し、構造もロウ付け一体型のもので製作を進めている。

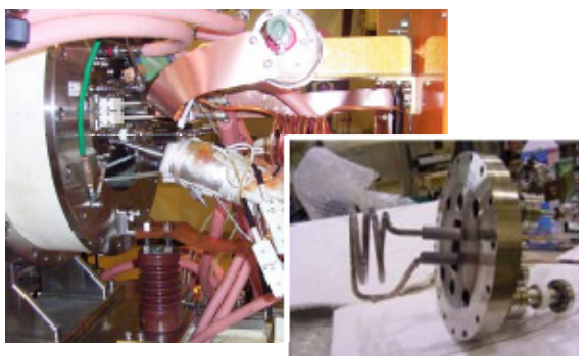


図 7: 高周波イオン源 (左) と RF アンテナ (右下)

5.2 RCS の性能向上

RCS のビーム強度を制限している要因の一つは、周回ビームが荷電変換膜を通過する際に大きな散乱を受け、入射部でビームロスとなることであった。200kW で 2 週間の連続運転後、4 時間後での残留線量は、真空容器表面で最大約 6mSv/h であった (図 8)。このロスを局在化させて放射線遮蔽をするためのコリメータを入射部に新規に設置した。その結果、コリメータの効果により、残留線量はこれまでの 10 分の 1 以下に減少することができ、RCS の更なるビーム増強に目処を立てることができた。

リニアックのエネルギー増強は、リニアックだけにとどまらず、RCS も入射エネルギーを上げるための入射パンプ電源の増強が必要である。また、大電流化のための加速空洞や可変偏向電磁石^[8]の追加など、1MW 出力に向けた整備を進めている。

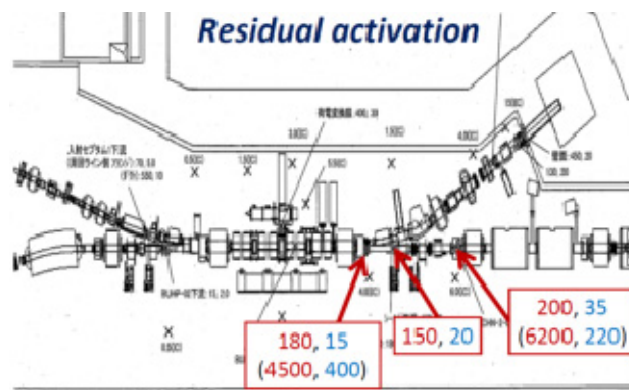


図 8: 120kW 運転停止 4 時間後の RCS 入射部近傍の残留線量 ($\mu\text{Sv/h}$)、コリメータ設置前で 200kW 運転後の値を () 内に示した。

5.3 MR の性能向上

震災で長い停止期間となった復旧時期を利用して、いくつかの性能向上に関わる作業を行った^[9]。その例として、以下のような項目が挙げられる。

- ・入射キッカーを、真空チャンバー内の放電と波形不良による周回ビームへの影響を軽減するために、新たに設計製作^[10]したものと交換した (図 9)。
- ・高周波加速空洞 2 台を増設し、繰り返し時間の短縮のための加速電圧の増強と空間電荷効果の影響を緩和するのに備えた。
- ・リングコリメータエリアに放射線遮蔽やアブゾーバの増設などにより容量増強の準備を行い、2012 年夏の更なる工事と合わせて現状の 450W から 2kW に増強する。
- ・遅い取り出しの残留線量を低減させるためのコリメータを設置した。

また、長期的な性能向上には、主電磁石電源の高繰り返し化と低リップル化が必要であり、これを旨とした回路構成の検討と R&D を精力的に進めている。

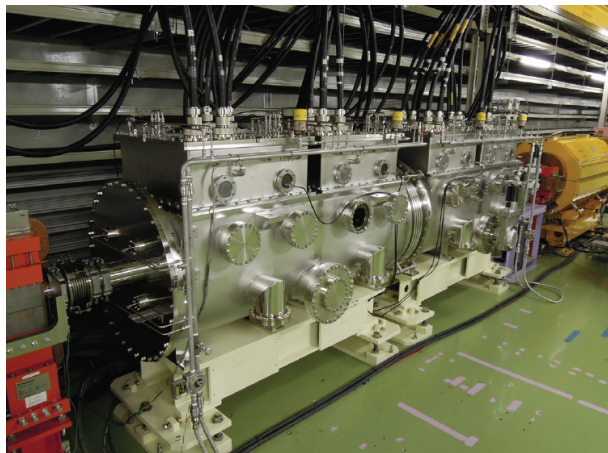


図 9：据え付けた新規設計の入射キッカー

6. おわりに

J-PARC 加速器施設は、9 カ月という短期間で復旧し、2011 年 12 月からビーム調整を開始し翌 1 月から利用運転を再開した。2012 年度に入ってから大きな故障もなく、ほぼ予定通り運転し、震災前を超えるビームパワーで各利用施設に供給している。各加速器は更なる大強度化を目指してビーム調整を行うとともに、更なる性能向上に向け開発や整備を進めている。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, “東日本大震災後の J-PARC “, J. Particle Acc. Soc. of Japan, Vol.8, No2 (2011).
- [2] M. Kinsho, “震災からの復興”, Hamon, Vol. 22, No.3 (2012).
- [3] K.Hasegawa *et al.*, “STATUS OF J-PARC ACCELERATOR FACILITIES AFTER THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE”, Proc. of IPAC’11, pp.2727-2729 (2011).
- [4] M. Kawamura *et al.*, “J-PARC リニアック用クライストロン電源システムの現状 2012”, THPS110, in these proceedings.
- [5] Y.Sato, *et al.*, “J-PARC Main Ring における大強度運転”, WEPL04, in these proceedings.
- [6] M. Tomizawa, “J-PARC 遅い取り出しビーム強度化へむけての取り組み “, WELR05, in these proceedings.
- [7] S. Yamazaki *et al.*, “J-PARC 用セシウム添加高周波駆動負水素イオン源の開発状況”, FRLR08, in these proceedings.
- [8] N. Tani *et al.*, “J-PARC 3GeV RCS 可変偏向電磁石の磁場測定”, WEPS058, in these proceedings.
- [9] T. Koseki and MR group, “J-PARC MR の運転状況”, J. Particle Acc. Soc. of Japan, Vol. 9, No1 (2012).
- [10] T. Sugimoto *et al.*, “J-PARC メインリング入射キッカー電磁石の性能評価”, THLR08, in these proceedings.