

STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

J-PARC Accelerator Division

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

Abstract

The operation status and progress of the J-PARC accelerators are reported. The accelerators have delivered beam to the user facilities at about 95 % availability in JFY 2010. The beam power to the MLF users has been upgraded from 100 to 200 kW since November. The efficiency of the slow extracted beam from the MR has been recorded to 99.5 % and 3 to 3.6 kW beam was delivered to the Hadron experimental facility. The beam power to the neutrino experiments has been steadily increasing up to 145 kW. The great earthquake in March 11, however, suspended all the J-PARC activities and intensive restoration work is underway.

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施設 (NU) から構成される。

2010 年夏の停止期間には、各加速器の保守に加え、改造・改良等を行い、MLF へは 11 月に共用運転のビームパワーを 100 kW から 200 kW に増強した。また、MR からの遅い取り出しでは、効率 99.5 % を達成し、HD に 3~3.6 kW を供給することができた。さらに、NU 用の速い取り出しでは、徐々にビームパワーを向上させ、3 月に 145 kW を供給できるまでに至った。また、イオン源は 16 mA の条件で 1,270 時間の連続運転を実証し、RCS では 420 kW に相当する強度の加速を実証するなど、今後の更なる性能向上につながる成果も出てきた。

しかし 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。現在、施設利用を可能な限り速やかに再開するため、点検や復旧作業を実施している。

2. 利用運転の実績

2.1 稼働率

2010 年度 (2010 年 4 月から 2011 年 3 月) の稼働実績を図 1 に示す。震災で運転が停止するまでを予定運転時間とした場合 5,550 時間 (加速器の立ち上げや調整等も含む) であり、この中でユーザーへの供給は 3,401 時間、故障による停止は 245 時間であった。

図 2 に、MLF、ニュートリノ、ハドロンの各施設に対して Run 毎の稼働率、表 1 にビーム供給時間と

稼働率を示す。2010 年度は、各施設に対し約 95 % の稼働率でビーム供給を行ったことが示される。

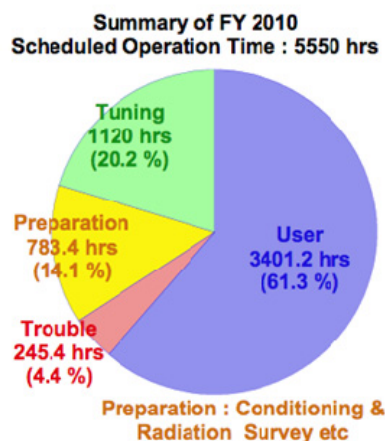


図 1 : 2010 年度の稼働実績

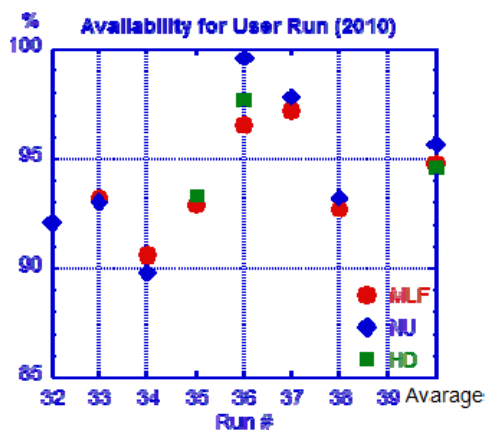


図 2 : 各施設に対する Run 毎の稼働率

表 1 : ユーザーへのビーム供給時間と稼働率

施設	供給時間	稼働率 (%)
MLF	2,388.0	94.5
NU	2,529.7	95.7
HD	450.9	94.6

2.2 トリップ原因

図 3 に、ビーム停止時間の原因別の集計を示す。RFQ,SDTL といったリニアックの加速空洞が時間的に大きな割合を占め、それぞれ 43.5 時間、29.8 時間であった。昨年度に大きな割合を占めていた RCS のキッカ (KMPS) は、コンディショニング方法の改善やケーブル交換の効果が現れ大幅に改善された。

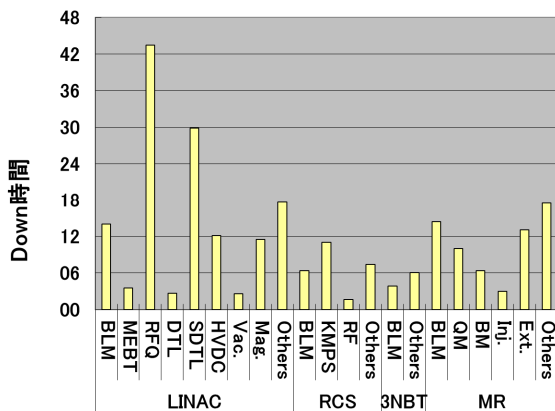


図 3 : 機器別ビーム停止時間の累計

3. リニアックの現状

3.1 リニアックの運転実績

2008 年から 2009 年にかけて問題となった RFQ の放電多発は、運転スケジュールの中に計画コンディショニング日を設けることで、計画外の停止を避けることができた。最初は 2~3 日に 1 回であったが、その間隔をしだいに延ばし、2010 年 6 月には 19 日、11 月から 12 月にかけては連続 2 ヶ月間の運転を行うことができた。図 4 にそのときの 1 日あたりのトリップ数を示す。定期的なコンディショニングを入れなくても数回から最大 14 回で推移し、トリップ数が増加を続けて運転が継続できなくなることはなくなった。

2.2 で示したように、全体に占める RFQ や SDTL によるビーム停止時間への寄与が大きい。それぞれの停止回数は、1,096 回、495 回であり、回数も多い。SDTL は 6 月に導波管のトラブルで 7 時間ほどビームを停止させたが、それを除くと平均の停止時間は、RFQ で 2.4 分 (43.5 時間の 1,096 回の平均)、SDTL で 2.8 分 (29.8 時間から 7 時間を控除し、494 回の平均) となる。空洞が VSWR 異常などでトリップした場合は、自動的に高周波が再投入され、

多くの場合数秒程度で復帰する。図 4 の RFQ のトリップでも、ほとんどが高周波の自動的な再投入で復帰できている (Automatic)。しかし 1 度ビームがトリップしたときは、運転員がその原因を確認し、リセット操作を行いビーム運転を再開するため、1 分から 2 分を要している。これが短いトリップ要因でもビームの停止時間を長くしていると考えられる。

この改善には、トリップの回数自体を減らす必要がある。RFQ の放電問題の苦い経験から、多少厳しめにインターロック条件を設定していることはある。これを緩めて稼働率を一時的に上げられたとしても、長期的に電極にダメージを与えるような設定は避けなければならない。真空度や表面状態の改善、ビームや電子などトリップの種になる要素をつぶすことがまず重要などであるが、インターロック条件を慎重に見直してゆき、稼働率を高めてゆく必要がある。

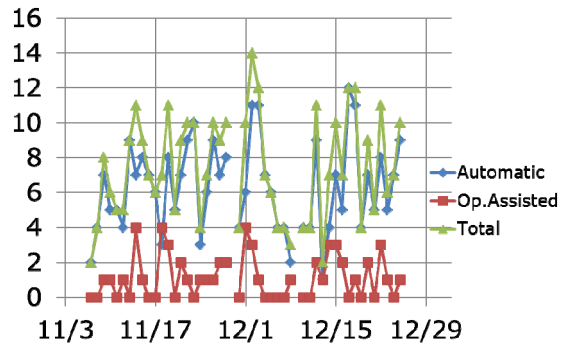


図 4 : 2010 年 11 月から 12 月にかけての 1 日あたりの RFQ のトリップ数

Automatic (高周波が自動で再投入できたもの)、
Op.Assisted (運転員の介在で高周波を再投入したもの)

3.2 イオン源の連続運転とメンテナンス時間短縮^[1]

1 つの Run の運転時間を決めている要因に、イオン源のメンテナンスの頻度と所要時間がある。これまでイオン源は、計画外停止を避けるため約 1 ヶ月の Run 毎に新しいフィラメントに交換するなどのメンテナンスを行っており、実際の寿命は評価できなかった。そこで 2010 年 11 月に、途中で切れるのも容認する条件で 2 ヶ月連続運転を行い、その結果、ビーム電流 16 mA で 1,270 時間の連続運転を実証した。この運転時間は、年末前の計画停止によるもので、イオン源や他の機器のトラブルで停止したものではない。

続く 2011 年 1 月の Run では、RCS の 400 kW 試験のために最初の 217 時間を 24 mA で運転し、その後 16 mA での連続運転を行った。この結果、1,029 時間経過したところでフィラメントが断線した。フィラメントの寿命はアークパワーに依存し、高い電流を引きだそうとすると高いアークパワーが必要である。こうした要因で 1 月のランでは切れるに至ったが、2 回の結果から 16 mA (この電流では

RCS から 300 kW 出力まで可能) では 1,000 時間の連続運転ができることが示された。

また、メンテナンス時間の短縮については、交換部品をユニット化するなど、これまで 4 日程度を要していたメンテナンス時間を 2~1 日まで短縮することができ、今後の運転計画を立てる上で、Run 間の停止日数を短縮できる見通しを示した。

3.3 エネルギー増強計画

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。このための加速空洞である環状結合型空洞 (Annular-ring Coupled Structure, ACS) の量産を進めている^[2]。2011 年 1 月、量産となる最初の加速空洞の大電力試験を行い、ピーク電力 1.6 MW、パルス条件 650 μ s、50 Hz までのコンディショニングを 60 時間ほどで実施できた。引き続き 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。

その他、クライストロン電源や高周波立体回路、冷却水システムなどの整備は、震災の影響を受けたものも一部にはあるが着実に進捗している。

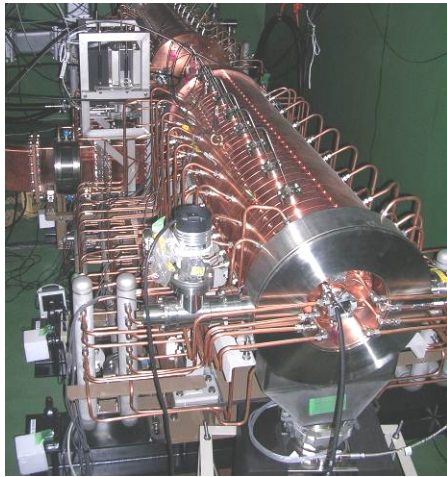


図 5 : 大電力試験のため、遮蔽できるピットに納められた ACS 量産 1 号機

4. RCS の現状

3GeV シンクロトロン(RCS)は、2008 年 12 月より MLF ユーザーに向けて 20 kW の出力でビーム共用を開始した。その後改良を続けて、2009 年 9 月に 120 kW、2010 年 11 月には 200 kW まで出力を上昇させ、震災による運転停止までの間安定に供給を続けてきた。同時に、MR へも最大 300 kW 相当のビームを供給している。MLF へのビーム出力を図 6 に、現在までに達成した RCS のパラメータと設計値を表 2 にまとめる。共用運転を行う一方で、ビーム増強試験も実施し、MR へは 400 kW 相当のビーム供給が可能である見通しを得ている。

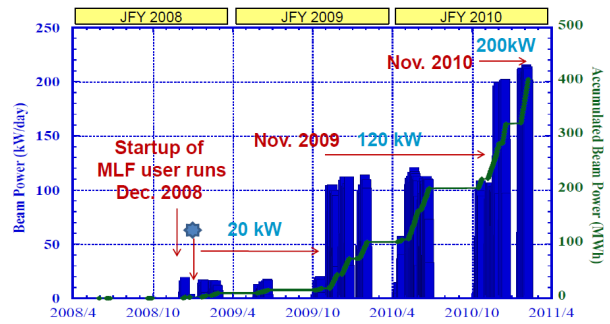


図 6 : MLF ユーザーへのビーム出力

青 : 1 日平均のビームパワー、緑 : 積分ビームパワー、

表 2 : RCS の設計値と現状のまとめ

Parameter	Unit	Design	Achieved to data
Injection energy	MeV	400	181
Output energy	GeV	3	3
Number of bunches		2	2
Repetition	Hz	25	25
Output power	kW	1000	200*
Particles/bunch		4.2×10^{13}	8.4×10^{12} *
Injection scheme (painting)		Transverse & longitudinal	Transverse & longitudinal
Tune excursion during acceleration		<0.005	~0.025
COD	mm	<1	<1
Chromaticity		0 ~ 20ms w/AC p.s.	0 ~ 20ms w/AC p.s.
Stability of extracted beam orbit	mm	< ± 1 atQX3	~ ± 0.5 atQX3
Beam emittance (un-normalized in full)	π mm mrad	54 for MR, 81 for MLF	~50[x]/50[y] for 200kW

*Equivalent 400 kW operations for MR were available.

RCS のビーム強度はビームロスが決められていると言って良いレベルになってきた。図 7 に 2011 年 1 月に行われた 200 kW 連続共用運転終了後の線量分布を示す。この Run は、1 月 13 日より RCS のビーム試験を開始し、1 月 21 日より 200 kW にて MLF への共用を開始した。その後、2 月 10 日の午前中に共用を停止し、停止 4 時間後に残留線量の測定を行った。

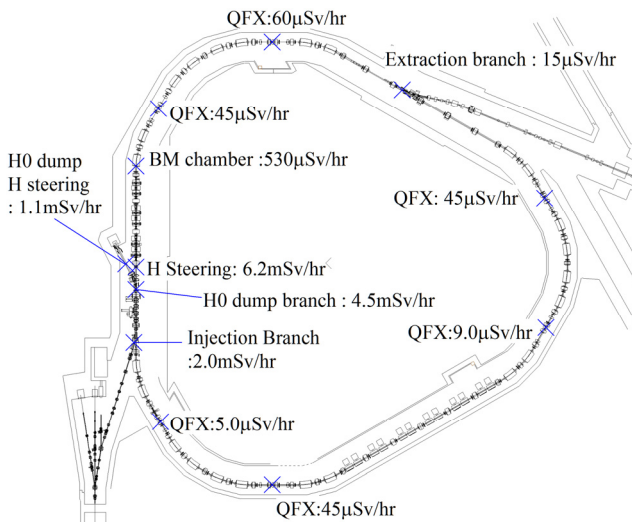


図7: 200kW で 20 日 運転を行い、ビーム停止 4 時間後での残留放射線量 (2011 年 2 月 10 日測定)

RCS での主なビームロスポイントは、(1) コリメータ部、(2) アーク部、(3) 入射部であった。コリメータ部に関しては、加速器の設計思想が、ビームロスをコリメータに局在化させ、その他の部分のロスを極力低減させるということであるため、この部分のビームロスが大きいのは設計通りである。アーク部のロスに関しては、昨夏の定期メンテナンス時に六極電磁石電源を入れ替え、フルエネルギーでのクロマティック補正を可能にしたこと、及び、LLRF でのビームフィードバックが可能になったことで低減させることができた。しかし、入射部には依然として機器保守上無視できない程度の残留放射線量が存在する。200 kW のビーム強度で約 1 か月共用運転を行った場合、加速器運転停止 4 時間後の機器表面で 5 mSv/hr 程度の線量が、入射直線部の広い範囲で観測されている。調査の結果、このロスは荷電変換入射に利用するフォイルに周回ビームが衝突し、そのビームが散乱されビームロスの原因となっていることが判明した。

サイズの十分小さな荷電変換フォイルを用いることで、周回ビームのフォイルへの衝突回数を低減させる実験を行った。しかし結果としては、リニアックから入射される H⁰ ビームに、プロファイルモニターで測定できないテール部分が合計 1% 以上存在し、それらが H⁰ ダンプに廃棄されることでダンプ周辺の線量を上げていることが判明した。ダンプ周辺の線量は大型フォイル使用時の 10 倍以上にもなり、今後はその周辺での作業に支障をきたすようになった。今後は、フォイルサイズの更なる最適化とともに、入射ビームの形状をさらに調整すること、ビームコリメータの新たな追加設置によるビームロスの局在化^[3]、分岐ダクトを遮蔽体で覆うことで周辺線量の低減化などを行う必要がある。本コリメータは現在製作中であり、本夏のメンテナンス時に設置する予定である。

5. MR の現状

5.1 運転状況

図 8 に 2010 年度の MR の運転状況を示す。2010 年夏前は繰り返し 3.52 s、バンチ数 6 の運転で、速い取り出しを用いてニュートリノ (Tokai to Kamioka : T2K) 実験に 50 kW 前後のビームを供給した。ビーム強度を制限したのは、速い取り出しキッカーの蹴り角のドリフトであり、これはビームの作る wake field によるフェライトコアの発熱に起因していた。

夏の停止期間中に、新規に開発した新たなキッカーシステムに入れ替える作業を行った。このキッカーシステムは、立ち上がり時間が約 1 μs と従来の 60 % 程度に短くなり、その結果、8 バンチでの運転が可能になるとともに、ビーム結合インピーダンスの低減等によりビーム強度 500 kW 付近までコアの発熱を生じない設計になっている。さらに夏期停止期間中に偏向電磁石電源の立ち下がり時間の短縮などの改良を行い、3.2 s 以下の繰り返しで運転することが可能となった。

10 月から 11 月中旬にかけては、遅い取り出しモードによる運転を行い、ハドロン実験施設に最大 3.6 kW のビームを供給した。ビームの取り出し中に水平方向チューンの変化に同期してバンパ軌道を変化させることにより静電セブタムでのビームの傾きの広がりを抑えてビームロスを減らす「ダイナミックバンパ」システムを導入した結果、取り出し効率は設計値 99.5 % を達成することができた^[4]。さらに短時間ながら大強度試験を行い、10 kW のビームを問題なく取り出すことができることも確認している。

その後、11 月中旬より速い取り出しの運転に切り替え、繰り返し時間 3.2 s、8 バンチで T2K 実験へのビーム供給を再開した。ビームロスと機器の残留線量を確認しながら徐々にビーム強度を上げ、2011 年 2 月末までに最大 135 kW のビームを T2K に供給した。その後、繰り返しを 3.04 s に短縮して 145 kW の連続運転を開始したが、その 4 日後に東日本大震災が発生した。

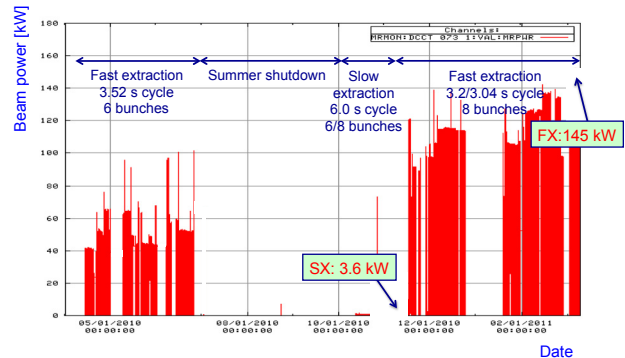


図 8 : 2010 年度における MR のビーム強度の推移

5.2 3-50BT コリメータの容量増強

MR において 2010 年夏の停止期間中に実施した大きな作業の一つに、RCS と MR を結ぶビーム輸送系 3-50BT におけるコリメータの容量増強がある^[5]。MR には 3-50BT および入射直線部の 2 箇所にはビームのハローを除去してロスを局所化するためにコリメータセクションが設けてある。それぞれのコリメータにおけるビームロスの容量は 450 W で設計されているが、今後 MR のビーム強度を増強していくためには遮蔽材を追加してコリメータの容量を増やすことが必要である^[6]。そこで、2010 年で 3-50BT の、2011 年および 2012 年の 2 カ年で入射直線部のコリメータの遮蔽材増設を実施する。図 9 に、2010 年夏に遮蔽材を増設した 3-50BT コリメータの写真を示す。12 台のコリメータの両側にリニアモーションガイドレールを設置し、その上に上部の厚さ 0.72 m、側面部の厚さ 0.25 m の鉄製の門型遮蔽を取り付けてある。この遮蔽材の増設により、3-50BT コリメータの容量は 2 kW に増強された。

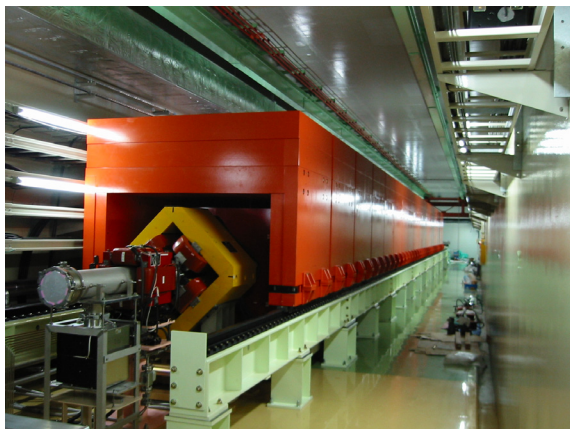


図 9 : 3-50BT コリメータに設置された門型遮蔽

6. 震災による影響^[7]

3 月 11 日の朝、当初の計画通りにビーム利用運転を停止し、その後、RCS と MR ではトンネル内のサーベイや作業が、リニアックではビームスタディが行われた。夕方から共用運転を再開する準備として RCS に行き先を切り替えようとビームを一時停止しているときに震災が発生し、停電に伴って機器は自動的に停止した。この地震によって J-PARC は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。

リニアックでは、震災直後に加速器トンネルへ大量の漏水があったが、仮設電源による揚水作業とその後の本設受電で更なる被害を免れることができた。電流モニターの破損などが認められたが、加速器機器への大きな損傷はなかった。しかし、クレーンや柱の損傷、床下の空隙、空調ダクトなどの配管類の損傷など、建家関係の被害が大きく、これらの復旧が運転再開の鍵を握っている。

RCS では、建家自体や屋内の機器の損傷はさほど大きくなかったが、周回道路が波打つほど変形したり、屋外ヤードが場所によっては 1 m ほど沈降したりした。トランスやコンデンサなどの基礎の傾きや空洞化の修正、受電盤の傾きの修正、ケーブルラックの嵩上げ、冷却棟の補修などを行っている。これら屋外ヤードの補修のために 8 月末まで停電を予定しており、それ以降、本格的な通電による復旧を行う予定である。

MR の主トンネルには 30 箇所を越えるクラックが発生し、その一部から地下水が漏水した。3 月末から止水作業を開始し、7 月末には全周の止水がほぼ完了する。MR はリニアックや RCS と比較すると震災によるインフラの被害が少なく、高圧を含む受電、空調、冷却水は 5 月中にすべて復旧した。その後、機器の通電試験を開始して、7 月中旬までには速い取り出しキッカーと振り分けバンドをのぞくすべての機器で定格通電が問題なく行えることを確認している。ただし、トンネル床面の大きな変位により全周にわたる再アラインメントは避けられない状況であり、8 月から本格的なアラインメント作業が開始される。

J-PARC センターは、12 月からビーム調整運転開始、2011 年度内に約 2 ヶ月の共用運転時間の確保を目標に復旧を進めることを 5 月に公表した。この実現には、被害を受けた施設・機器の修復に必要な予算が遅滞なく手当できることと、建家やインフラの回復がスケジュールに整合して進められることが前提となる。各実験施設からめざましい成果が出てきたところでの中断を回復すべく、少しでも早く利用運転を再開できるように急ピッチで復旧作業を進めているところである。

参考文献

- [1] H. Oguri *et al.*, “J-PARC 負水素イオン源の運転状況”, TUPS115, in these proceedings.
- [2] H. Ao *et al.*, “J-PARC LINAC ACS 加速空洞”, TUPS142, in these proceedings.
- [3] K. Yamamoto *et al.*, “J-PARC 3GeV RCS 入射部コリメータによるロス低減 “、MOPS025, in these proceedings.
- [4] M. Tomizawa *et al.*, “J-PARC 速い取り出しビーム性能の改善”, TULH01, in these proceedings.
- [5] M. Shirakata *et al.*, “Upgrade of Radiation Shield for BT Collimators”, THPEC081, Proc. IPAC’10, Kyoto, 2010, p. 4246.
- [6] Y. Sato *et al.*, “J-PARC Main Ring 速い取り出し運転のビームシミュレーション: 実測ビームロスとの比較によるベンチマーク、高繰り返しによるビーム増強のポイント”, WELH07, in these proceedings.
- [7] T. Koseki *et al.*, “東日本大震災後の J-PARC “、J. Particle Acc. Soc. of Japan, Vol.8, No2 (2011).