

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 recent operation status of the J-PARC accelerators is reported in this paper. The discharge problem of the RFQ linac has been steadily recovered and the beam of 120 kW power has been supplied to the common use of MLF. Although the accelerators can deliver the beam power more than 300 kW to MLF, the operational power is limited from the point of stable operation of the target system for neutron production. MR started user runs by the fast extraction with tuning toward higher beam intensity. The hadron experimental facility has also been tuning the data acquisition system with adjusting beam lines using a slowly extracted beam.

J-PARC 加速器の状況

1. 利用運転

いち早く「共用」に入った MLF 利用運転での状況をまとめる。RFQ Linac の回復をみて昨 10 月より利用運転を本格的に再開し、RCS から 120 kW のビームを供給している。12 月 10 日には 320 kW 運転を 1 時間継続し、加速器としては定常運転上問題のないことを確認した。ただし 300 kW 以上での運転では、中性子発生用ターゲットの信頼性（所謂、「穴が開く」pitting^[1]の危険性）から、予備ターゲットが整備されるまでのここ 1~2 年は、100 ~ 200 kW 程度の運転を行うことにしている。

1.1 Availability (稼働率)

昨 10 月からの加速器としての稼働率を図 1 に示す。中性子発生用ターゲット系の不具合により、Run 30 & 31 では利用運転はなかった。

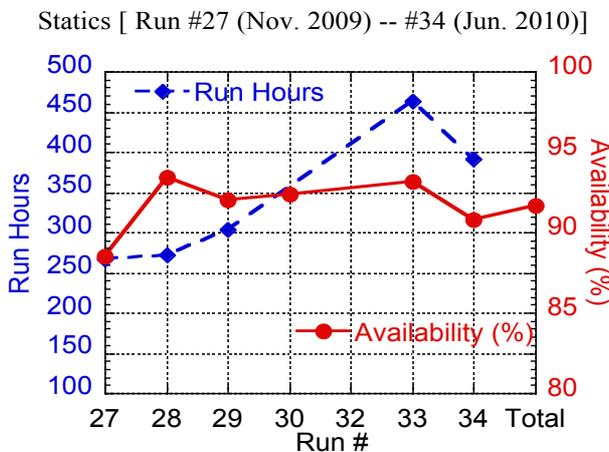


図 1. 各 Run 毎の MLF 利用運転時間と稼働率

図 2 にはビーム運転停止時間の機器別集計を示す。また主な機器の各 Run 毎の推移を図 3 に示す。

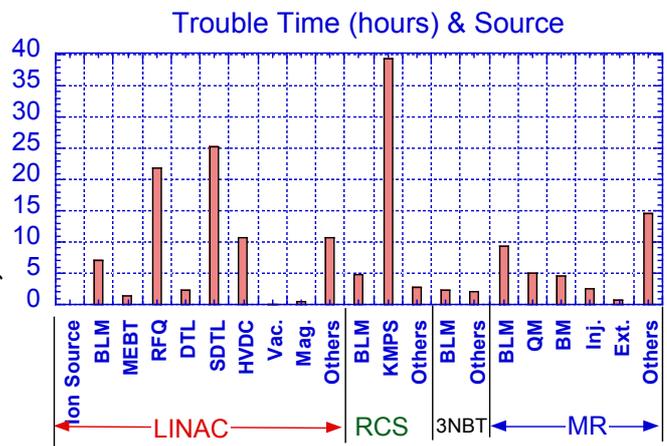


図 2. 機器別故障時間の累計

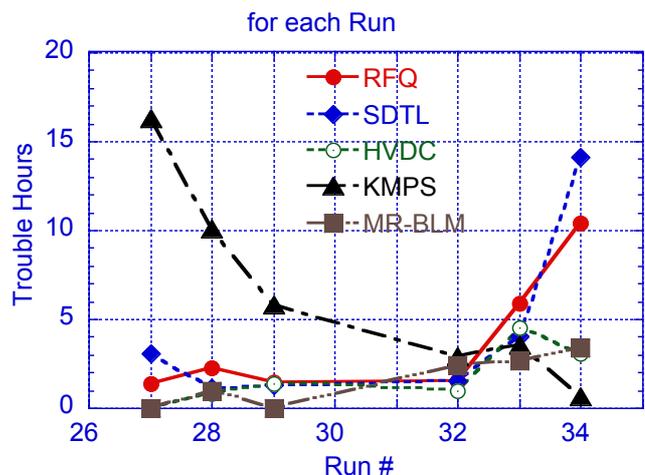


図 3. 主な機器の Run 毎の故障時間

際だった特徴として以下が挙げられる。

(1) **KMPs** (RCS 取り出しキッカー用電源) 稼働率の大幅な改善。これは予備電源を確保し、サイラトロン Conditioning をカタログに頼らず、自ら考

えながら学習を通して適切な方法を見つけ出したことによる。

(2) Run 34 での **SDTL** (Separated-type Drift Tube Linac) の故障の急増。これは同軸導波管の中心導体接続部の放電による。運転開始以来 5 年程度経過しており、振動等による、接触部の経年劣化と推定している。清掃及び取り替え作業での観察から、小さい放電がこれ以前から頻発していたと理解しており、放電トリップ後の安易な自動復帰で済ませることなく、注意深く対応すること、適切なモニター系の整備が必要であろう。これは他機器にも通じることである。

(3) Run 33 以降での **RFQ-Linac** のトリップの急増。Conditioning の間隔を従来の 1 週間未満から 3 週間以上に広げた結果、イオン源ガス流入が継続し真空レベルの底上げ等により放電回数が増大したと評価している。Run 34 でも 1 日 10 回程度のトリップであり、実運転上は問題なしと見ているが、適時の Conditioning の実施など、今後の注意深い対応が必要である。(2 章参照。)

(4) **HVDC** (クライストロン用高電圧 DC 電源) の超安定な運転。他の LINAC 施設では本電源の不安定さが稼働率を悪くしている。

(5) **BLM**(Beam Loss Monitor) のインターロックは大強度への調整過程にあることから、ちょっとしたロス兆候でも把握できるよう意図的に敏感に設定している。例えば、MR ではビーム強度の増大に対応して発報も増加していることが分かる。

1.2 着実なビーム供給

MLF 利用運転 (所謂共用) 開始後の運転日毎の供給ビーム・パワー (青色の棒、kWh、左軸) と累積ビーム量 (点、MWh 換算、右軸) を図 4 に示す。RFQ-Linac の抜本的手当による 2009 年秋以降の着実な回復が明瞭である。

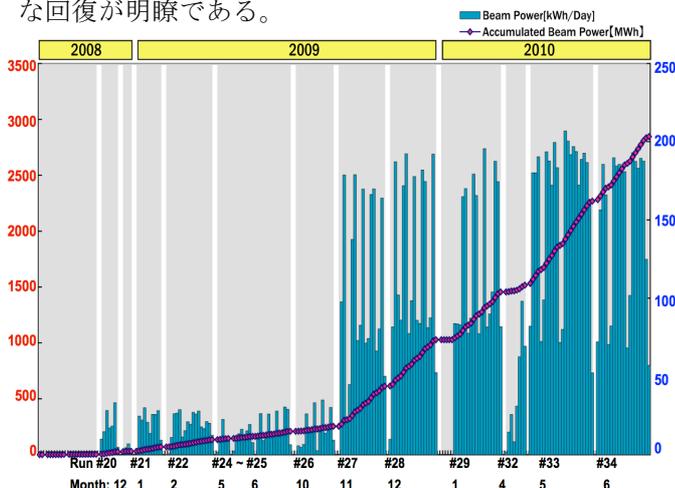


図 4. MLF へのビーム供給量 (二川正敏氏提供)

2. RFQ-Linac の回復

2008 年 9 月から物質・生命科学実験施設 (MLF) へビーム供給試験を開始したところ、RFQ のトリップ回数が増加し、空洞の設計電界強度の維持が困難になる問題が顕在化した。この問題がビームパワーや稼働時間向上への障害となってきたため、その対策を施すとともに、放電頻度緩和のために設計電界強度よりも低めで運転し、当初の性能までの回復に努めてきた。特に真空系は、イオンポンプやクライオポンプなどの追加、LEBT の差動真空排気化、粗引き真空ポンプのオイルフリー化、ベーキングでの脱ガスなど、重点的対策を施した。また、定期的な RF コンディショニングを入れ、予定外の運転停止を避けるサイクルを採用した。

2009 年 6 月と 10 月には、3GeV シンクロトロンから MLF への 20kW (リニアックからは、ピーク電流 5mA、パルス幅 100 μs で 1.2kW を供給) の共用を行い、実用運転できるまでに回復した。空洞の耐電界強度やパルス幅の性能回復が進み、11 月には、ピーク電流値を 15mA、パルス幅 200 μs にそれぞれ向上し 120kW での MLF 共用運転を開始し、それ以来 RFQ による計画外停止がなく 120kW での安定供給を行ってきた。更なるハイパワーを実現するため、12 月にパルス幅を 500 μs まで延ばし、ビーム電力 300kW で 1 時間の MLF 供給運転に成功するなど、RFQ の性能は着実に回復してきた。

徐々にコンディショニングの間隔を延ばし、連続運転の日数を、4 月は 7 日 & 10 日、5 月は 13 日 & 11 日、6 月は 4 日 & 19 日として、連続運転を実証し、2~3 週間の連続運転の見通しを得た。図 5 に 6 月の Run での 1 日あたりのトリップ回数を示す。運転日数につれて徐々に回数が増えてくる傾向が認められる。適宜コンディショニングを行い、連続運転で貯まった成分を除去しながら運転を継続する必要がある。

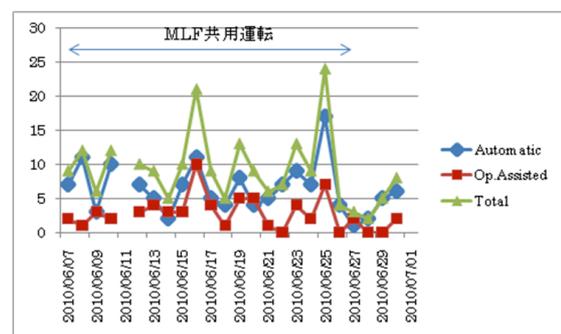


図 5. RFQ での 1 日あたりのトリップ回数
青：自動復帰、赤：運転員が復帰、緑：合計回数

3. RCS 320 kW 運転

3GeV シンクロトロン(RCS)は、リニアック回復前は 20kW、回復後は 120kW のビームパワーで MLF の共用運転を行う一方、50GeV シンクロトロン(MR)へも最大 300kW 相当のビームを供給している。現在

までに達成した RCS のパラメータと設計値を表 3-1 にまとめる。

表 3-1 : 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	120*
Particles/bunch		4.2×10^{13}	5.0×10^{12} *
Injection scheme (painting)		Transverse & longitudinal	Transverse & longitudinal
Tune excursion during acceleration		<0.005	~0.025
COD	mm	<1	<1 with BBA
Chromaticity		0 ~ 20ms w/AC p.s.	at injection w/DC p.s.
Stability of extracted beam orbit	mm	± 1 at QX3	± 0.5 at QX3
Beam emittance (un-normalized in full)	π mm mrad	54 for MR, 81 for MLF	~30[x]/30[y] for 120kW measured

*Consecutive 300 kW (for 1 hour) operations at 25 Hz were well demonstrated.

図 6 に MLF 供用運転時と大強度試験運転時の RCS 全周に亘る典型的なビームロス分布を示す。MLF 供用運転時のビームパワーは 120kW で、大強度試験時のビームパワー 300kW であった。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) 出射部、及び、(4) 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、現在クロマチシティ補正を入射エネルギーのみで行っているために発生したと考えられる。このロスを低減させるために、今夏の定期メンテナンス時に六極電磁石電源を入れ替え、全エネルギー領域でのクロマチシティ補正が可能となる。出射部のロスに関しては、ビーム試験を重ねた結果、ロスビームが直接ロスモニターをヒットしていたことが原因であり、大きなロスで無いことが判明した。これは、残留線量がほとんど観測されないこともその判断根拠である。最後に、入射部のビームロス、想定よりも大きな値である。今後 RCS からの出力ビーム強度を増加させるためには、入射部のビームロスの低減が最重要課題である。このロスの大きな原因の一つとして、荷電変換フォイルでの散乱が考

えられる。現在のところ、3 週間の供用運転終了後、約 6 時間後の真空チャンバー表面での最大残留放射線量は、約 1.5 mSv/h である。荷電変換フォイルの形状を最適化することで、このビームロスを低減させることを計画している。さらに、MLF と MR それぞれに最適化したビームを供給することが、今後の課題である。

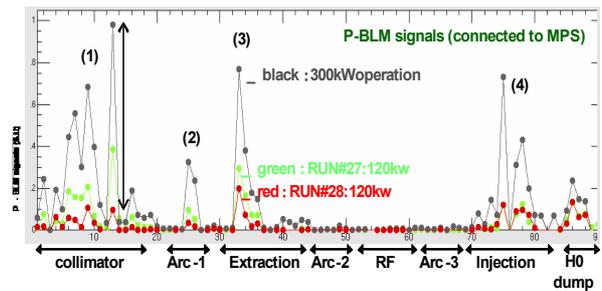


図 6. RCS でのビームロス分布

緑 : 120kW (RUN#27)、赤 : 120kW (RUN#28)、黒 : 300kW

4. MR 速い取り出し運転

2009 年の 4 月にニュートリノ・ビームラインのビーム・コミッションが開始されて以来、MR の加速器スタディと並行してニュートリノ・ビームラインの調整を進めて来たが、2010 年 1 月からは T2K グループが本格的な物理運転を開始した^[2]。夏期停止期間に入る直前の 6 月末までの間にニュートリノ・ターゲットに供給された陽子数は 3.3×10^{19} である。この間のビーム・パワーは 24 時間の連続運転では最大 50 kW でこれは KEK-PS の 10 倍以上の強度である。また、短時間のデモンストレーションとしては、100 kW で 3 分間程度の連続運転にも成功している。図 7 に 100 kW 運転における 1 サイクル (3.52 秒) の運動量変化、および DCCT で測定された周回ビームの強度変化を示す。ニュートリノ・ビームラインに取り出されたパルスあたりの陽子数は 7.5×10^{13} ppp で、シンクロトロンにおける加速粒子数としては BNL の AGS が持つ世界記録と同等である。入射時のビーム・ロスの総量は 100~200 W で、ロスの場所はリング・コリメータにほぼ集中している。

現在まで 100 kW で長時間の連続運転を行っていない理由は、速い取り出しキッカーのフェライト・コアが大強度ビームの wake によって発熱し、コアの透磁率が変化することで蹴り角にドリフトが生じるためである。もともと 2010 年夏に速い取り出しキッカーを立ち上がりの速い新型キッカーに入れ替える計画であるが、新型キッカーにおいては、ダンピング抵抗を用いたビーム結合インピーダンスの低減とコアの水冷システムを導入することにより、ビーム・パワーの設計仕様値 750 kW まではドリフトが生じないデザインになっている。

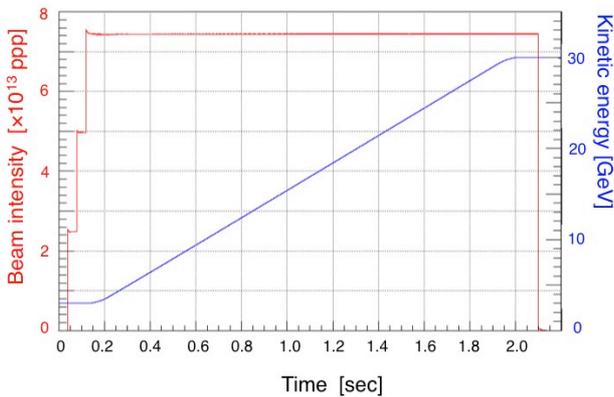


図 7. 速い取り出しの 100 kW 運転における周回ビーム強度と運動量変化

5. MR 遅い取り出し運転

MR における遅い取り出しには、3 次共鳴法が用いられる。現在、MR の遅い取り出しにおける最大の課題は、取り出されたビームのスピル構造を改善することである。MR では主電磁石電源の電流リップルに起因して、30 GeV ビームに対し ± 0.003 という大きなチューン変動が確認されている。このチューン変動のために、取り出されたビーム・スピルにはスパイク状の強度変化が生じ、利用実験において大きな障害となっている。この問題の解決策については、現在も検討が続いているが、2009 年秋以降は 3 台の四極電磁石を用いたスピル・フィードバック・システムが稼働を開始するとともに^[3]、四極電磁石に取り付けられた補助コイルを短絡して磁場リップルを低減する試み等が成果を上げており^[4]、スピル構造は着実に改善してきている。

図 8 に遅い取り出しによってビーム強度 1.9 kW のユーザー運転を行った際の 1 サイクル (6 秒) の運動量、および周回ビーム強度の時間変化を示す。ビームは加速終了後、約 2 秒間をかけて取り出される。ユーザー運転では、リップル対策として先に述べたスピル・フィードバック、および四極電磁石 117 台の補助コイル・ショートを用いている。

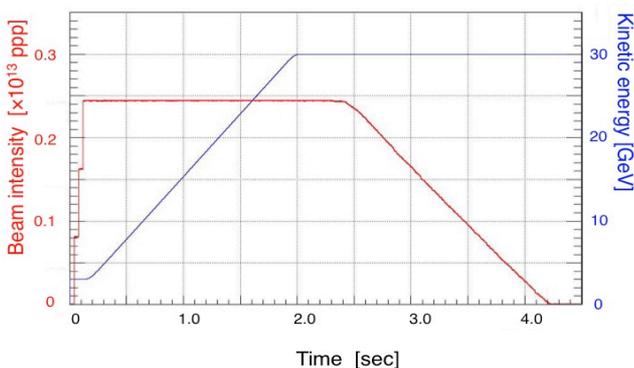


図 8. 遅い取り出しの 1.9 kW 運転における周回ビーム強度と運動量変化

6. LINAC エネルギー増強計画

平成 20 (2008) 年度にエネルギー増強計画が認可され、400MeV までの加速を行う環状結合型空洞 (Annular Coupled Structure, ACS) モジュールの製作を開始した^[5]。製作期間の短縮のため、工程の合理化とともに多数の空洞製作を並行に進め、平成 24 (2012) 年夏の据付を目指して量産を進めている。加工面でいくつかの問題点はあったものの、現状は順調に推移しており、ロウ付けが完了したもから順次組み立てに移行し、今秋には量産初号期の大電力試験を開始する予定である。

現場作業として、7 月～9 月の夏期シャットダウン期間を利用し、導波管やケーブルの敷設を行っている。また、クライストロン電源やクライストロン・ステーションの組み立ても順次進めている (図 9)。



図 9. 据付の進むクライストロン・ステーション

参考文献

- [1] M. Futakawa et al., "Pitting damage by pressure waves in a mercury target", J. Nucl. Material 343 (2005), pp. 70-80.
- [2] T. Koseki et al., "Challenges and Solutions for J-PARC Commissioning and Early Operation", Proc. IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, p. 1304.
- [3] M. Tomizawa et al., "Beam Commissioning of J-PARC Slow Extraction", THLH01 in these proceedings
- [4] S. Igarashi et al., "Magnetic Field Ripple Reduction of Main Magnets of the J-PARC Main Ring Using Trim Coil", Proc. IPAC10, Kyoto, Japan, p. 301.
- [5] Ao et al., "J-PARC LINAC ACS 加速空洞", WEPS074 in these proceedings