

J-PARC リニアックの現状

PRESENT STATS OF THE J-PARC LINAC

小栗英知
Hidetomo Oguri
J-PARC center

Abstract

J-PARC linac is being operated without any serious trouble in the past year. Since January 2013, the beam current extracted from the linac increased from 17 to 19 mA in order to increase the beam power delivered to the experimental facilities. The filament equipped to the ion source was broken after 1100 h operation. By the unusual quick maintenance, the beam operation was restarted with beam stop time of about 8 h. Because the trip rate of the klystron for DTL#2 increased, we replaced the klystron with spare in Feb. 2013. The linac power upgrade program is in progress. The new RF-driven H⁻ ion source has satisfied the requirements, both in current and in emittance. The fabrication of the new RFQ for 50 mA acceleration was completed, and the beam test will be started using the RFQ test stand. The fabrication of the ACS cavities and the 972 MHz klystrons has been finished. The pre-conditioning of all klystrons will be accomplished before the ACS gets ready. There are some issues for the present beam chopper system to be used for the 50 mA operation. An upgrade program of the RF chopper system is in progress. Bunch shape monitors were installed at the beam line and the commissioning was started in 2012. We successfully obtained the bunch profile of the H⁻ beam at the end of the SDTL cavities.

1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、RCS (Rapid Cycling Synchrotron) 及び MR (Main Ring synchrotron) の 3 つの加速器施設と、物質生命科学実験施設 (MLF)、ハドロン実験施設 (HD) 及びニュートリノ実験施設 (NU) の 3 つの実験施設で構成される。J-PARC 施設は、2011 年の東日本大震災の被害により一時運転を中止したが、同年 12 月より運転を再開した¹⁾。

J-PARC リニアックの震災復旧工事は、限られた予算と運転再開を可能なかぎり早期に行いたいという事情から、2011 年は加速器運転に必要な最低限の工事のみ行った。そのため、クレーン、床下空隙部及び建家外周道路等の補修は後回しとなった。運転中にもっとも懸念されたのは、クライストロンが故障し交換が必要になったとき、クレーンが使用できないため交換作業に多大な時間を要することであった。しかし幸いにも 2012 年の夏期メンテナンスま

でそのような事態は発生せずに済んだ。2012 年の夏期メンテナンスに併せて、建家の復旧工事を再開し、現在では建家内のすべてのクレーンが使用可能になるなど、建家の機能は震災から 2 年経ってようやく震災前の状態に戻った。

リニアックでは、ビームパワーの増強を行う予定である。これは J-PARC の最終目標であるビームパワー 1MW 化の一環として行うものであり、リニアックのエネルギーを 400MeV に、電流を 50mA にそれぞれ増強する予定である。本学会では、ここ 1 年間のリニアックの運転状況及び主なトラブル事例と、ビーム増強計画の進捗状況について報告する。

2. リニアックの運転状況

2012 年夏期メンテナンス終了後の 9 月から 2013 年 5 月までのリニアックの機器別停止時間を Figure 1 に示す。この期間で停止時間の最も長かった機器はクライストロン高圧電源 1 号機 (図中では

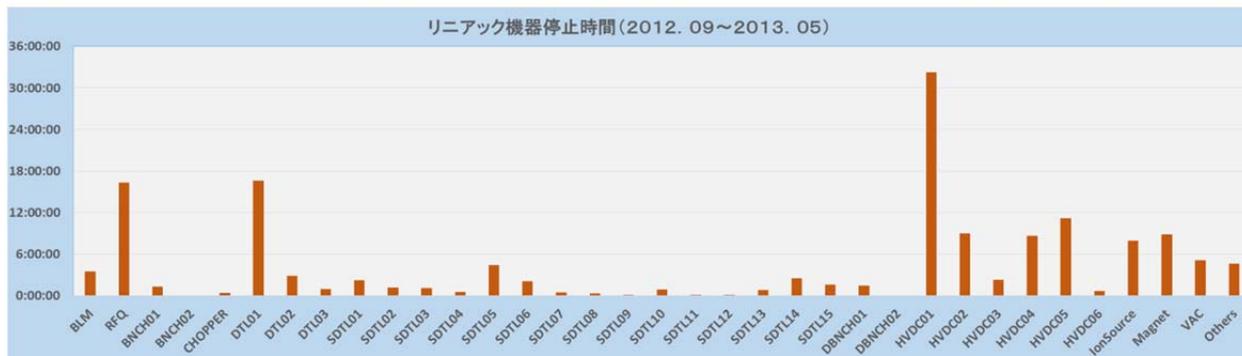


Figure 1: Beam stop time due to linac components (from Sep. 2012 to May 2013).

oguri.hidetomo@jaea.go.jp

HVDC01 と表記) であり、約 32 時間であった。これは、後述するように 2013 年 3 月に本電源の構成機器である電圧調整盤で不具合が発生し、その対策に 17 時間程度要したことに因る。2 番目に停止時間が長かったのはドリフトチューブリニアック 1 号機 (図中では DTL01 と表記) であった。これは、ドリフトチューブ内に収納している四重極電磁石用の電源で数回不具合が発生し、その修理に要した時間がほとんどを占める。次に長かったのは高周波四重極 (RFQ) リニアックであるが、これは 2009 年に放電が頻発するトラブルを起こして以来、常に上位に位置している。ただし、タンク内の真空圧力の改善やコンディショニングを頻繁に行うなどの措置が功を奏し、停止時間は年々減少している。

2.1 イオン源

現在稼働中のイオン源は、LaB₆ (六ホウ化ランタン) 製フィラメントを使用したアーク放電型負水素イオン源である。フィラメントの寿命を考慮してビーム運転は約 50 日 (1,200 時間) を 1 単位とし、イオン源からは 19mA のビーム電流で運転を行っていた。ビームユーザからの強い要望を受け、2013 年 1 月からは、ビーム電流を 22mA に上げた。ビーム電流を増やすためにアーク放電パワーを約 15% 上げたことが原因で、運転開始後約 1,100 時間にフィラメントが断線した。そのときのフィラメント電流の経時変化を Figure 2 (赤色プロット) に示す。フィラメント減少率比較のため、ビーム電流 17mA で 1200 時間以上運転した時の電流も合わせてプロットした (青色)。Figure 2 を見ると断線の約 10 時間前に電流が急減していることが分かる。当日はこの急変を断線の予兆と判断し、フィラメント交換の準備を整えていたため、交換作業を素早く行うことができ、断線から約 8 時間後にビーム運転を再開できた。これまでフィラメント断線に関するデータがほとんど無かったためフィラメント寿命評価は損耗量から外挿して行うしかなかったが、今回の事象で定量的な寿命評価が可能となった^[2]。

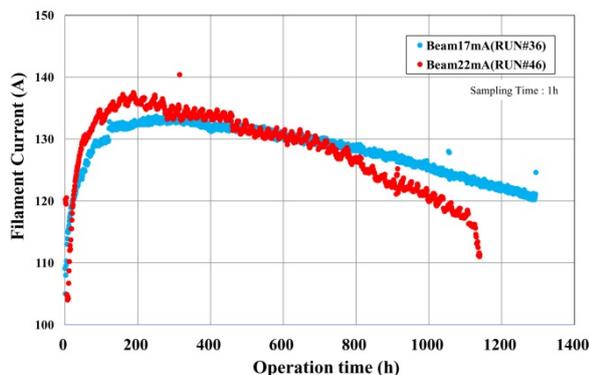


Figure 2: Trend of the filament current. (red: 1118h (broken), blue: 1200h over (not broken)).

2.2 SDTL 空洞

震災後の運転において、機能分離型ドリフトチューブリニアック (SDTL) の 5B 号機で設計運転電力付近の RF パワーを空洞に投入できない症状が発生した。2012 年の夏期メンテナンス直前の 7 月 2 日に測定した SDTL5A 及び 5B 号機における VSWR とクライストロン出力パワーの関係を Figure 3 に示す。震災前は、SDTL5B (赤プロット) は SDTL5A (緑プロット) と同傾向であったため、投入電力は設計値である 0.80MW で運転を行っていた。しかし震災後は、SDTL5B の 0.80MW における VSWR が運転を続けるとともに次第に大きくなった。そのため、SDTL5B の VSWR が SDTL5A と同程度になる 1.08MW までパワーを上げて運転せざるを得なくなった。シミュレーションや夏期メンテナンス時に実施した空洞内面調査結果から、この症状の原因は空洞内で発生しているマルチパクタである可能性が高いことが判明した。症状改善のために、50°C 程度の温水を使用したベーキングや、真空ポンプの増強及びオイルフリー化などの真空圧力改善対策を行った。さらにビーム運転前の空洞コンディショニングを慎重に行った結果、設計値までは回復しなかったが 0.87MW の出力パワーで運転可能となった。現在、定期的に SDTL5B の VSWR を測定しているが、やや悪化の傾向が見られるものの、運転時のパワーを上げるほどの悪化には至っていない^[3]。

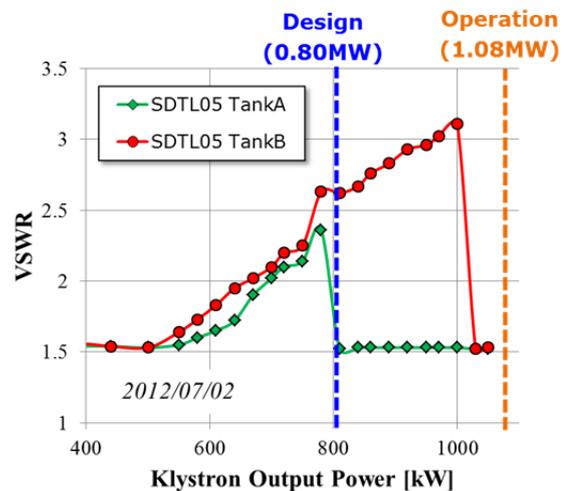


Figure 3: VSWR as a function of klystron output power at SDTL05A and 05B before 2012 summer shutdown.

2.3 クライストロン

2012 年夏期メンテナンス以降のビーム利用運転にて、クライストロン電源の特定号機で高圧停止の頻度が高くなり、加速器の稼働率が低下した。原因調査を行ったところ、アノード短絡によって生じる電磁/放射ノイズ等によりトリガ分配用 NIM モジュールが誤動作していることが判明した。誤動作対策として、モジュール基板のアースライン強化や、入出力回路にローパスフィルタを挿入するなどの措置を行い、現在、運転を続けながら経過観察を行っている。これに加え、アノード短絡箇所を特定する

ために DTL2 号機用クライストロンの交換作業を、2013 年 2 月に実施した。その結果、短絡箇所はクライストロン電子銃部のアノードボディ間で生じていることが判明し、従来考えられていた変調器側ではないことを確認した^[4]。

2013 年 3 月に、クライストロン高圧電源 1 号機が交流過電流により頻繁にダウンする現象が発生した。同年 3 月 18 日に電源を停止し原因調査を行ったところ、電圧調整盤 (AVR) のサイリスタ誤点弧によって過電流が発生していることが判明した。誤点弧はサイリスタのゲート回路へのノイズ侵入によるものと推定されたため、ゲート回路に種々のノイズ対策を施すことで当該電源を正常状態に復帰させることができた^[5]。

リニアックでは、中央制御棟からの光タイミング信号をクライストロンギャラリで受信し、これを各ステーションに分配している。現状のシステムは、光信号を一旦電気信号に変換し、FANOUT モジュールにて電氣的に分岐したあとに再度、光信号に変換して各ステーションに分配するという非効率的な構成となっている。そこで 2013 年の夏期メンテナンス時に、光アンプと光カプラを使用したシステムを新たに導入し、システムの簡素化により信頼性を向上を図る予定である^[6]。

3. リニアックビーム増強計画

リニアックでは、ビームパワーの増強を行う予定である。具体的にはビーム電流を現状の設計値である 30mA から 50mA に、またビームエネルギーを現状の 181MeV から 400MeV にそれぞれ増強する。現状及びビームパワー増強後のリニアックのレイアウトを Figure 4 に示す。ビーム電流の増強を行うために、初段加速部 (イオン源及び RFQ) を新しく設計/製作を行い、現行機と交換する。またエネルギーの増強を行うために SDTL の下流の現存のビームラインを撤去して、ここに環結合形 (ACS: Annular-ring Coupled Structure) 加速空洞を新設する。

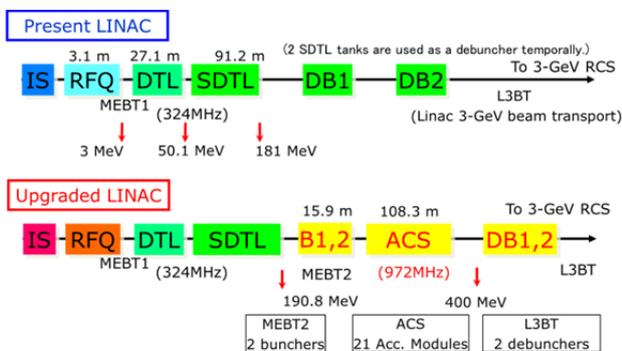


Figure 4: Schematic configuration of the present (upper) and upgraded (lower) J-PARC linac.

3.1 初段加速部

ビーム増強計画用のイオン源として、高周波駆動型負水素イオン源の開発を行っている。現在テスト中のイオン源の構造図を Figure 5 に示す。本機は、実機イオン源をベースにさまざまな改良を施している。ソースプラズマは 30MHz-RF を連続的に印加し、2MHz-RF をパルスの重畳して生成している。ビームの大電流化に有効なセシウムは、圧空バルブ開によりプラズマ生成室内に導入される。無酸素銅 (OFC) 製プラズマ生成室を使用したプロトタイプで既に目標である 60mA 以上のビーム電流を引き出すことに成功しており、現在、プラズマ生成室をステンレス鋼 (SUS) 製に変更して実験を行っている。材質を変更した理由は、交換部品で一体化したプラズマ真空容器をメンテナンス時に短時間で交換するためには、薄肉加工を施したステンレス鋼製プラズマ生成室を使用して軽量化する必要があるからである。これまでのところ、SUS 製プラズマ生成室は、OFC 製と比べてビーム電流の RF パワー効率若干下がるものの、ビーム電流の変動幅が小さい、セシウム添加時間及び添加量が少ないなどの特徴を示している^[7]。

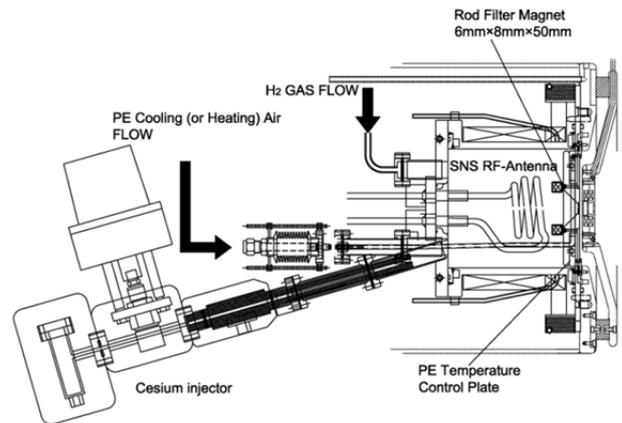


Figure 5: Cross-sectional view of the upgraded J-PARC ion source.

RFQ については、現在稼働中のものは 30mA 設計であるため、50mA 加速に対応した RFQ を新たに製作した。今回の製作においては、稼働中の RFQ で 2009 年に発生した放電多発事象からの教訓を活かし、空洞内の真空排気により有利な構造である真空ロー付け接合により空洞を製作し、かつ、高電界がかかる表面の面荒さの改善のために化学研磨を導入した。また、乾式加工を導入することで、製作工程の合理化を行った^[8]。新 RFQ は 2013 年 3 月に製作を終了し、Figure 6 に示す専用のテストスタンドにてビーム性能試験を行う計画である。本テストスタンドは、高周波負水素イオン源と新 RFQ で構成され、ビーム加速を行い RFQ の種々の特性を測定する。併せて長時間連続運転など負イオン源を含めた初段加速部の実用化に必要な試験も実施する予定である。本テストスタンドは、既に加速器機器の据付や、電流モ

ニタ及び位相モニタ等で構成されるビームモニタリングシステムの構築^[9]を終了している。また稼働中のリニアックと同等の加速器制御系を導入し、実験を効率良くまた安全に実施できる環境整備も終了している^[10]。

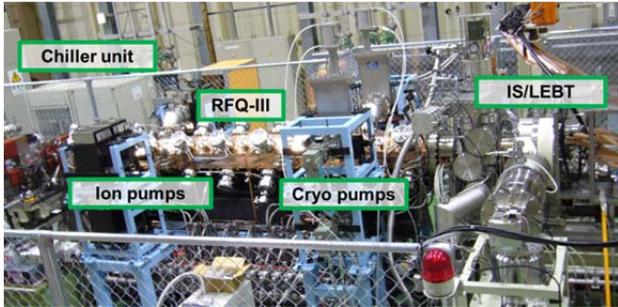


Figure 6: RFQ test stand for the beam acceleration test of new RFQ.

3.2 ビームチョップ

RFQ からのマクロパルスビームは、RFQ 下流に設置している高周波チョップ空洞によってその一部が蹴り出され、くし形構造を持つビームに整形され RCS に入射される。また、蹴り出されたビームは、高周波チョップ空洞から約 70cm 離れた場所に位置するスクレーパにて除去される (Figure 7 左)。現在稼働中のチョップ空洞に 50mA のビームを通すと、ビームがチョップの電極やビームパイプに衝突することがシミュレーション結果から判明している。そのため、現在、電極間隔を 4mm、パイプ径を 10mm それぞれ拡張した新たなチョップ空洞を製作中である。また電極間隔の拡張等により約 100kW の RF パワーが必要となるため、ピーク電力 120kW の半導体アンプも併せて製作中である^[11]。現在、炭素複合材を用いたスクレーパを使用しているが、Figure 7 の右側に示すとおり現在の 20 mA 程度のビーム電流においても既に表面の損耗が観察されている。そのため、50 mA 運転に耐えられるスクレーパ材の開発が必要である。現在、スクレーパ材料の選定や伝熱シミュレーションによる温度分布評価等を実施し、最適なスクレーパ材料の検討を行っている^[12]。

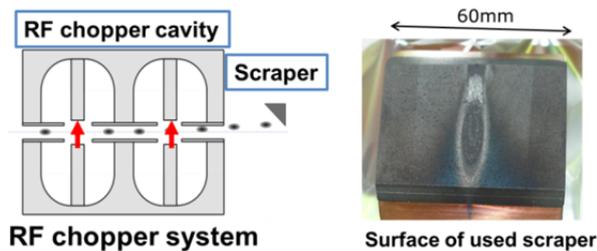


Figure 7: Conceptual layout of the RF chopper system (left) and photograph of used scraper surface (right).

3.3 ACS 加速空洞

リニアックのビームエネルギーを 400MeV に増強するために、ACS 加速空洞 25 台を新たに設置する。ACS 空洞及びこれを駆動するための 972MHz クライストロンは現在製作を終え、J-PARC 内で保管中である (Figure 8)。



Figure 8: ACS cavities (upper) and 972MHz klystrons (lower) waiting for the installation.

2010 年末に最初の ACS 空洞量産機である 4 号機 (21 台の内、上流から 4 番目に位置するもの) が完成し、2011 年初頭に大電力試験を開始した。しかし試験終了直後に震災が発生し、空洞を収める地下ピットが破損したため、残りの空洞の試験を中断する事態となった。2013 年春ようやく復旧工事が終了し、試験を再開した (Figure 8)。再開後は 2 台の空洞について試験を行い、いずれも定格以上の電力を投入することができた。1 台目は ACS 加速空洞 1 号機で、これは量産開始前に製作し、一度、大電力を投入していたため、初期のエイジング時に見られる大きな圧力上昇なく電力を投入できた。2 台目は 11 号機について行い、コンディショニングに約 60 時間程度要した。この所要時間は、前述の 1 号機及び震災直前に行った 4 号機と同程度であることから、他の空洞も 60 時間程度の時間でコンディショニングが完了すると予想できる^[13]。

3.4 バンチシェイプモニタ

現在稼働中のリニアックは 324MHz を使用しているのに対し、ACS 加速空洞は 972MHz を使用する。このため、ACS 加速空洞にビーム入射する際には、位相（縦）方向のマッチングが重要である。そこで、J-PARC ではロシア原子力研究所 INR（Institute of Nuclear Research）と共同で縦方向のビームプロファイルを測定するためのバンチシェイプモニタの開発を進めている。本モニタは 2009 年に設計を開始し、2010 年から 2011 年の 2 年間で 3 台を製作した。当初の予定では 2011 年夏期メンテナンス中に 1 台設置し、その後ビーム計測を開始する予定であったが、震災復旧の作業中であったためこの計画を見送り、すべてのモニタを 2012 年に設置した。現在、181MeV のビームを使用して稼働試験を実施中である (Figure 9) ^[14]。

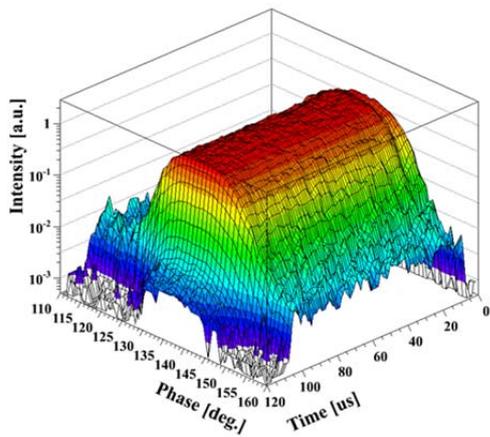


Figure 9: Example of bunch shape monitor measurement.

まとめ

J-PARC リニアックでは現在、ビーム利用運営を行うとともに、J-PARC の最終目標であるビームパワー 1MW 達成のためのビーム増強を計画している。ここ 1 年間のビーム利用運営においては、クライストロン高圧電源のトラブルによりビーム運転が 17 時間程度停止した重故障が一度発生した以外は、加速器の稼働率に大きな影響を及ぼすトラブルは発生していない。2009 年に放電問題を起こした RFQ についても、最近では 1 日当たりのトリップ回数が 10 回以下であり、安定に動作している。

ビーム増強計画については、更新用の初段加速部、及び新設する ACS 加速空洞の製作を 2013 年春に終了している。初段加速部については、専用のテストスタンドを使用してビーム加速試験等を行い、ビームラインに据え付ける前に、バグ出し及び必要に応じて改良等を行っていく予定である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa, “J-PARC 加速器の現状”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2012
- [2] K. Ohkoshi et al., “J-PARC イオン源の運転状況”, SUP038, in these proceedings
- [3] T. Ito et al., “J-PARC SDSL 空洞内マルチバクダ対策”, SUP048, in these proceedings
- [4] T. Hori et al., “J-PARC リニアック クライストロン高圧電源停止頻度の改善”, SUP053, in these proceedings
- [5] 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 2013”, SAP061, in these proceedings
- [6] K. Futatsukawa et al., “J-PARC リニアック RF チョップ用の高周波源システムの改造”, SUP092, in these proceedings
- [7] I. Koizumi 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”, SAP032, in these proceedings
- [8] T. Morishita et al., “Fabrication of the RFQ-III for the J-PARC Linac Current Upgrade”, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 2013
- [9] T. Miyao et al., “J-PARC RFQ テストスタンド用ビームモニタリングシステム”, SUP066, in these proceedings
- [10] S. Fukuta et al., “J-PARC RF イオン源&RFQ III テストスタンドの制御系の構築”, SUP085, in these proceedings
- [11] K. Hirano et al., “J-PARC リニアックチョップシステムの開発”, SUP016, in these proceedings
- [12] T. Sugimura et al., “J-PARC LINAC 3MeV ビームスクレーパーの開発”, SUP017, in these proceedings
- [13] J. Tamura et al., “J-PARC リニアックのエネルギー増強に向けた ACS 空洞大電力試験の再開”, SAP016, in these proceedings
- [14] A. Miura et al., “J-PARC リニアック用バンチシェイプモニタの開発”, SAP088, in these proceedings