

BEAM COMMISSIONING OF J-PARC LINAC

Masanori Ikegami^{1,A)}, J-PARC linac beam commissioning team^{A) B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 170-0013

Abstract

J-PARC linac has been beam-commissioned from November 2006 to June 2007. During that period, eight beam commissioning runs of 2 to 3 weeks have been conducted, aiming at realizing the beam conditions necessary for the coming RCS (Rapid Cycling Synchrotron) beam commissioning. The basic beam commissioning has been completed in the series of commissioning runs, which includes the acceleration of the beam up to the design energy of 181 MeV, the transverse matching, the chopper operation, and the debuncher operation. Highlights of the commissioning runs are reviewed in this paper, and the remaining issues for the future tuning are discussed.

J-PARC リニアックのビームコミッションング

1. はじめに

J-PARC リニアック [1] は 2006 年夏にインストールが完了し、2006 年 9 月からの高周波空洞の高電力コンディショニングを経て、2006 年 11 月よりビーム加速試験（ビームコミッションング）を開始した。このリニアック単独のビーム加速試験は 2007 年 6 月まで行い、夏期のシャットダウンを挟んだ後、下流の 3 GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) も含めたビーム試験として 2007 年 9 月より再開する予定となっている。本稿では、2006 年 11 月から 2007 年 6 月まで行われたリニアック単独のビーム試験について、各ランのハイライトを紹介するとともに、今後のビームコミッションングの課題について議論したい。

J-PARC リニアックのビームコミッションングの進捗状況については、とくにその前半部分について、これまでいくつかの小論で報告されている [2-5]。また、ビームコミッションングの後半で行われたチューニングのいくつかについては、本会で別途詳細な発表が予定されている [6, 7]。これらのことを考慮し、本稿では、極力重複を避けるため、個々のランで行われたスタディーの詳細については他の文献に譲り、適宜、参考文献を参照しつつ、コミッションング全体のおおまかな流れを紹介するとともに、今回のコミッションングで達成した点、今後の課題として残されている点の整理を行いたい。

2. J-PARC リニアックとそのチューニングの基本方針

J-PARC リニアックは、50 keV の負水素イオン源、3 MeV の RFQ (Radio Frequency Quadrupole linac)、50 MeV の DTL (Drift Tube Linac)、181 MeV の SDTL (Separate-type DTL) からなる。出射エネルギー

は、ACS (Annular Coupled Structure linac) 部を追加することによって 400 MeV への増強が計画されているが、今回のビーム試験は 181 MeV で行われた。

主な設計値は、ピーク電流 30 mA、パルス幅 0.5 ms、繰り返し 25 Hz、チョッパービームオン比 56% であり、チョッピング後のビーム出力は 36 kW となる。今回のビームコミッションングでは、4 つあるビームダンプのうち 2 つだけが利用可能となっており、加速できるビーム出力はそのダンプの容量（1 時間平均で 0.6 kW）によって制限されている。

今回のビームコミッションングは、RCS のビームコミッションングの開始に必要なビーム条件の確保を最優先課題として行われたが、そのために必要な典型的なビームパラメータは、エネルギー 181 MeV、ピーク電流 5 mA、パルス幅 0.05 ms、繰り返し 5 Hz である。また、RCS でのビームロスを軽減するためのチョッパーの運転と、RCS 入射時の運動量広がり制御のためのデバンチャーの運転も必須となる。このような状況を考慮して、今回のビームコミッションングにおいては、まずピーク電流 5 mA で一通りのチューニングを完成し、その後ピーク電流 30 mA のチューニングに移ることとした。また、ピーク電流 5 mA のチューニングにおいては、まず縦方向のチューニング (RF の振幅・位相設定) を行い、次に横方向のチューニング (横マッチングと軌道補正) を行うことを基本方針とした。

今回のビームコミッションングでは、2 週間のビーム運転 (ラン) と 1-2 週間の休止期間を組み合わせた 3-4 週間のサイクルを基本サイクルとし、2006 年 11 月から 2007 年 6 月までの期間に 8 つのサイクルを行うことによって、リニアック単独のビームコミッションングを行った。

なお、リニアックの初段部 (イオン源から第 1

¹ E-mail: masanori.ikegami@kek.jp

DTL空洞まで)については、2004年までにKEKのつくばキャンパスでビーム試験を行っており[8-11]、制御系等、置き換えられている部分もあるものの、基本的には、今回のビーム試験は、東海のJ-PARCサイトへ移設後の再現性確認試験ということとなる。

3. 各ランのハイライト

3.1 ラン1～4 (2006年11月から2007年2月)

2006年11月に行われたラン1では、RFQによる3MeVまでの加速試験を行った。つくばでのビーム試験を終えてから2年以上を経過してのビーム試験となったが、ビーム試験を開始したその日にピーク電流5mAでの加速を達成し、翌日には30mAでの加速を達成した。

翌月に行われたラン2では、DTLによる50MeVまでの加速試験を行った。RFQでの加速試験はRFQとDTLの間に設置されたビームストッパーでビームを止めて行われたが、残留放射線による問題を避けるため、DTL以降、300m下流の0度ダンプまでビームライン上にビームストッパーは設置されていない。したがって、DTLによる加速試験は、DTLのみで加速した低エネルギーのビームを0度ダンプまで輸送して行う必要があった。このビーム輸送の確立には困難が予想されていたが、実際、ビームを入射してみると、補正電磁石を使うことなく、数分のうちに透過効率ほぼ100%のビーム輸送を確立することができた。ビーム輸送を確立した後、位相スキャン法によって、DTL3空洞の振幅・位相の調整を行った。この調整の詳細については、参考文献[6, 12]を参照されたい。

ラン3では、ラン4で施設検査の運転時検査を受検することを目指し、そのための条件確保を目標にビーム試験を行った。運転時検査受検の前提条件として、定格エネルギーである181MeVのビーム加速が必須となる。そこでラン3では、短時間のうちにSDTLの振幅・位相調整を粗く行い、181MeV加速の達成を目指した。図1は、2007年1月24日、181MeV加速を達成した際の記念撮影である。ここまでのビーム試験で達成したビームパラメータは、エネルギー181MeV、ピーク電流5mA、パルス幅0.05ms、繰り返し2.5Hz、ビーム出力120Wである。

ラン4では、ラン3の結果を受けて、運転時検査を受検し、無事合格することができた。また、このランでは運転時検査の準備の合間を縫って、チョッパー運転やシングルショット運転など、RCSのビームコミッションングで要求されている多彩な運転も達成している。

このように運転時検査の受検を急いだ背景には、J-PARC全体の放射線申請の計画、リニアックの合格が遅れば後続の各施設の申請スケジュール、ひいては建設スケジュールに大きな影響を与えかねないという事情があった。リニアックでは、当初の計画より2ヶ月ほど早く運転時検査に合格することができたが、このことは、早期にこのようなリスクを回避できたという意味で、我々にとって大きな意義をもつものであった。



図1. 181MeV加速達成の記念撮影 (2007年1月24日)

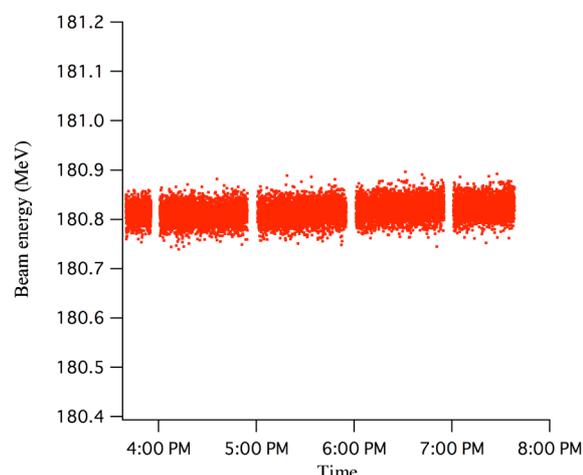


図2. リニアック出射エネルギーの安定性

3.2 ラン5、6 (2007年3月～4月)

運転時検査合格というマイルストーンを達成した後、ラン5ではSDTLの振幅・位相調整を、ラン6では横方向のマッチングと軌道補正を、時間をかけて詳細に行った。この時期にはコミッションングに用いるソフトウェア基盤も整いつつあり[13, 14]、それらを活用したアプリケーションソフトウェアを用いた、効率的で精密なチューニングが行われた。ラン5で行われたSDTLのチューニングについては、参考文献[6, 15]を、ラン6で行われた横マッチングについては、参考文献[7]を参照されたい。

3.3 ラン7、8 (2007年5月～6月)

ラン6で、ピーク電流5mAの基本的なチューニングが完成したことを受け、ラン7では、高ピーク電流の運転にトライした。ピーク電流30mAの運転はラン1で達成しているが、その後、ピーク電流の安定性の向上やフィラメントの長寿命化を狙ってイオン源およびイオン源電源に手を加えたこともあり、このランでは残念ながらピーク電流は30mAに達せず、ピーク電流26mAでの運転となった。このランでは、

エネルギー181MeV、パルス幅0.05ms、繰り返し2.5Hz、ビーム出力550Wの運転を行い、ピーク電流26mAのビームが問題なく加速できることを確認した。また、ピーク電流が増えたことに伴って、RFのフィードフォワード制御を行うとともに、横チューニングを再度行っている。

このランではまた、ビームの安定性についての測定も開始した。その一例として、最下流（デバンチャー2の下流）でTOF法によって測定したビームエネルギーを図2に示す。この図から出射エネルギーが数時間に渡って概ね $\pm 0.05\text{MeV}$ 、運動量で $\pm 0.015\%$ の範囲で安定していることがわかる。重心運動量の安定度の設計値は $\pm 0.025\%$ であるので、より長時間のドリフトの確認は今後の課題であるが、数時間のタイムスケールでは設計値を満たす安定度が得られていることとなる。

ラン8では、これまでに積み残してきたこまごまとした調整を行うとともに、ピーク電流を5mAに戻し、ビームダンプ容量の許す範囲内でデューティファクターを上げる試験を行った。繰り返しを2.5Hzに保ったまま、パルス幅を0.25msにのぼす試験（ビーム出力：570W）や、パルス幅を0.05msに保ったまま、繰り返しを25Hzに上げる試験（ビーム出力：1.1kW、30分保持）を行い、デューティファクターを上げることによって運転に支障が生じないことを確認した。

4. 今後の予定と課題

J-PARCリニアックでは、上述のように8回のビームコミッショニングランを完了し、当初の目標であったRCSのビームコミッショニング開始に必要なビーム条件を確保するという所期の目標は十分に達成できた。前述のように、2007年9月からビーム試験を再開する予定となっているが、このビーム試験においてはRCSのビームコミッショニングが中心的な課題となるため、リニアックについては、今後、その合間を縫ってチューニングを進めていくこととなる。

9月以降のビーム試験におけるリニアックの主な課題として、次の4つを上げることができる。

- イオン源のR&D
- エミッタンス増大の原因究明と対策
- ビームロスの軽減
- ビームの質の評価

まず、イオン源については、ピーク電流の増大だけでなく、デューティファクターの向上、長寿命化などを含め、総合的な観点から今後もR&Dを進めていく必要がある。

次に、エミッタンスについては、プレリミナリーな測定ではあるが、ピーク電流26mA時に正規化rmsエミッタンスが $0.4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 前後（デザイン値： $0.3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ）であるという測定結果が得られており、その改善が求められる。

ビームロスについては、ラン8の直後の残留放射線サーベイ（ビーム停止6時間後、表面測定）で約 $30\mu\text{Sv/h}$ の線量が局所的に観測されている。この線

量はにわかには問題となるレベルではないが、今後数十倍のビーム出力増強を目指していく上では、さらなるビームロス率の軽減が求められる。

最後に、より精密なビーム調整を遡求するにあたって、現在達成しているビームの質を精密に評価することが不可欠であり、長期の安定性も含め、運動量広がり、エミッタンス等、基本的なパラメータをより精密に測定していかなければならない。

5. まとめ

J-PARCリニアックでは、2006年11月から2007年6月にかけてビームコミッショニングを行い、予定していた8回のビーム試験を終了した。このビーム試験の中で、当初の目標であったRCSのビームコミッショニングに必要なビーム条件を十分に達成することができた。今後は、夏期のシャットダウンを経て、2007年9月から開始されるRCSのビームコミッショニングの合間を縫って、より高い安定性やより高いビーム出力を目指したチューニングを行っていくこととなる。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "J-PARC Technical Design Report", KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-44.
- [2] 池上雅紀, "J-PARCリニアックにおける181MeV加速の達成", 高エネルギーニュース, 25巻4号(2007年3月), p. 177-189.
- [3] M. Ikegami, A. Ueno, "Commissioning experience and plans for J-PARC linac", Procs. of ICANS-XVIII, to be published.
- [4] K. Hasegawa, "Commissioning of the J-PARC linac", Procs. of PAC2007, to be published.
- [5] 池上雅紀, "J-PARCリニアックのビームコミッショニング", 加速器, 4巻2号(2007年7月), p. 99-111.
- [6] G. Shen et al., "Tuning of RF amplitude of phase for J-PARC DTL and SDDL", in these proceedings.
- [7] 佐甲博之他, "J-PARCリニアックコミッショニングにおける横マッチング調整", in these proceedings.
- [8] A. Ueno et al., "Beam test of a front-end system for the JAERI-KEK Joint (JKJ) Project", Procs. of LINAC2002, p. 356.
- [9] M. Ikegami et al., "Beam commissioning of the J-PARC linac medium energy beam transport at KEK", Procs. of PAC2003, p. 1509.
- [10] F. Naito et al., "Results of the high-power conditioning and the first beam acceleration of the DTL-1 for J-PARC", Procs. of LINAC2004, p. 300.
- [11] Y. Kondo et al., "Beam dynamics and commissioning of the J-PARC linac", Procs. of ICFA-HB2004 Workshop, AIP Conference Proceedings 773, 2004, p. 79.
- [12] M. Ikegami et al., "RF amplitude and phase tuning of J-PARC DTL", Procs. of PAC2007, to be published.
- [13] 佐甲博之他, "J-PARC linacにおける単位変換チャンネルアクセスサーバの開発", in these proceedings.
- [14] 池田浩他, "J-PARCリニアックのビームコミッショニング用スクリプトインタプリタの開発", in these proceedings.
- [15] G. Shen et al., "RF amplitude and phase tuning of J-PARC SDDL", Procs. of PAC2007, to be published.