

J-PARC リニアックにおける 400 MeV 増強後のビーム加速試験の進捗 PROGRESS OF BEAM COMMISSIONING AT J-PARC LINAC AFTER 400 MEV UPGRADE

丸田朋史^{*A)}、劉勇^{A)}、三浦昭彦^{B)}、佐甲博之^{B)}、ニツ川健太^{A)}、宮尾智章^{A)}、池上雅紀^{C)}
Tomofumi Maruta^{*A)}, Liu Yong^{A)}, Akihiko Miura^{B)}, Hiroyuki Sako^{B)}, Kenta Futatsukawa^{A)},
Tomoaki Miyao^{A)} and Masanori Ikegami^{C)}

^{A)}J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)}J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{C)}Facility of Rare Isotope Beams, Michigan State University

Abstract

In J-PARC linac, the annular-ring coupled structure (ACS) accelerator was installed at SDTL downstream to extend the beam energy to 400 MeV. The first beam commissioning after the upgrade was started at December 16, 2013. And then we successfully achieved 400 MeV at January 17, 2014. From February 16 to the end of June, we stably operate J-PARC linac with the peak current of 15 mA, which is equivalent to the beam power of 300 kW at the extraction of 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron. In this paper, we discuss the progress of beam commissioning.

1. はじめに

2013年にJ-PARCリニアックは、ビームエネルギーを181 MeVから本来の設計エネルギーである400 MeVに回復させるため、大規模な改造を実施した。その年の12月16日からリニアック単独のビーム加速試験を始め、2014年1月17日に400 MeVの加速に成功した。その後1月30日から3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)のビーム加速試験を実施し、2月16日から6月末までピーク電流15 mAで利用運転を行った。

J-PARCリニアックは図1に示すとおり、負電荷水素(H⁻)イオン源、3 MeV Radio Frequency Quadrupole (RFQ)、50 MeVドリフトチューブリニアック(DTL)、191 MeV機能分離型DTL(SDTL)、400 MeV環状結合型(Annular-ring Coupled Structure, ACS)リニアックによって400 MeVまでビームを加速し、次段加速である3 GeV RCSにビームを供給している。またRFQからDTL、SDTLからACSの間にはビームの縦・横方向を調整するために、中間エネルギービーム輸送系(MEBT1、MEBT2)が設置されている。ACSセクションの下流から3 GeV RCS入射点までは、Linac to 3 GeV RCSビーム輸送系(L3BT)である。各空洞のRF周波数はRFQからSDTLまでが324 MHz、MEBT2以降が3倍の972 MHzである。J-PARCリニアックにはビーム加速試験のため、3カ所にビームダンプが設置されている。リニアック直線部の延長線上には0度ダンプ(OBD)、第一アークセクションの30度偏向した延長線上に30度ダンプ(30BD)、第二アークセクションに100度ダンプ(100BD)がある。

J-PARCリニアックの建設は二期計画に分かれている。このうち第一期ではイオン源からSDTLを構築し、ビーム運転を行った。SDTLは32空洞あるが、このうち最下流の2空洞をL3BTセクションに設置し、RCS入射ビームの縦方向調整用のデバンチャー空洞として使用したため、3 GeV RCSへの供給エネルギーは181 MeVで

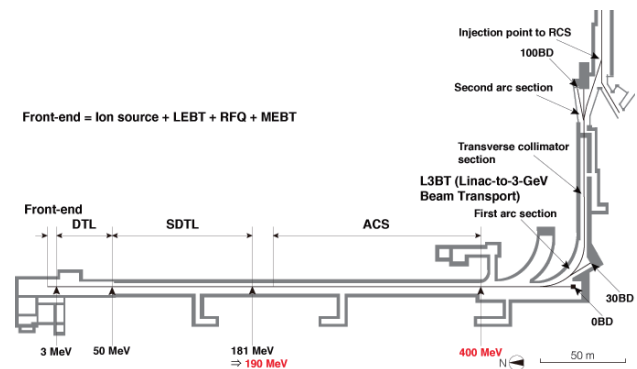


Figure 1: J-PARC リニアック全体図。第一期では、イオン源からSDTLまでをビームラインに設置し、181 MeVでビーム運転を行っていた。第二期ではACSを増設し、ビームエネルギー400 MeVで運転している。

あった。J-PARCリニアックのビーム運転は2008年に開始した。精力的にビーム加速試験を実施した結果、2013年のビーム運転終了時にはピーク電流15 mA (RCS出口で300 kW相当)で安定的にビームを供給した^[2]。その一方、第二期計画で設置するACSリニアックの開発はJ-PARC建設当初から進めており、2013年のビーム停止期間中にビームラインへ設置した。

本論文では、ACS増設後に行ったビーム加速試験について報告する。

2. ACS増設後初のビーム加速試験

ACS増設後、リニアック単独のビーム加速試験を2013年12月16日に開始し、年末年始の休暇をはさみ2014年1月30日まで行った。この調整試験の目的は、400 MeVのビーム加速、ピーク電流15 mAおよび大強度試験用25 mA運転パラメータの作成である。

*tmaruta@post.j-parc.jp

2.1 400 MeV の達成

フロントエンドの調整後、各加速空洞の位相とタンクレベルを位相スキャン法によって上流側から1台ずつの調整した。調整する空洞から出力されたビームのエネルギーを、空洞下流に設置した2台の位相検出器間の位相の進み(時間)と位相検出器間の距離から計算する。計算されたエネルギーと空洞の設定(位相・タンクレベル)の相関をシミュレーションと比較することにより最適な設定値を求める。位相スキャンは5 mA のピーク電流で行った。位相スキャン中にビームエネルギーが変化するため、Q磁石による横方向の収束力とビームエネルギーのミスマッチにより、ビームがダンプまで届かず、途中でロスする可能性がある。また増設したACSセクションで予期せぬビームロスが発生する可能性もある。そのような場合にビームロスを最小限に留めるため、ピーク電流5 mA で位相スキャンを行った。このピーク電流はJ-PARC リニアックで安定的に運転した経験のある一番低い電流である。SDTL までの位相スキャンは順調にすすみ、12月20日にはACS増設以前の運転エネルギーである181 MeV を達成した。

SDTL より下流の位相検出器は、空洞増設に伴って設置したものである。したがって位相検出器からエネルギーを計算したことが無く、測定精度が我々の要求を満たしているか確認していなかった。そこで181 MeV のビームを下流まで通し、各空洞用の位相検出器の測定結果から計算したエネルギーが、181 MeV からどの程度誤差があるか調べた。エネルギーの計算精度には、位相検出器間の距離の精度なども影響するが、位相検出器自体の時間分解能はおよそ60 psec である。これは運動量で0.05%、エネルギーで0.1%に相当する。それに対し、エネルギーの測定結果は、いくつかの位相検出器で最大5%のずれていた。このような大きなずれは根本的に何か誤りがないと起こりえないため、加速試験を一時中断して原因を調査したところ、位相検出器の出力信号から位相への変換係数に間違いが見つかった。再校正を実施し、再度181 MeV のビームでエネルギーの計算精度を確認したところ、全位相検出器で求めたエネルギーの二乗平均平方根(RMS)は約0.2%であり、SDTL セクションと同等の精度となった。また、新しく設置したビーム位置検出器(BPM)についてビームベースアライメント(BBA)を実施した。12月は30日朝まで加速試験を行い、ACS14 までの位相スキャンを完了した。ビームエネルギーにして325 MeV である。

1月の加速試験は7日から開始した。本来ならば12月に引き続きACS15以降の位相スキャンを実施して400 MeV を目指すところだが、一部ACS用サーキュレータで放電が多発し、改修が必要だった^[3]。そこで7日から9日は上流部分の15mA 運転用の調整を行い、その裏でサーキュレータの改修と空洞のコンディショニングを実施した。さらに10日から15日はビーム加速試験を中断し、ACS空洞のコンディショニングを実施した。16日にACS15以降の位相スキャンを再開し、400 MeV は翌日17日に達成した。400 MeV の確認を2種類の方法で実施した。ひとつはTime-of-Flight (TOF) 法によるエネルギーの測定である。ビームライン上の2つの位相モニターで測定した位相から算出したTOFと位相モニター間の飛行距離からエネルギーを計算した。すでに述べた

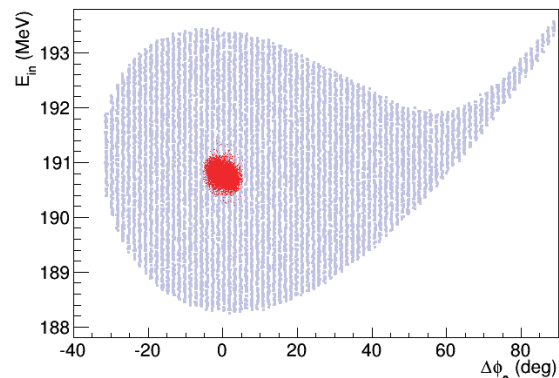


Figure 2: 3D PIC コードで求めた ACS の縦方向アクセプタンスと入射ビーム分布 (赤)。

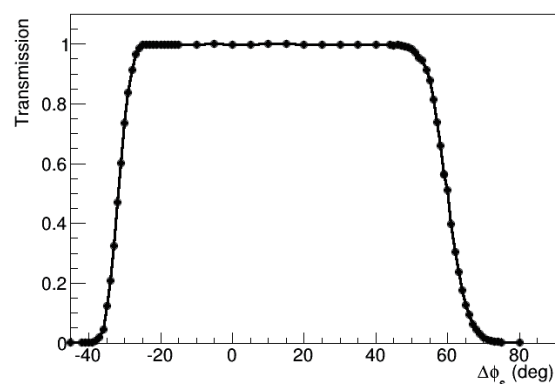


Figure 3: アクセプタンススキャンで測定した、ACS 空洞の運転位相からのずれと 100BD へのビーム透過率の関係。

ように、位相検出器を用いたビームエネルギーの測定精度は約0.1%である。ただしこの方法では位相モニター間の位相の回転数に不定性があり、その不定性は運動量で約5%、エネルギーで約10%である。この不定性を補償する必要があり、そのためもうひとつの方法である30度ダンプ(30BD)へのビーム透過率を測定した。30度ダンプは図1に示したとおり、第一アークセクション途中で分岐して設置されている。30度ダンプまでのベンド磁石を400 MeV ビーム用に設定したので、ビームエネルギーが400 MeV から大きく異なる場合、軌道を外れ透過率が著しく低下する。また、アークセクションの運動量分散が約0.55mの位置に設置されたBPMでビーム軌道を測定した結果、ビームエネルギーは400 MeV から0.08%以内であることが分かった。

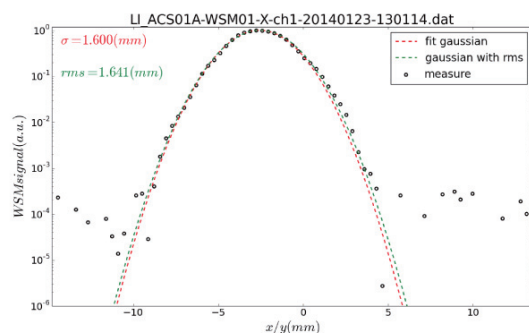
2.2 ACS 縦方向測定

位相スキャンによるACS空洞の調整がどの程度か確認するため、ACS加速器の縦方向が設計とどの程度一致しているか確認するため、位相方向のアクセプタンスを測定した。図2の青い範囲が3D Particle-in-Cell コード(IMPACT)で求めたACSのアクセプタンスである。比較のため、入射ビーム分布を赤点で示した。位相方向のアクセプタンスは、位相方向に-30から60度の全

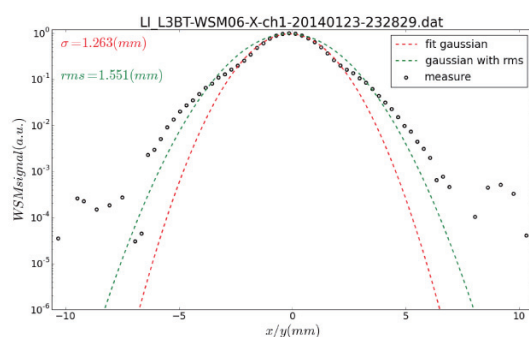
幅 90 度、エネルギー方向に 188.2 から 193.4 MeV の全幅 5.2 MeV の範囲であり、ビームに対してかなり余裕のあることが分かる。実験では、ACS 全空洞の運転位相を一律にずらした場合に 100BD へのビーム透過率がどのように変わるか測定した。ACS 全空洞の位相をずらすのは、ACS のアクセプタンスを位相方向にシフトさせることに等しい。アクセプタンスの外側のビームは ACS で加速されず、191 MeV 前後のエネルギーで出てくる。アークセクションのベンド磁石は、400 MeV のビームが中心軌道を通るように設定しているため、ACS で加速されなかったビームは、アークセクションでビームラインから外れてロスする。したがって 100BD への透過率は、全ビーム粒子のうち、アクセプタンスの内側にいる粒子の割合に等しい。測定結果を図 2.1 に示す。ビーム透過率が 0.5 のときにビームがアクセプタンスのエッジにいと仮定すると、アクセプタンスの幅は 92 度になり、シミュレーションとほぼ一致した。

2.3 ビームプロファイル

既に述べたように、ACS の RF 周波数は SDTL の 3 倍であるため、ACS 入射ビームの縦方向調整は重要である。調整のためバンチャー空洞 2 台を MEBT2 に設置している。また調整には縦方向の測定が不可欠であるため、MEBT2 から ACS 入射部に位相方向を測定す



(a) ACS 入射ビームのプロファイル



(b) ACS 出口のビームプロファイル

Figure 4: ACS の入射部 (a) と出射部 (b) のビームプロファイルの比較。ノイズレベルは 10^{-4} である。ビーム電流は 25 mA、ビームエネルギーは (a) が 191 MeV、(b) が 400 MeV である。図中の赤い破線はプロファイルをガウス関数でフィットした結果、緑の破線は求めた RMS を σ に代入したガウス関数である。

るバンチシェープモニター^[4] (BSM) 3 台を設置する計画であった。ACS 増設前に BSM の性能を確認するため 2012 年にビームラインに設置し、その年のビーム加速試験で性能確認を行った^[6]。その結果、BSM が縦方向調整に必要な性能を有していることを確認した。しかしながら、BSM の測定中に真空が悪化し^[5]、たびたび Machine Protection System (MPS) が発報した。このままでは ACS 増設後に近くの空洞に悪影響を及ぼす可能性があったため、ACS 増設のタイミングで BSM をビームラインから取り外し、オフラインで真空系の増設等の改善を実施することにした。そのためバンチャーの振幅はシミュレーションの結果をもとに決めているため、大きなミスマッチが発生している可能性がある。図 4 に ACS セクション入出射部にあるワイヤースキャナー (WSM) で測定したビームプロファイルと、ガウス関数によるフィッティング (赤い破線)、および RMS をガウス関数の σ に代入した場合の分布である。WSM のダイナミックレンジは約 10^{-4} であるため、このレンジの信号はノイズである。ACS 入射部の分布 (図 4(a)) では緑と赤の破線がほぼ重なっているのに対し、出射部の分布 (図 4(b)) は緑が赤の破線よりかなり太くなっている。ガウス関数によるフィッティングがビームのコアの影響を強く受けるのに対し、RMS はビームハローの影響も受けるため、ハローが増加するにしたがって、 σ より RMS が相対的に大きくなる。したがって ACS 入射部と比較して、出射部のビームハローが増加していることが分かる。ACS 入射部の横方向マッチングの精度は他のセクションと同程度を達成しており、このような大きなハローが横方向起因で発生したとは考えにくい。最も可能性が高いのは、縦方向のミスマッチが空間電荷効果による縦・横方向結合によって横方向にハローを発生させる場合である。今後 BSM をビームラインに設置すれば縦方向のマッチングが可能になるため、ハローを低減できるのではないかと考えている。

3. まとめ

J-PARC リニアックの ACS 加速器増設後にビーム加速試験を行い、2014 年 1 月 17 日に 400 MeV のビーム加速に成功した。また縦方向アクセプタンスの測定より、ACS の縦方向性能がほぼ設計通りであることを確認した。一方、横方向ビームプロファイルには、ACS 部で縦方向のミスマッチに起因していると考えられるハローが発生しており、今後ビーム調整精度の向上が必要である。J-PARC リニアックでは現在ビーム電流向上のため、フロントエンド部の改造工事を行っており、これによりピーク電流 50 mA の運転が可能となる。ビームパワーとビーム品質向上のため、今後もビーム加速試験を継続的に行う計画である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC", KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [2] M. Ikegami, "Beam commissioning and operation of the J-PARC linac", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B002.
- [3] K. Futatsukawa, et al., "Discharge of the 972 MHz Circular at J-PARC Linac", in these proceedings.

PASJ2014-SUP011

- [4] A. V. Feschenko, “Methods and instrumentation for bunch shape measurements”, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (PAC2001), Chicago, U.S.A., June 18-22, 2001, pp. 517-521.
- [5] A. Miura, et al., ”Bunch Length Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac”, Proceedings of The 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013), Shanghai, China, May 12-17, 2013. pp. 532-534.
- [6] M. Ikegami, et al., ”Recent Progress in Beam Commissioning of J-PARC Linac”, Proceedings of The 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC2013), Shanghai, China, May 12-17, 2013. pp. 3827-3829.