J-PARC リニアックのアップグレード

森下 卓俊*1[#]·田村 潤*1·丸田 朋史*2

Upgrade of the J-PARC Linac

Takatoshi MORISHITA^{*1}, Jun TAMURA^{*1} and Tomofumi MARUTA^{*2}

Abstract

We have upgraded both the beam energy (400 MeV) and the peak beam current (50 mA) of the J-PARC linac to realize the nominal performance of 1 MW at the 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) and 0.75 MW at the 30 GeV Main Ring synchrotron (MR). For the energy upgrade, we installed an Annular-ring Coupled Structure linac (ACS) and 972 MHz klystron system during the summer shutdown of 2013. The result of the beam test showed the beam loss at the RCS beam injection area decreased significantly by increasing the energy. For the beam current upgrade, we replaced the ion source, the RFQ and the RF chopper system during the summer shutdown of 2014. The beam commissioning was started in September 2014, and the 1 MW equivalent beam operation was successfully demonstrated at the RCS in January 2015.

(本稿は高エネルギーニュース Vol. 33 No. 4 に掲載予定の記事と同時掲載であることを予めお 断りいたします.)

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)は、日本原子力研究開発機構と高エネル ギー加速器研究機構が共同で茨城県東海村に建設 した大強度陽子加速器施設である. J-PARC の加速 器はリニアック,3 GeV シンクロトロン(3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, RCS) および 50 GeV シンクロトロン (Main Ring Synchrotron, MR) からなる. RCS からのビームは物質・生命科学実 験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility, MLF), MR からのビームはハドロン実験 施設およびニュートリノ実験施設でそれぞれ使用 され、目標ビームパワーは RCS で1 MW、MR で 0.75 MW である¹⁾. これを達成するためリニアッ クでは当初, ピーク電流 50 mA, エネルギー 400 MeV を目標性能に定めたが、建設予算の都 合から 181 MeV リニアックを先行して建設する ことになった²⁾. それに伴いピーク電流も当面は 最大 30 mA を目標とすることになった. 181 MeV リニアックは、イオン源、高周波四重極リニアッ ク(Radio-Frequency Quadrupole linac, RFQ)、ドリフトチューブリニアック(Drift-Tube Linac, DTL)、および機能分離型 DTL(Separatetype DTL, SDTL)で構成され、2006 年 11 月よ りビームコミッショニングを開始した³⁾. 2009 年より実験施設でのビーム利用運転を開始し、 2012 年末からは RCS 出力 300 kW でのビーム供 給を開始した.

181 MeV リニアックの運転と並行して, エネル ギーを 400 MeV に増強するための環結合型リニ アック(Annular-ring Coupled Structure linac, ACS)の開発を進めた. ACS は 2009 年より量産 を開始し, 2013 年の夏期メンテナンス期にビー ムラインにインストールし, 翌年の1月に 400 MeV 加速に成功した. また, ピーク電流を 50 mA に増強するための新たなイオン源と RFQ の開発も進め, 2014 年夏期メンテナンス期に新 イオン源および RFQ, さらに大電流のビーム負 荷に耐えうる改良型 RF チョッパーシステムをイ ンストールし,現在は性能確認を進めている. 図 1にアップグレード前後のリニアックの構成を示 す.本稿では,リニアック初段加速部におけるビー

^{*1} 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency

^{(&}lt;sup>#</sup> E-mail: Takatoshi.morishita@j-parc.jp)

^{*2} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization



図1 リニアック機器構成

ム電流増強, ACS 空洞によるビームエネルギー 増強および大出力運転に向けたリニアックビーム コミッショニングについて報告する.

2. ビーム電流増強

2.1 大電流負水素イオン源

リニアックでは、六ホウ化ランタン(LaB₆) 製 フィラメントを用いた負水素イオン源を運転開始 当初から使用してきた. 負水素イオンビーム電流 を増大させるためにイオン源内にセシウムを添加 する方法がある.本イオン源ではセシウムを添加 しない条件でもビーム電流 36 mA は可能であっ たが⁴⁾,本イオン源にセシウムを添加してもほと んど負水素イオンビーム電流が増加しないことが 判明したため、セシウム使用にて大幅な負水素イ オンビーム電流増加が見込まれる高周波駆動 (RF) 負水素イオン源の開発に着手した. 図2に RF イオン源の断面図を示す. プラズマ生成室内 に米国 SNS (Spallation Neutron Source)の負 イオン源で使用されている RF アンテナを挿入し、 30 MHz-RF を連続的に印加. 2 MHz-RF をパル ス的に重畳して水素プラズマを生成している. イ オン源内へのセシウムの添加は、高温に加熱した セシウム導入器から行う.

RFイオン源の開発では、これまで使用してきた LaB₆フィラメント型イオン源の構造をベースに、電極形状や温度の最適化に加え、図2に示すロッドフィルター磁石の調整や軸磁場補正コイルを新たに導入するなど、ビーム引出し口近傍の磁場分布の最適化を進めた.その結果、イオン源テストスタンドで実施した RF イオン源単体での性



能試験において,2012年には RFQ のアクセプ タンスに収まるビーム電流として 70 mA のビー ム引出しに成功した⁵⁾.また,運転時のビーム電 流安定化のため,遠隔でインピーダンス整合を行 えるシステムを構築し,RF アンテナによるプラ ズマ生成の安定化が可能となった.さらに,ビー ム電流の実測値に基づくフィードバック制御シス テムを導入し,RF 投入電力を制御してビーム電 流の安定化を実現している.イオン源内へのセシ ウムの添加量は,電極の耐電圧の観点から必要最 小限にとどめることが望ましい.本制御システム によって,セシウムの効果が弱まれば(RF 投入 電力が必要以上に大きくなった場合には)それを 補うだけの少量のセシウムを自動で添加すること ができる⁶⁾.

2.2 大電流 RFQ

リニアックでは,イオン源からの50 keV のビー ムを周波数 324 MHz の RFQ でバンチングおよ び加速し,ビームマッチングセクション (MEBT1)

を経て DTL に入射する. 既存の RFQ は大型ハド ロン計画に基づいて 30 mA で設計されたもので あったため、ピーク電流を 50 mA に設定した RFQ を新たに設計した⁷⁾.本設計には最近開発 された設計コード(LINACSrfqDES)を使用し、 従来は設計に組み込むことが容易ではなかった共 鳴作用によるビーム品質低下を抑制する条件をバ ンチング区間の設計に付加することとした.また, 高いピーク電流に合わせて設計すると加速空洞が 長くなり、高次の共振モードの影響で空洞内の電 磁場分布が不均一になりやすい。空洞全長は既存 のRFQの3.1mに対し、新設計では3.6mになっ たが、電磁界シミュレーションの結果から組立時 の電磁場分布調整によって均一化できる範囲内で あると判断した.また、ベイン間電圧および最大 表面電界強度についても、 ピーク電流の増加にも かかわらず増加させていない. これらの値も大き くすると空洞を短くすることができるが、 電極で の放電のリスクが高まって安定運転に支障をきた す可能性があるためである.

上記設計に基づき,2011年よりRFQ空洞の 製作を開始した.新RFQは長手方向に空洞を3 つに分割し,それぞれにおいてベインを真空ろう 付け接合後に連結することとした.接合時の熱に よる変形や接合部の位置ずれなどが発生しやすい ため,位置精度確保に注力して製作した⁸⁾.**図3** はRFQの電極の2枚目を組み立てているところ であり,モジュレーションのあるベイン先端の間 隔は狭いところで3.4 mmである.**図3**右下の囲 みは電極の表面電界強度を計算したもので,ベイ ン先端に高い表面電界が発生する.

RFQ 空洞には合計 35 個の固定チューナーを取り付けており、これらと1 個の RF カップラの挿

入量で前述の電磁場分布を調整した.チューナー は先端をスリット加工しており,真空排気ポート としても使用する.現在,35か所中9か所に真 空ポンプを接続しており,必要に応じてポンプの 増設も可能である.

2.3 RF チョッパーシステムの改良

図4に示すように, MEBT1 に設置した RF チョッパーシステムによって,幅500 µsのマク ロパルス内に RCS の RF 周波数 (入射時 1.2) MHz ~ 出射時 1.6 MHz) に合わせたもうひとつ のパルス構造を成形する. RF チョッパーシステ ムは、ビームを横方向に偏向する RF チョッパー 空洞と、偏向したビームを取り除くスクレーパで 構成され、不必要なマクロパルス内のおよそ 46%のビームをエネルギーが低いうちに間引く ために使用する. 既存の RF チョッパーシステム は RFQ と同様に大型ハドロン計画に基づいた ピーク電流 30 mA を想定して設計しているため、 ピーク電流 50 mA ではアパーチャが狭く, 蹴ら れたビームの一部がビームパイプや電極にあたる ことをシミュレーションで確認した、そこで十分 な蹴り角が得られるように RF 電場の振幅を上げ るとともに、ビームパイプや電極間隔を広げた チョッパー空洞を新たに製作した⁹⁾. 図5はチョッ パー空洞内部を上から撮影した写真で、上下の太 い棒は電極で、左右の棒はビームパイプである. 本チョッパー空洞は、およそ 0.8 m 下流側に位 置するスクレーパに向かって2つのギャップで ビームを偏向する.また,ピーク電流の増加によっ てスクレーパ表面の損耗が激しくなるため¹⁰⁾,



図3 RFQ ベイン組立



スクレーパをもう一台追加し、左右に配置して間 引きごとに蹴りだすビームを振り分けるタンデム スクレーパを構築した ¹¹⁾.

2.4 インストールと立ち上げ,運転経過

初段加速部および RF チョッパーシステムは 2014年夏季メンテナンス期に加速器トンネルに インストールし、9月末よりビームコミッショニ ングを始め、10月にはピーク電流50mAでのビー ム調整試験を開始した。10月半ばには、ピーク 電流 50 mA のビーム試験中にイオン源の RF ア ンテナが破損するトラブルが発生したものの、お よそ13時間で復旧した。2014年末までの3か 月間には、30 mA での実験施設へのビーム供給 運転を含む3回の加速器運転サイクルを実施し, 上記トラブルを含めてもすべてのサイクルで 600 時間以上のアンテナ寿命を確認している. 30 mA でのビーム供給中, RFQ の電極での放電による トリップは1日当たり10回程度発生し、1%以 下ではあるが全体の稼働率を低下させている. 今 後,50 mAビーム供給運転を見据え、必要があ れば真空ポンプの増強などで更なる安定性向上に 向けた準備を進める. RF チョッパーシステムに おいては立ち上げ当初から特にトラブルなく運転 を継続している. タンデムスクレーパの動作試験 を行った結果、設計通りにビームが左右に振り分 けられることを確認した. また, RF チョッパー システムでの蹴り残しの割合は 6.6×10^{-7} であ り,許容範囲より2桁以上低いことを確認した. しかしながら、通常運転時、ビームを蹴りだした 直後に発生するチョッパー空洞内 RF 場のリンギ ングによってビーム軌道にぶれが生じ、それに伴 うビームロスが RCS で確認されている.現在, RF 電力投入の並列化などリンギング低減にむけ た検討を進めている.

3. ビームエネルギー増強

J-PARCのような大強度加速器施設では、ビー ムロスによる加速器機器の放射化が問題となる. 空間電荷効果によるチューンシフトによってビー ム粒子が共鳴線にかかり, 粒子の運動が不安定に なることが RCS で生ずるビームロスの主要な原 因のひとつである. ピーク電流が 50 mA に増加 するとシフト量もそれに比例して大きくなるた め,入射エネルギー181 MeV ではシフト量が許 容範囲を超えてしまう、そこで、入射エネルギー を 400 MeV にすることによってシフト量は約 1/3 になり、50 mA でも許容範囲内にとどめるこ とができる. ビームエネルギーを 400 MeV に増 強するために使用する ACS 空洞は全部で 25 台 であり、うち2台がバンチャー空洞、21台が加 速空洞,そして2台がデバンチャー空洞である.

3.1 ACS 空洞

ACS は π/2 モードで運転される結合空洞型リ ニアックの一つであり、ACS と同じエネルギー 領域で広く採用されているものに側面結合型 (Side Coupled Structure, SCS) 空洞がある. 図 **6**に SCS と ACS の構造を示す. ACS はビーム軸 上の加速セルの周りに環状の結合セルが配置され ており、SCS に比べその軸対称な構造から優れた 加速電場の軸対称性を得ることに加え、ろう付け 高温時の機械的安定性も利点として挙げられる. J-PARC 用 ACS は、2 台の加速タンクと1 台のブ リッジタンクで構成される. J-PARC 用 ACS 加速 空洞を図7に示す.加速タンクは17個の加速セ ルを有する ACS であり、ブリッジタンクは加速 セルと結合セルが交互に並んだ9セルのディスク



図5 チョッパー空洞内部写真



J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 12, No. 1, 2015 25

ロード型加速管である[†]. ブリッジタンク中央の 加速セル側面に開けられた穴(アイリス)を通し て,高周波電力が空洞に入力される. 空洞全体の 共振周波数の補正は,ブリッジタンクの加速セル に設置された可動式周波数チューナーを用いて行 う.

J-PARC 用 ACS は, KEK の大型ハドロン計画 (JHP) 用に開発された ACS を基礎としているが 運転 周 波数 が 異 なる(JHP では 1296 MHz, J-PARC では 972 MHz)ため,そのままスケーリ ングすると外径が大きくなり,加工および組立 が格段に難しくなってしまう.そこで,ロシアの INR (Institute for Nuclear Research)と共同で 電磁場解析による再設計を行い,性能を保ちつつ 外径を JHP 用 ACS と同程度の 430 mm まで縮小 した形状に改良した.バンチャー空洞と加速空洞 1 号機の開発を経て,J-PARC 用 ACS が性能面で 問題ないことを確認することができた.

残りの ACS 空洞の量産においては,加工方法 の単純化や,テストセルで切削量と周波数の関係 を測定することによって周波数調整回数を1回に 減らすなどの工夫を重ね,工期の短縮に努めた. これによって,2009年の量産開始から2013年 3月までにすべての ACS 空洞の製作を完了する ことができた.またこの量産に向け,ろう付けに よる結合セルの周波数変化を補正するための回転 チューナーを開発した.J-PARC 用 ACS の開発と 量産については,参考文献12)に詳しく述べられ ている.



[†] ブリッジタンクはビーム軸上にないため、その加速セルに 発生する電場はビームの加速には用いられない.

3.2 972 MHz 大電力高周波源

ACS 用 972 MHz クライストロンの開発は 2001年に開始された. 開発当初, クライストロ ン1号機と2号機において、中間空洞の発振現 象が確認されたため、第2空洞および第3空洞 の設計を見直して、定格電圧まで発振が生じない ように改良した¹³⁾. また, クライストロン3号 機までのコレクターは 324 MHz クライストロン と同形のサイズが採用されていたが、4号機以降 についてはコレクターを小型化し、重心位置の低 下とコスト削減を行った。量産においては、クラ イストロン出力窓の小型化と、高純度アルミナ材 への窓材料の変更により、低損失かつ低温度上昇 の窓を実現した. 972 MHz クライストロン電源 は、7 台のカソード直流高圧電源と25 台のアノー ド変調器で構成され、これらの仕様は324 MHz クライストロン電源とほぼ同じである¹⁴⁾. ACS 用 972 MHz 高周波源の構成を図8に示す。972 MHz 高周波源の立体回路は WR-975 規格で製作 され、クライストロンからの電力は、地上階のサー キュレーターを通った後.加速器トンネル内の ACS 空洞に供給される.

3.3 ACS 空洞の大電力試験

完成した ACS 空洞は加速器トンネルへの据え 付け前に大電力投入試験を実施し,大電力運転時 の健全性を確認しておくことが望ましい.量産前 の開発機であるバンチャー空洞と加速空洞1号機 については,製作完了後に大電力試験を行い,定 格電力を安定に投入できることと大電力投入時の 空洞内の到達圧力等を確認した.量産開始後,1 台については大電力試験を行うことができたが, 2011年3月の地震によってこの大電力試験エリ アが被災したために,スケジュール的に2台の空 洞しか試験をできない見込みとなった.そこで, 空洞据え付け後に全台数を限られた期間内でコン ディショニングすることを想定し,監視や運転パ

Voltage 80	0k∨ #6	110k∨ #7	110k∨ #8	110k∨ #9	110kV #10	110k∨ #11	110	^{0k∨} 12
 基 (15) 金 LLRF - 変調器 クライストロ: 立体回路 	• •	ሳሳሳሳ						
	I I BUN 1,2	ACS 1~4	ACS 5~8	ACS 9~12	ACS 13~16	ACS 17~20	I ACS 21	L L DB 1,2
	×	8 9	72 MH	z 大電	力高周波	友源		

-26 -

ラメータ変更などの作業負荷が極力小さくなるよ うな方法を検討しながら大電力試験を行った. 図 9に ACS 空洞のコンディショニング過程の一例 を示す. 濃い線は投入電力 (左軸),薄い線は真 空度 (右軸)を示す. ビームパルス幅 500 μs に 対して, RF パルス幅 600 μs の高周波電力を 50 Hz の繰り返しで投入している.

3.4 エネルギー増強機器の設置

ACS 空洞の据え付けや関連機器の設置に必要 な総期間は、既設 181 MeV 機器設置の経験から 1 年近くを要することが見込まれたが、2010 年 から毎年夏のメンテナンス期間を利用してケーブ ルや導波管の設置など準備工程を少しずつ進め た.既設ビームラインの撤去、ACS 空洞の据え付 けとアライメント、ビームモニタ¹⁵⁾ などの関連 機器の動作確認,真空試験等を計画的に行い、ビー ムラインへの ACS 空洞の据え付けは 2013 年 8 月中旬から 11 月中旬の実質 3 ヶ月で完了させた. 図 10 は ACS 空洞設置後のビームラインである. その後、LLRF 機器の調整などを終え、オンライ ンでの空洞コンディショニングを開始した. 当初、





図10 ACS 空洞設置後のビームライン

サーキュレーター内ポストの接触不良が原因で放 電現象が頻発したが、交換および修正を行いつつ、 24時間体制で空洞コンディショニングを継続した.

4. ビームコミッショニング

この章では、ACS リニアック設置後と初段加 速部交換後のビーム試験について報告する. すで に述べた通り、これらのアップグレードを2年に 分けて実施し、2014年1月に400 MeV 加速、 同年10月にビーム電流50 mA 加速をそれぞれ 達成した.

4.1 ACS 増設後のビーム試験

ACS リニアックの運転周波数は、上流の加速 空洞と比べて3倍の972 MHz であるため、位相 方向のアクセプタンスは上流側と比べて、およそ 3分の1になる.アクセプタンスからビームがこ ぼれてロスしないように、各空洞に印加する RF 電場の振幅と位相を精度良く調整する必要があ る.

調整は位相スキャン法により行う¹⁶⁾. RF 電場の振幅を固定し,位相を360度回転させる.各位相で空洞から出力されるビームのエネルギーを測り,その相関と空洞内の電場計算を基にしたシミュレーションと比較して設計値に相当する設定を見つける.各ACS空洞の下流にビーム位相検出器(FCT)を設置し,2つのFCTを通過したタイミングから得られる飛行時間とFCT間の距離を用いたTime-of-flight(TOF)法でエネルギーを求めた.図11に全ACS空洞の位相スキャンの結果を示す.図中の実線はシミュレーション,点



図 11 ACS 位相スキャンのシミュレーションと測定の比較

は TOF 法による測定結果である. すべての空洞 で測定結果とシミュレーションが 360 度の全周 にわたり良く一致しているのが分かる. このこと は FCT の校正, FCT の位置測定が高い精度を達 成していることを意味している. またシミュレー ションでは, 空洞の設計を基に空洞内の電磁場分 布を計算し, 設計通りの RF 電場を入力した場合 のビーム出射エネルギーを計算している. そのシ ミュレーションと測定が良く一致することは, 空 洞セルの加工と組み立て精度が十分高いことを意 味している. また本測定には数日を要したが, 前 述の高周波源ならびに LLRF システム¹⁷⁻¹⁹⁾ は, 安定度および再現性ともに高く, スムーズに調整 することができた.

位相スキャン法によりすべて空洞の調整を完了 した後, ビームの行き先を第一アーク部(リニアッ クから RCS に向けて 90 度ビームを偏向させる区 間)途中から分岐して設置されているビーム試験 用のダンプに切り替え,第一アーク部のビーム試験 の測定によりエネルギーを検証した.この試験 では,アーク部のベンド磁石を 400 MeV のビー ムがビームラインの中心軸を通過する磁場に設定 し,ビーム位置検出器でビーム軌道の水平方向の 変位量を測定した.その結果,ビーム軌道はプラ ス側に約 2.5 mm シフトしていた.これはエネル ギーが 400 MeV より約 0.8%高いことに相当し, 確かに 400 MeV を達成していることを確認した.

4.2 ビーム位相方向測定

リニアックでは ACS 入射時の縦方向ビーム マッチングに必要となるバンチシェイプモニタ (BSM)²⁰⁾の開発も進め,2014年夏季メンテナン ス期に加速器トンネルにインストールした.図 12は30mAビーム試験中にパルス幅100 µsの ビームを測定した結果である.横軸はマクロパル ス中の位置,縦軸はビーム進行方向の位置 (324 MHz の RF 位相)であり,位相0度付近の 濃い線の部分がビームの信号である.マクロパル スの頭の10 µs が位相方向にシフトしているの はビームローディングの影響である.リニアック では,フィードバック制御に加え,フィードフォ ワード制御によるローディング補償²¹⁾により, ACS への入射ビームはマクロパルス内での位相 のずれを約1度に抑えることに成功している.

4.3 初段部交換後の横方向マッチング調整



RFQ 出口から DTL の間にある MEBT1 では、 エネルギーは3 MeV と低いが、RF チョッパーシ ステムなどを配置するスペースが必要であるた め、空間電荷効果の強さと比べて収束力の間隔が 長い、そのためエミッタンスの増大が起こること が 3 次元 Particle-in-cell (3D PIC) 法を用いた シミュレーションによる評価で分かっている. さ らに、イオン源のテストスタンドで測定した出射 ビーム分布を初期分布に与えた RFQ ビームシ ミュレーションによると, 既存の初段加速部で ピーク電流 30 mA のビームを加速した場合と比 較し, 50 mA では RMS エミッタンスが 40 ~ 50%大きくなっていることが分かっている. 初段 加速部交換後のMEBT1 ビーム調整では、この ビームプロファイルの変化を吸収し、かつ DTL にとって最適なビームに成形することが求められ る. この区間の調整精度がリニアックから供給す るビーム品質を決めると言っても過言ではない.

そこで、実際に RFQ から出射されるビーム形 状に基づいた収束力を決定するため、MEBT1 に 設置されたワイヤースキャナーモニタ(WSM) により横方向のビームプロファイルを Q スキャ ン法により測定した. Q スキャン法は Q 磁石の 収束力と、その下流のビーム幅の相関から、Q 磁 石入射時点のビームプロファイル(エミッタンス、 Twiss パラメータ)を導出する方法である. 空間 電荷効果が無視できる場合、ビームサイズの二乗 は収束力の 2 次関数になる. したがって測定結果 を 2 次関数で近似し、得られた係数からプロファ イルを求めることができる. しかしながら MEBT1 は空間電荷効果の影響が大きいため、こ の測定では、2 次関数の代わりに 3D PIC シミュ レーションによるフィッティングを行った.Q磁 石入射点のエミッタンスとTwissパラメータをフ リーパラメータにし,測定した収束力とビームサ イズの相関を最も再現するパラメータを求めた.

4.4 初段部交換後の縦方向マッチング調整

縦方向については MEBT1 に測定できるモニタ が無いため、プロファイルは初段加速部のシミュ レーションに頼らざるを得ない. そこでそのシ ミュレーションが、現実とどの程度一致している かを, DTLの縦方向アクセプタンスを用いて確 認した. DTL 縦方向アクセプタンスは位相方向 に約100度、エネルギー方向に±0.3 MeVの範 囲にある. ビーム粒子がアクセプタンス外にいる 場合は、ほとんど加速されないため、最終的にビー ムエネルギーとQ磁石の収束力の不整合により, ビームラインの途中で失われる.したがって,ビー ムライン下流へのビームの透過率は、ビームバン チ内の全粒子のうちアクセプタンス内に存在する ビーム粒子の割合に等しい. そこで DTL 全空洞 の RF 電場の入力位相をずらしながらビーム透過 率を測定し、それを 3D PIC 法によるシミュレー ションと比較した結果を図13に示す. 位相プラ ス側では、シミュレーションと測定結果が良く一 致している. 一方マイナス側は測定の下がり方が はやい.マイナス側のアクセプタンスは、位相方 向により垂直であることから、位相方向のビーム 幅がシミュレーションより細いと考えられる.

前述のQスキャンによる横方向のプロファイ ルとシミュレーションによる縦方向プロファイル から, MEBT1のQ磁石とバンチャー空洞それぞ れの収束力を決定した. この収束力がDTLに対 してどの程度合っているかを確認するため,



図 13 DTL アクセプタンスの位相方向のシフト量とビー ム透過率の関係

SDTL 入射部に設置されている WSM でビームパ ラメータを測定した. その結果, 30 mA ではハ ローはほとんど無く,初段部交換により RFQ 出 口で増加していると考えられるエミッタンスも SDTL 入射部では交換前と同レベルであることか ら,MEBT1 の調整精度は大幅に向上したと考え て間違いない. その一方,50 mA では有意なハ ローが存在している. 我々は,このハローの原因 は縦方向のミスマッチだと考えており,現在 MEBT1 に縦方向を測定できるモニタの追加を含 めた改善策を検討中である.

5. おわりに

リニアックは、2013年にエネルギーを 400 MeV に、2014 年にはピーク電流を 50 mA にアップグレードし、2014年11月からはビー ム供給運転時のピーク電流を30mAに高めて ビーム供給運転を開始した. MR では現在, ビー ム増強前の 220 kW から 300 kW に高出力化した 運転を開始した. MLF においてもビームパワー を 400 kW に上げた利用運転の準備を整えたとこ ろである. また, これまでおよそ3週間のピーク 電流 50 mA ビーム調整試験を実施し、2015 年1 月には短時間ではあるが RCS での1 MW 相当の 出力試験に成功した. 今回のリニアックアップグ レードのゴールは、後段の加速器が許容できる品 質のビームを安定に供給することであることを念 頭に、本文中でも示した課題などの改善を進め、 早期の 50 mA 安定供給を目指す.

本稿で紹介したリニアックのアップグレード は、機器担当、制御、コミッショニング、そして ユーティリティーや安全など、リニアックの構成 員に限らず J-PARC に携わるすべての方々の成果 と支援によるものであり、ここに敬意を表したい. 最後に、初段加速部並びに ACS 加速部の開発や 製作は、ご協力いただいた多くの企業の高い技術 力に支えられて実現できたものであり、この場を お借りして感謝の意を表したい.

編集委員会より

本委員会は、本記事の重要性および速報性を鑑 み、速やかに広く学会員に周知すべきと判断し、 高エネルギーニュースとの同時掲載を行いました.

— 29 —

参考文献

- 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) Y. Yamazaki et al., 高エネルギーニュース 24-1, 13 (2005).
- 3) M. Ikegami, 高エネルギーニュース 25-4, 177 (2007).
- H. Oguri et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 010401 (2009).
- 5) S. Yamazaki et al., AIP Conf. Proc. 1515, 433 439 (2013).
- A. Ueno et al., "Maintenance and Operation Procedure, and Feedback Controls of the J-PARC RF-driven H⁻ Ion Source", AIP Conf. Proc. (2015), in printing.
- Y. Kondo et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 080101 (2012).
- 8) T. Morishita et al., Procs. of IPAC2013, THPWO034, Shanghai, China (2013).
- 9) K. Hirano et al., Procs. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 858 (2013).
- 10) T. Sugimura et al., Procs. of 10th Annual Meeting of

Particle Accelerator Society of Japan, 861 (2013).

- 11) K. Futatsukawa et al., Procs. of LINAC2014, pp. 581, Geneva, Switzerland (2014).
- 12) H. Ao and T. Sugano, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 160 (2014).
- 13) E. Chishiro et al., Procs. of 2005 Particle Accelerator Conference, pp. 1123, Tennessee, USA (2005).
- 14) M. Kawamura et al., Procs. of LINAC2010, pp. 887, Tsukuba, Japan (2010).
- 15) A. Miura et al., Procs. of LINAC2014, pp. 1059, Geneva, Switzerland (2014).
- 16) M. Ikegami et al., Procs. of LINAC2004, TUP65, Lübeck, Germany (2004).
- 17) Z. Fang et al., Procs. of LINAC2014, MOPP072, Geneva, Switzerland (2014).
- T. Kobayashi, Procs. of LINAC2010, pp. 253, Tsukuba, Japan (2010).
- 19) K. Futatsukawa et al., Procs. of IPAC2012, pp. 2630, New Orleans, USA (2012).
- 20) A.V. Feschenko, Procs. of RuPAC2012, FRXOR01, Saint Petersburg, Russia (2012).
- 21) T. Kobayashi et al., Procs. of PAC2007, WEPMN039, New Mexico, USA (2007).