

J-PARC リニアックのアップグレード

日本原子力研究開発機構

森下 卓俊, 田村 潤

takatoshi.morishita@j-parc.jp, jtamura@post.j-parc.jp

高エネルギー加速器研究機構

丸田 朋史

tmaruta@post.j-parc.jp

2015年3月3日

1 はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 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、負水素イオン源、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)、および機能分離型ドリフトチューブリニアック (Separate-type DTL, SDTL) で構成され、2006年11月よりビームコミッションを開始した[3]。2009年より実験施設でのビーム利用運転を開始し、2011年3月の東北地方太平洋沖地震によりスケジュールが大幅に変更されたものの、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、地震の影響で計画が遅れたものの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¹するための新たなイオン源と RFQ の開発

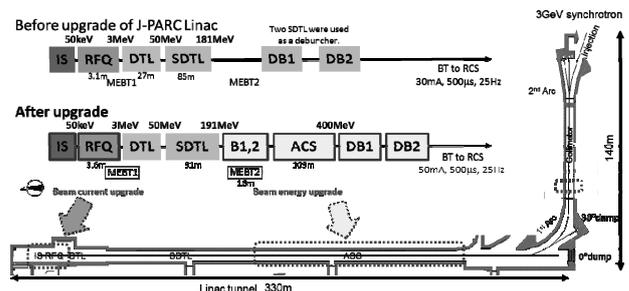


図1 リニアック機器構成。

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ンングについて報告する。

2 ビーム電流増強

先に述べたように、リニアックは設計ピーク電流 30 mA で運転を開始したが、リニアック出口でピーク電流 50 mA を達成するためには、60 mA を超える負水素イオンビームを生成可能なイオン源の開発、大電流のビーム加速に対応したRFQの開発および大電流のビーム負荷に耐えうるRFチョッパーシステムの開発が必要であった。これらはいずれも現存する大強度ハドロン加速器の最高性能に迫るものである。また、実験施設へ安定したビーム供給を使命とする加速器であることを念頭に、ビーム性能の達成だけでなく運転の安定性やメンテナンス性の向上を目指した開発をおこなった。以下に、それぞれの機器の詳細について述べる。

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 (LaB) 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負水素イオンビーム電流 36 mA

¹ RCS入射平均電流を $333 \mu\text{A}$ (=ピーク電流 $50 \text{ mA} \times$ パルス幅 $500 \mu\text{s} \times$ 間引き率 $54\% \times$ 繰り返し 25 Hz) として RCS からの 1 MW 出力を得る。

は可能であったが[4], LaB₃製フィラメントを用いた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の増加が見込まれ, かつセシウムの使用量が少ないと考えられる高周波駆動 (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。本 RF イオン源では, 直径 120mm のプラズマ生成室内にらせん状の RF アンテナを挿入している。この内部 RF アンテナには, 米国 SNS (Spallation Neutron Source) の負イオン源で使用されているものを採用し, 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おこなう。

RF イオン源の開発では, これまで使用してきた LaB₃ 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おこな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 の高周波電力で駆動する 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。RFQ は先端が長手方向に波打った形状 (モジュレーション) のベインと呼ばれる 4 枚の電極を持ち, 電極間に発生する四極電場を使ってビームを収束し,

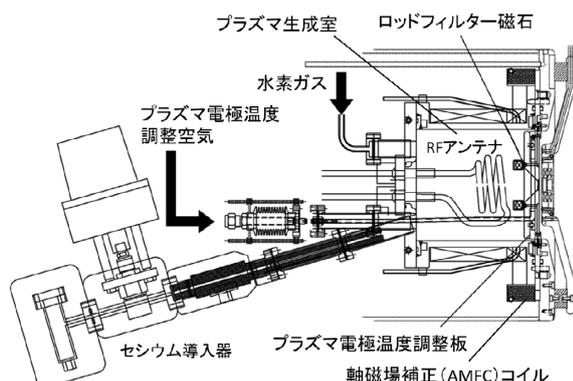


図 2 RF 駆動負水素イオン源断面図。

またモジュレーションによって発生する縦方向の電場を使ってバンチングおよび加速する。

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, 新たにピーク電流を 50 mA に設定した RFQ を設計した[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, バンチング区間のモジュレーション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。最近の大電流 RFQ では, 空洞の後半部分のベイン先端の断面形状を変化させることで加速効率を向上させる (つまり空洞を短くすることができる) 設計がいくつかみられる。今回は, 電極形状がシンプルであるため製作が容易で技術的蓄積もある従来の手法を採用した。その結果, 全長は既存の RFQ 空洞長 3.1 m に対し, 新設計ではおよそ 0.5 m 長く 3.6 m 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, 電圧増加による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。既存の RFQ は精密加工された 4 つのベインを相互にボルトで固定した構造で, 加速空洞全体を真空容器内に格納していた。これによりベイン間の電気的接触と真空シールを個別に実施することができるため組立精度を高めやすいが, 新 RFQ で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。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。

真空ろう付けによって電気接触と真空シールが両立できるため別途真空容器は必要なく, シンプルな構造が可能である。反面, 接合時の熱による変形や連結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]。RFQ 空洞には合計 35 個の固定チューナーを取り付け

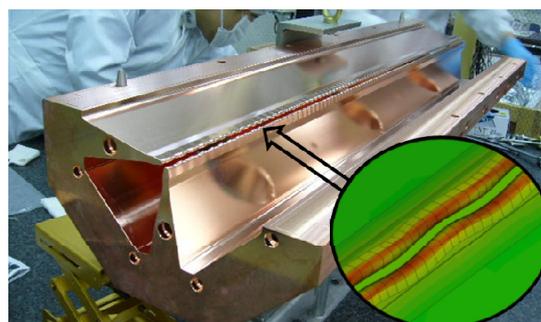


図 3 RFQ ベイン組立。

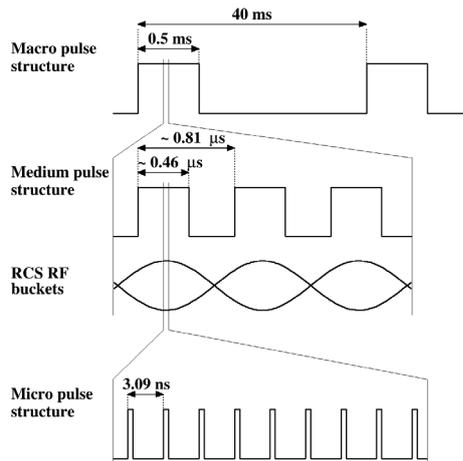


図4 リニアックのビームバンチ構造。

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。RFQ加速空洞は2013年3月の完成後、大電力投入試験を開始した。

2.3 RF チョッパーシステムの改良

リニアックの基準RF周波数324 MHzに対し、RCSのRF周波数は1.2 MHz(入射時)~1.6 MHz(出射時)と、リニアックと比較して2桁低い。そのためリニアックから供給されるパルス幅0.5 ms(マクロパルス)のビームをそのまま入射すると、RCSのRFバケツの外にビームがこぼれてしまい、ビームロスが発生する。そこで、図4に示すように、マクロパルス内にRCSのRF周波数に合わせたもうひとつのパルス構造をMEBT1に設置したRFチョッパーシステムによって成形している。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30 mAビーム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2つのギャップでビームを偏向し、およそ0.8m下流側に位置するスクレーパでビームを除去する。また、ピーク電流の増加によってプリスタリングやスパッタリングなどの粒子負荷や、熱負荷によるスクレーパ表面の損耗が激しくなり、スクレーパの寿命が極端に短くなる可能性がある[10]。そこで、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

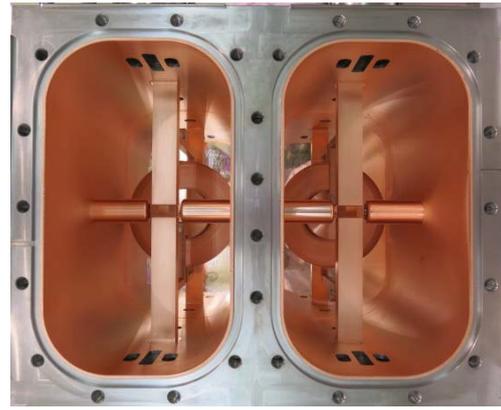


図5 チョッパー空洞内部写真。

を振り分けるタンデムスクレーパを構築した[11]。本RFチョッパーシステムは2014年の夏期メンテナンス後からリニアックでの使用を開始している。

2.4 オフラインでの初段加速部性能試験

新規に開発したRFイオン源およびRFQは、加速器トンネルへのインストールに先立って、地上部にてテストスタンドを構築してビームエネルギーやエミッタンスなどビーム特性の確認をおこなった[12]。図6は2014年2月にテストスタンドにおいて3 MeVに加速された50 mAのビームを確認した際のおシロスコープ波形である。その後、一か月間の連続運転試験をおこない、ビームの安定性やRFQの放電頻度などを確認したのち、RFイオン源およびRFQは2014年夏期メンテナンス期に加速器トンネルにインストールした。

2.5 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のインストール作業は2014年7月から9月の3か月間で予定通り完了し、9月末よりビームコミッションを始め、10月にはピーク電流50 mAでのビーム調整試験を開始した。図7はインストール後の初段加速部の写真である。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

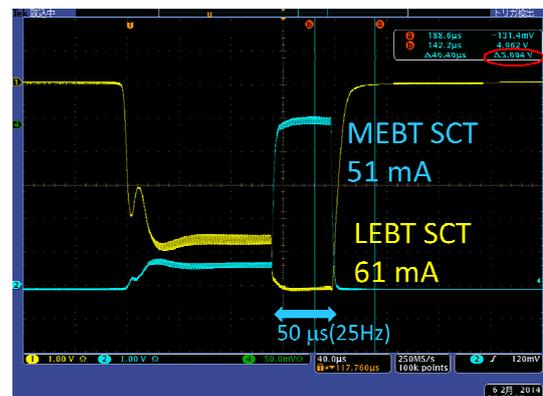


図6 50 mA ビームのおシロスコープ波形。

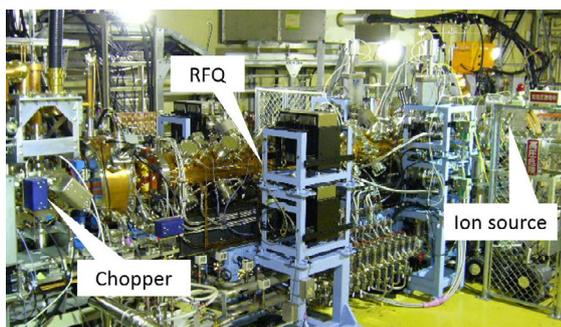


図7 加速器トンネル内初段加速部。

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向上の準備を進める。RF チョッパーシステムにおいては、タンデムスクレーパの動作試験をおこなった結果、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、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。また、RCS および MLF の協力を得て、RF チョッパーシステムでの蹴り残しの割合を見積もった。チョッパー空洞を常にビームを蹴り出すモード（蹴り残ししか下流にいかないモード）にし、RCS で 3 GeV まで加速して実験施設の水銀標的に照射する。そこで発生した中性子を計数することで、わずかな蹴り残しでも高い感度での測定ができる。その結果、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、ビームを蹴り出した直後に発生するチョッパー空洞内 RF 場のリング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グング低減にむけた検討を進めている。

3 J-PARC リニアックのエネルギー増強

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。高いレベルの放射化はメンテナンス性を著しく悪化させるため、安定的な長期間の運転に大きな障害となる。RCS におけるビームロスの主要な原因のひとつにベータatron チューンシフトがある。シフトによってビーム粒子が共鳴線にかかると、粒子の運動が不安定になり、ビームロスが発生する可能性が

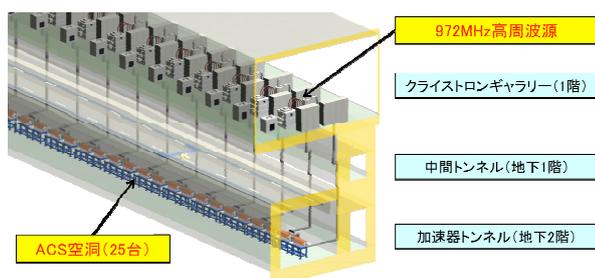


図8 リニアック棟のエネルギー増強部（イメージ）。

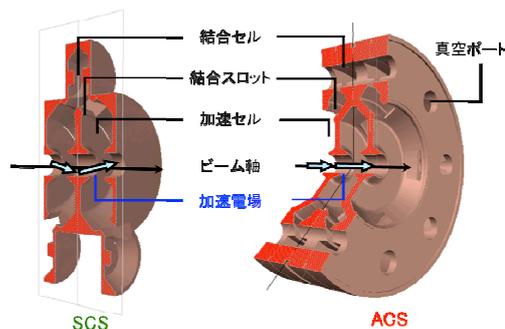


図9 SCS (左) と ACS (右) の構造。

ある。特に RCS では、その大強度のために、空間電荷効果によるチューンシフトが主である。シフト量はラズレットチューンシフトで評価でき、RCS はこの量が最大 -0.15 として設計されている[1]。ピーク電流 30 mA であれば、エネルギーが 181 MeV でもこの条件を満たすことができた。しかしながらピーク電流が 50 mA になると、シフト量もそれに比例して大きくなるため、181 MeV ではシフト量が許容範囲を超えてしまう。このシフト量は $\beta^2 \gamma^3$ (β , γ : ローレンツ因子) に反比例する。そのため RCS への入射エネルギーを 181 MeV から 400 MeV にすることによってシフト量は約 1/3 になり、50 mA でも要求を満たす事ができる。

J-PARC リニアックの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。リニアック棟のエネルギー増強部の建家断面図を図 8 に示す。ACS 空洞を駆動するための高周波源は、既存の加速空洞と同様にリニアック棟地上階のクライストロンギャラリーに設置した。RFQ から SDTL までの運転周波数 324 MHz に対し、ACS は 972 MHz である²。この 3 倍の周波数ジャンプは縦方向の収束力が 3 倍になることを意味しており、ACS 入射時の縦方向ビームマッチングに必要なバンチシェイプモニタ (BSM)³[13] の開発も同時におこなわれた。

3.1 ACS 空洞

本節では、J-PARC で開発された ACS 空洞について述べる。ACS は $\pi/2$ モードで運転される結合空洞型リニアック (Coupled Cavity Linac, CCL)⁴ の一つである。 $\pi/2$ モード CCL で、ACS と同じエネルギー領域で広く採用されているのが側面結合型 (Side Coupled Structure, SCS) 空洞である。図 9 に SCS と ACS の構造を示す。SCS ではビーム軸上の加速セルの横 (図 9 では上下) に結合セルが位置しており、

² 高エネルギー領域では β が大きいので、高い周波数を選択して加速効率を上げることができる。

³ 本モニタは 324 MHz ミクロバンチの縦方法ビームプロファイルを測定するもので、ロシアの INR (Institute for Nuclear Research) と共同で開発された。

⁴ CCL において、多連空洞を伝わる電磁波の群速度は $\pi/2$ モードで最大となり、空洞を安定に励振することができる。また、各セルの共振周波数のずれが加速電場分布に与える影響 (ティルト) が小さい。

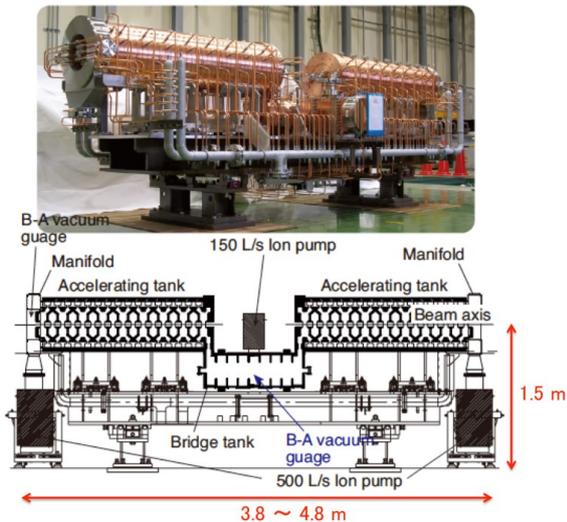


図10 J-PARC用ACS加速空洞。

ACSで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いる。加速セルと結合セルは、それらの間に明けられた穴（結合スロット）を通して電磁的に結合される。空洞が $\pi/2$ モードで励振される時、結合セルには電場は発生せず、加速セルにのみ加速電場が発生する⁵。またこのとき、隣り合う加速セルの電場の位相は π だけずれている。ACSではその軸対称な構造により、SCSに比べ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空洞は、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10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⁶と結合セルが交互に並んだ9セルのディスクロード型加速管である⁷。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おこなう。

J-PARC用ACSは、KEKの大型ハドロン計画用に開発されたACSを基礎としているが運転周波数が異なる（大型ハドロン計画では1296MHz、J-PARCでは972MHz）ため、そのままスケリングすると外径が大きくなり⁸、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おこない、性能を保ちつつ外径を大型ハドロン計画用ACSと同程度の430mm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、

⁵ 厳密には、各セルの共振周波数が同じという条件のもと。

⁶ 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。

⁷ 空洞の用途（加速空洞、バンチャー、デバンチャー）によって加速タンクとブリッジタンクのセル数は異なる。

⁸ 大型ハドロン計画用ACSの外径411mmに対して、 $411\text{mm} \times (1296\text{MHz}/972\text{MHz}) = 550\text{mm}$ 。

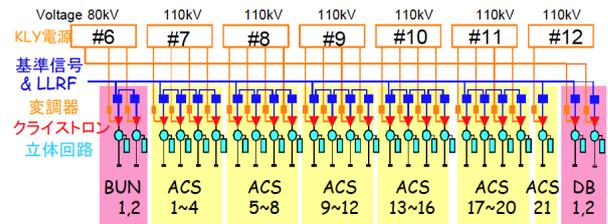


図11 972MHz大電力高周波源。

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。

2009年から残りのACS空洞の量産を開始したが、量産における最大の要求は工期の短縮であった。そこで、加工方法を単純化することによる機械加工工期の短縮、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した。これによって、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開発と量産については、参考文献[14]に詳しく述べられている。

3.2 972MHz大電力高周波源

ACS用972MHz高周波源の構成を図11に示す。1台のACS空洞を駆動するのに、1台のクライストロンを用いる。972MHz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、安定に動作できなかった。そこで、第2空洞および第3空洞の設計を変更することにより、定格電圧まで発振が生じないように改良した[15]。また、クライストロン3号機までのコレクターは324MHz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おこなった。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。972MHz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324MHzクライストロン電源とほぼ同じである[16]。1台の直流高圧電源は、最大4台のクライストロンを駆動し、バンチャー空洞とデバンチャー空洞用に80kV電源1台、ACS加速空洞用に110kV電源6台を設置した。972MHz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、クライストロンギャラリーのサーキュレーターを通った後、加速器トンネル内のACS空洞まで供給される。

3.3 ACS空洞の大電力試験

加速器トンネルへのインストール前に大電力投入試験を実施し、加速空洞の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おこない、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。量産型空洞についても

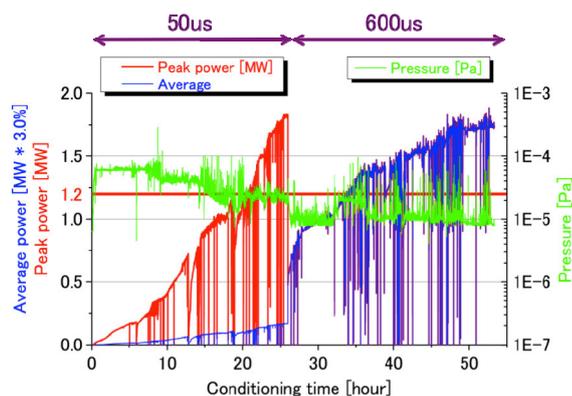


図 12 ACS 空洞のコンディショニング過程。

全台数について加速器トンネル据え付け前にオフラインで大電力試験をおこなうことを計画した。量産開始後、1 台については大電力試験をおこなうことができたが、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、約 2 年間中断せざるを得なくなった⁹。これにより、空洞据え付け前に全台数についてオフライン大電力試験をおこなうことが不可能となってしまった。2012 年度末のリニアック施設の復旧工事完了により、オフライン大電力試験を再開できることになったが、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であったため、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試験をおこなった。図 12 に ACS 空洞のコンディショニング過程の一例(加速空洞 11 号機)を示す。濃い線(赤および青)は投入電力(左軸)、薄い線(緑)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は、既設 181 MeV 機器の設置作業の経験から、1 年近くを要することが見込まれたが、すでにビーム利用運転をおこなっているため、1 年間ビーム運転を停止してこのエネルギー増強作業をおこなうことは不可能であった。そこで、設置作業工程を綿密に策定し、毎年おこなわれる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てきた。この準備作業は 2010 年の夏期メンテナンス期間から始まり、ビームラインへの ACS 空洞据え付け前におこなうことのできる関連機器の設置や施設の工事は、2012 年の夏期メンテナンス期間でほぼ完了することができた。

ビームラインへの ACS 空洞の据え付けは 2013 年夏におこなわれた。ビーム運転再開スケジュールに間に合わせるためには、加速器トンネル内の作業を 8 月中旬から 11 月中旬までの実質 3 ヶ月で完了させなければならなかった。既設ビームラインの撤去、これまでデバンチャーとして使用してきた SDTL 空洞 2 台の SDTL セクション最後尾への移

⁹ ACS 空洞本体への被害はなかった。



図 13 ACS 空洞設置直前(上)および設置後(下)のビームライン。

設¹⁰、ACS 空洞の据え付けとアライメント¹¹、ビームモニタ [17] などの関連機器の動作確認、真空試験等を計画的におこない、何とかこの 3 ヶ月間でトンネル内作業を完了することができた。図 13 に ACS 空洞設置直前及び設置後のビームラインを示す。

加速器トンネル内への 400MeV 機器設置作業終了後、LLRF 機器の確認、調整をおこない、オンラインでの空洞コンディショニングを開始した。コンディショニングの最中、サーキュレーター内の放電現象が頻発した。調査の結果、これはサーキュレーター内ポストの接触不良が原因で放電が起こっていることが分かり、当該サーキュレーターの交換および修正をおこないつつ空洞コンディショニングをおこなった。ビームコミッショニングは 12 月中頃に開始されたが、空洞上流側からおこなわれる位相スキャンのスケジュールに間に合うよう、24 時間体制で空洞コンディショニングをおこなった。

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。図 14 はリニアック単独での調整運転中にもかかわらず、多くの方にお集り頂き撮影した中央制御室前での 400MeV 達成記念写真である。

¹⁰ これにより SDTL セクション出口エネルギーは 191 MeV になった。

¹¹ 空洞 1 台の加速器トンネルへの搬入、ビームラインへの据え付け、アライメントにほぼ 1 日を要した。



図 14 J-PARC リニアック 400MeV 達成。

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になっている。そのため、ACS リニアックの位相方向のアクセプタンスは、上流の324 MHzのリニアックと比べて、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LLRFシステム[18-20]を用いて精度良く調整する必要がある。

ACS 空洞は2つの加速空洞をブリッジ空洞で結合し、1台のクライストロンからRFを供給している。そのため2つの空洞に供給するRF電場を一度に調整することになる。調整は位相スキャン法によりおこなう[21]。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15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射出エネルギーを計算している。そのシミュ

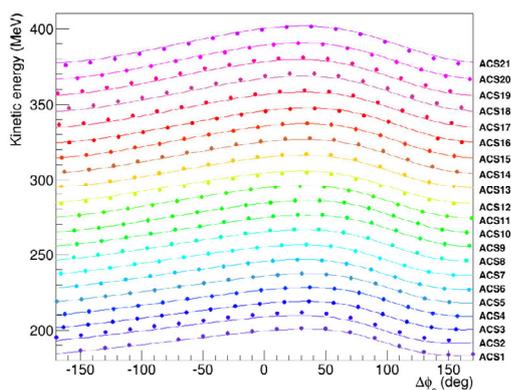


図 15 ACS 位相スキャンのシミュレーションと測定の比較。

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、ビームエネルギーが400 MeVに到達しているかをチェックするため、ビームの行き先を30度ダンプに切り替え、第一アーク部のビーム軌道の測定によりエネルギーを検証した。30度ダンプは図1に示すとおり、第一アーク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である。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ているため、400 MeVから大きくずれていると、アーク部途中でチェンバーに衝突し、ビーム透過率が低下する。また、第一アークの途中には、ディスパージョンが0.6 mの位置にビーム位置検出器(BPM)を2台設置している。これらのBPMでビーム軌道の水平方向の変位量を測定し、400 MeVからのずれを測定した。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 初段加速部交換後のビーム試験

4.2.1 BSMを用いたビーム位相方向測定

初段加速部交換後のビーム試験は2014年9月末に開始した。すでに述べたが、ビーム試験前の夏の長期メンテナンスでは、初段加速部の交換に加え、3 MeVビーム輸送系(MEBT1)のRFチョッパーシステムの改良と191 MeVビーム輸送系(MEBT2)にBSM1台の設置をおこなった。当初はBSMをACS空洞の増設に合わせて設置する予定だった。しかしながら測定中にマルチパクタリング起因と考えられる真空の悪化が発生し、その悪化の度合いがリニアックの運転にとって許容できないレベルであった。そのため1年間にわたる真空排気系の改善と、ベーキングによるチェンバー表面の脱ガス処理によって真空排気速度を改善し、ようやく設置にこぎつけることができた。図16は30 mA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

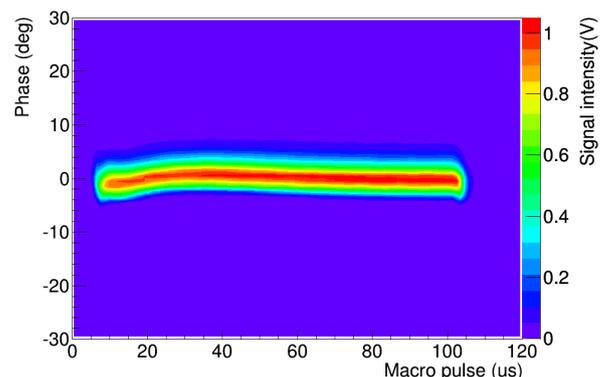


図 16 バンチシェイプモニタの測定結果

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 の位相）である。寒色から暖色になるに従い信号強度、つまりビーム粒子密度が高い。マクロパルスの頭の10 μ s 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。J-PARC 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[22]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。

4.2.2 横方向マッチング調整

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。これは、単純に考えると RMS ビームサイズが約 20% 大きくなることに相当する。そのためビームラインの内径に対する余裕が減少し、以前と同程度の調整精度でも、ビームバンチ外周の粒子がビームダクトと衝突し、ビームロスを起こす可能性がある。また、ビームロスの元となるマイクロ粒子数が増えるため、ビームロスを悪化させないためには、マイクロ粒子あたりのロス量を減らさなければならない。そのためには各種モニタによってビームプロファイルを正確に把握し、それを踏まえた調整が不可欠である。また、ピーク電流の増加により、非線形性をともなう空間電荷効果が強くなるため、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が重要である。

RFQ 出口から DTL の間にある MEBT1 では、初段加速部の交換による RFQ 出口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。ビームエネルギーは 3 MeV と低く、空間電荷効果が大きいため、MEBT1 から DTL の調整精度がビームハロー（ビームバンチのコアの周囲に薄い密度で分布するマイクロ粒子の集合）の量を大きく左右する。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。また DTL のアパーチャはリニアックの中で最も狭く、段階的に広がるが最上流部では ϕ 13 mm しかない。初段加速部交換によるエミッタンス増加と合わせ、調整精度不足によるビームエンベロープの振動やハローの生成は、DTL 内部でのビームロス、ひいては残留放射線の増加を起こす。そのため高い精度の調整が必要である。

またこの区間では、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、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。その影響を踏まえ、かつ実際に 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) によりビームプロファイルを測定した。横方向（ビーム進

行方向に対し垂直な面）のプロファイルは 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（磁場強度）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ので、この測定では、2 次関数の代わりにシミュレーションによるフィッティングをおこなった。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。

4.2.3 縦方向マッチング調整

縦方向（ビーム進行方向）については MEBT1 に測定できるモニタが無いので、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、図 17 上の青い範囲で示されており、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。それに対してビーム粒子は赤い点で示したとおり、アクセプタンスの十分内側に分布していることが期待される。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

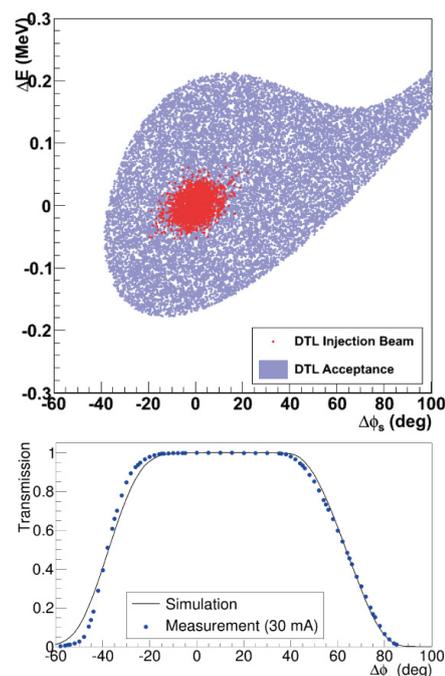


図 17 DTL の縦方向アクセプタンス（上）および、DTL アクセプタンスの位相方向のシフト量とビーム透過率の関係（下）。

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。この測定は可動式コリメータによるビームプロファイル測定と似ており、アクセプタンスの縁がコリメータの端の役割を担っている。シミュレーションと測定結果の比較を図 17 下に示す。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。

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 磁石とパンチャー空洞それぞれの収束力を決めた。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、SDTL 入射部に設置されている WSM でビーム分布を測定した。その結果、30 mA ではハローがほとんど無く、MEBT1 の調整が十分な精度で実施できたことを確認した。また横方向エミッタンスは、ビーム電流増強前の初段加速部で 25 mA ビームを加速した場合と同じレベルである。RFQ 出射ビームのエミッタンスが、初段加速部の交換によって 30~50% 大きくなったことを考えると、調整精度は大幅に向上したと考えると間違いないと考えられる。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 400MeV に、2014 年にはピーク電流を 50mA 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 30 mA 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 1MW 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。

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] 山崎 良成, 長谷川 和男, 鈴木 寛光, 富澤 正人, "J-PARC 加速器", 高エネルギーニュース **24-1**, 13(2005).
- [3] 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 **25-4**, 177(2007).
- [4] H. Oguri *et al.*, "Status of the Japan Proton Accelerator Research Complex H⁻ ion source", Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 010401 (2009).
- [5] S. Yamazaki *et al.*, "Beam enhancement by axial magnetic field optimization of the J-PARC RF-driven H⁻ ion source", AIP Conf. Proc. **1515**, 433-439 (2013).
- [6] 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.
- [7] Y. Kondo *et al.*, "Beam dynamics design of a new radio frequency quadrupole for beam-current upgrade of the Japan Proton Accelerator Research Complex linac", Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 080101 (2012).
- [8] T. Morishita *et al.*, "Fabrication of the RFQ III for the J-PARC Linac Current Upgrade", Procs. of IPAC2013, THPWO034, Shanghai, China (2013).
- [9] K. Hirano *et al.*, "Development of RF Chopper System at J-PARC Linac", Procs. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 858(2013).
- [10] T. Sugimura *et al.*, "Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC Linac", Procs. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 861(2013).
- [11] K. Futatsukawa *et al.*, "Chopper Operation for the Tandem Scrapers at the J-PARC linac", Procs. of LINAC2014, TUPP067, pp. 581-583, Geneva, Switzerland (2014).
- [12] Y. Kondo *et al.*, "Beam test of a new radio frequency quadrupole linac for the Japan Proton Accelerator Research Complex", Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 120101(2014).
- [13] A.V. Feschenko, "Technique and Instrumentation for Bunch Shape Measurements", Procs. of RuPAC2012, FRXOR01, Saint Petersburg, Russia (2012).
- [14] H. Ao and T. Sugano, "Development of the Annular-ring Coupled Structure for J-PARC", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 160(2014).
- [15] E. Chishiro *et al.*, "Recent Status of RF Source in J-PARC Linac", Procs. of 2005 Particle Accelerator Conference, WPAT008, pp.1123-1125, Tennessee, USA (2005).
- [16] M. Kawamura *et al.*, "Power Supply System for Klystron in J-PARC Linac", Procs. of LINAC2010, THP058, pp. 887-889, Tsukuba (2010).
- [17] A. Miura *et al.*, "Installation and Performance Check of Beam Monitors for Energy Upgraded J-PARC Linac", Procs. of LINAC2014, pp. 1059-1061, Geneva, Switzerland (2014).
- [18] Z. Fang *et al.*, "Present Status of J-PARC Linac LLRF Systems", Procs. of LINAC2014, MOPP072, Geneva, Switzerland (2014).
- [19] T. Kobayashi, "Stability Evaluation for Long FB Loop Delay in the ACS Cavity Field Control for the J-PARC Linac 400-MeV Upgrade", Procs. of LINAC2010, pp.253-255, Tsukuba, Japan (2010).
- [20] K. Futatsukawa *et al.*, "Upgrade of the RF Reference Distribution System for 400 MeV Linac at J-PARC", Procs. of IPAC2012, pp.2630-2632, New Orleans, USA(2012).
- [21] M. Ikegami *et al.*, "RF tuning schemes for J-PARC DTL and SDTL." Procs. of LINAC2004, TUP65, Lübeck, Germany (2004).
- [22] T. Kobayashi *et al.*, "Performance of J-PARC LINAC RF System", Procs. of PAC2007, WEPMN039, New Mexico, USA (2007).