

J-PARC リニアックビームモニタと現状の取り組み

BEAM MONITORS IN THE J-PARC LINAC AND ITS CURRENT ACTIVITIES

守屋克洋^{#, A)}, 宮尾智章^{B)}, 岡部晃大^{A)}, 割貝敬一^{A)}, 三浦昭彦^{A)}, 林直樹^{A)}, 神谷潤一郎^{A)}
Katsuhiko Moriya^{#, A)}, Tomoaki Miyao^{B)}, Kota Okabe^{A)}, Keiichi Warigai^{A)}, Akihiko Miura^{A)}, Naoki Hayashi^{A)},
Junichiro Kamiya^{A)}
A) JAEA/J-PARC, B) KEK/J-PARC

Abstract

We accelerate high-intensity beam of 50 mA using radio frequencies of 324 MHz and 972 MHz in the J-PARC linac. In order to accelerate and transport the high-intensity beam to facilities stably, the current value, centroid, and distribution of the beam must be measured to realize optimum operating conditions. Various beam monitors are properly installed in the linac. In this report, we report on the transformations and improvements of the linac beam monitors since 2015. As an example, carbon nanotubes (CNTs) were employed in the WSM at the upstream of the linac. There has never been an unintentional WSM failure after the CNT replacement. We also report on the beam anomaly diagnostics experienced during beam tuning.

1. 序論

大強度陽子加速器施設 J-PARC[1]では、ビーム出力 1 MW 利用運転に向けてビーム調整を進めている。J-PARC リニアックでは、イオン源で生成した負水素イオン(H)を 50 keV で引き出し、324 MHz の高周波を用いた高周波四重極リニアック (RFQ) で 3 MeV、Drift Tube Linac (DTL) で 50 MeV、Separated type DTL (SDTL) で 191 MeV まで加速し、972 MHz の高周波を用いた Annular Coupled Structure Linac (ACS) で 400 MeV まで加速し、後段の 3 GeV シンクロトロン (RCS) に入射する。RCS に入射したビームは 3 GeV まで加速され、物質・生命科学実験施設 (MLF) や 50 GeV シンクロトロン (MR) へ輸送される。

ビーム出力 1 MW を例に J-PARC リニアックビームの時間構造を Fig. 1 に示す。リニアックでは、400 MeV まで加速した H ビームをマクロパルス 500 μ s、繰り返し 25 Hz で RCS へ入射する。324 MHz と 972 MHz の高周波でビームを加速するため、約 3 ns 毎にバンチ (マイクロバンチ) を作る。周長約 350 m の RCS では、約 1 MHz の高周波を用いてビームを加速するため、RCS バケツにビームが入るように RFQ と DTL の間 (MEBT1) でビームをチョップし、くし型構造 (中間バンチ) を作る。よって、リニアックでモニタすべき時間構造は、リニアックのビームマッチングのためにマイクロバンチ、及び RCS 入射ビームのマッチングのために中間バンチである。2023 年 4 月現在のリニアックのビーム条件と 1 MW を実現するためのリニアックのビーム条件を Table 1 に示す。2023 年 4 月現在のビーム出力は約 800 kW である。ピーク電流値は既に 50 mA を実現しているため、マイクロバンチとしては 2023 年 4 月現在の運転状況と 1 MW 時の運転状況は同じと言える。

一般的に大強度ビームをロスなく輸送するためには、バンチを構成する粒子数、縦横それぞれのビーム重心位置、縦横それぞれのビーム分布を測定する必要がある。

なお、バンチを構成する粒子数は電流値、ビーム重心は (x, x', y, y', t, E) 、ビーム分布は $(\alpha_x, \beta_x, \epsilon_x, \alpha_y, \beta_y, \epsilon_y, \alpha_z, \beta_z, \epsilon_z)$ を意味する。J-PARC リニアックでは、JCE と XAL で構成されたコミショニングソフトウェアシステムを用いて、ビーム調整を行う[2, 3]。

JCE は KEK で開発された SAD スクリプト言語を基にした、J-PARC リニアックのビーム調整用アプリケーションを作る開発環境である。XAL は米国 SNS で開発されたビーム軌道計算及び制御用ソフトウェアフレームワーク [4] で、加速器の機器情報を記述した設定ファイルとビームの情報を記述した設定ファイルの 2 つを用いて、加速器ビームのシミュレーションを行う。ビーム重心の挙動は 6 次元ベクトルを、ビーム分布の挙動は 6x6 の sigma matrix を用いてビームの挙動を予測もしくは実験結果と比較することで、最適な加速器運転条件を探索する。

本稿では、ビーム調整に現在使用中のリニアックビームモニタの概要説明と現状の取り組みについて紹介する。また、ビーム調整時に経験した、ビーム異常時の波形とその原因についても報告する。

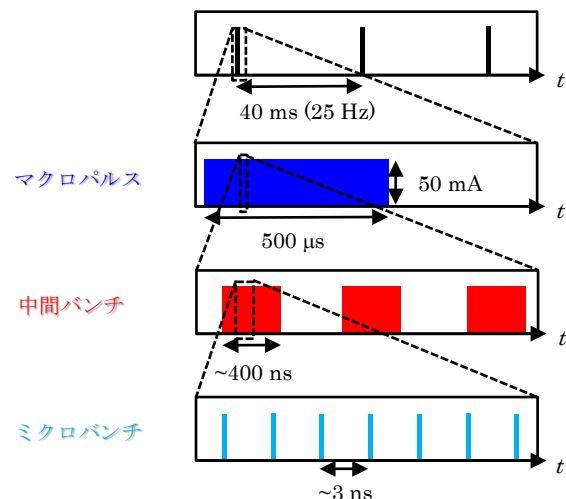


Figure 1: Beam structure in the J-PARC Linac.

[#] moriya.katsuhiko@jaea.go.jp

Table 1: Beam Condition in the J-PARC Linac

	Present status (April 2023)	1 MW (MLF)
Peak current	50 mA	50 mA
Ext. energy	400 MeV	400 MeV
Macro pulse width	500 μ s	500 μ s
Chop width	420 μ s	440 ns
Repetition rate	25 Hz	25 Hz

2. リニアックビームモニタの概要

J-PARC リニアックでは、大強度ビームを測定するために必要不可欠なビームモニタを設置している。また、これまでも J-PARC リニアックのビームモニタの現状について報告した資料はいくつかあるが、8 年以上前のものである[5-9]。ビームモニタの現状について当時からの変移を主に報告する。

2.1 電流値モニタ (SCT)

Figure 2 にビーム電流値を測定するための Slow Current Transformer (SCT)を示す。SCT には、透磁率の高いコア材としてプロテリアル製(旧日立金属製)ファインメット(FT-3M)を採用している。コイルの巻き数は 50 ターンである。J-PARC リニアックの SCT の測定精度は ± 0.1 mA 以下である。なお、後述するが Fast Current Transformer (FCT)も同じケース内に入っている。

ビームモニタの測定性能に大きな問題は今のところない。ただし、東日本大震災や震度 4 以上の地震により、セラミックスブレイクが割れたことがある[10]。

2.2 横方向重心位置モニタ (BPM)

Figure 3 にビーム横方向重心位置を計測するための Beam Position Monitor (BPM)を示す。ストリップライン型を採用している[11,12]。応答速度や幅広いダイナミックレンジを確保するために、検出回路に Log-Ratio 法を採用した。これよりダイナミックレンジ 30 dB 以上、位置分解能 ± 0.1 mm 以下を実現しており、利用運転中の 50 mA ビームだけでなく、ビーム調整時の 5 mA 程度の低電流ビームも精度よく計測できる。設置位置の制約から全ての BPM を四重極電磁石に抱き合わせる形で設置している。エネルギーに応じてストリップラインの端子間距離を変えることが望ましいが、製作のコストを削減する目的か

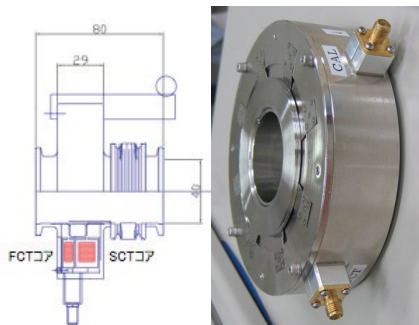


Figure 2: Layout of current transformer (SCT and FCT).

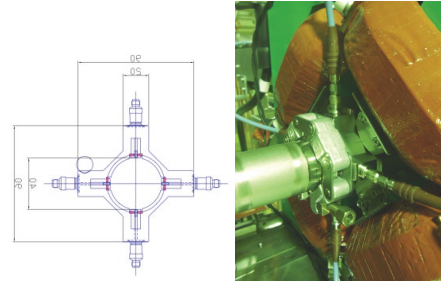


Figure 3: Layout of beam position monitor.

ら加速空洞の種類毎に 3 種類の長さで製作している。

これまで BPM が壊れたことはない。なお、スペースの都合で、DTL の Drift Tube 内に BPM を設置していない。

2.3 縦方向重心位置モニタ (FCT)

SCT でも説明した通り、FCT は SCT と同じケース内に入っている(Fig. 1 参照)。コア材は SCT と同じファインメットで、コイルの巻き数は 1 ターンである。位相検出器を用いて、FCT の出力とモニタ用基準信号(324 MHz)を比較することで位相差を検出し、位相分解能は ± 1 度以下である。また、2 台の FCT を用いてエネルギー測定を行う。

FCT の使用は主にビーム調整時とビーム異常時の診断のみで、利用運転中に FCT はあまり使われておらず、現在その活用に向けた調整を行っている。

2.4 横方向分布モニタ (WSM)

Figure 4 にビーム横方向分布を計測するための Wire Scanner Monitor (WSM)を示す。一軸の駆動部に対して 45 度傾けたワイヤを 2 本張ることで、ビームを当てた時ワイヤに流れた信号から横方向のビーム分布を計測する[13,14]。駆動系にはステッピングモータ(オリエンタルモーター製)を採用し、最小 0.1 mm 間隔で測定を行う。ワイヤの材料はエネルギーによって異なり、3 MeV (MEBT1)では日立造船製 Carbon Nanotube (CNT)[15,16]、それ以外ではタングステンを採用している。CNT に交換してからは、ビーム測定時に意図せずワイヤを破断したことはこれまでに一度もない。

Figure 5 に WSM を用いたビーム測定結果の例を示す。左図はモータドライバ交換前の測定結果を示し、右図は交換後の測定結果を示す。なお、縦軸は信号の最大値で規格化している。交換前は 10^{-3} まで信号が見えていたが、駆動部の更新[17]により交換後は 10^{-2} 程度となり、ダイナミックレンジは約 1 桁低下した。原因は従来のモータドライバの生産終了により、新たに用意したモータ

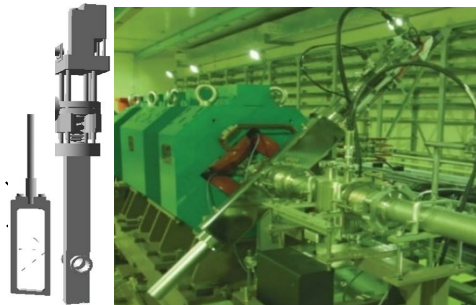


Figure 4: Layout of wire scanner monitor.

ドライバのノイズが大きいためである。ビーム調整に必要な分布幅 (rms 値) の算出には問題ないが、ハロー等のビーム異常を検知するためには対処をする必要があり、調査・検討を進めている。

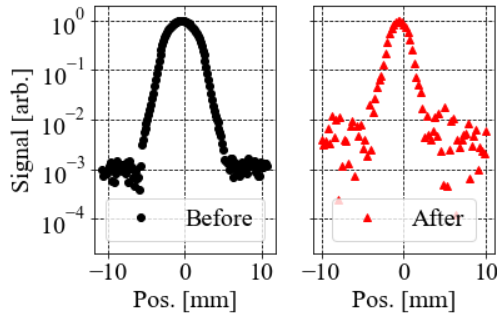


Figure 5: Transverse beam profile using the WSM.

2.5 縦方向分布モニタ (BSM)

Figure 6 にビーム縦方向分布を計測するための Bunch Shape Monitor (BSM) を示す。詳細な原理は Feschenko の論文[18]に任せ、ここでは簡単に説明する。Actuator を用いてビームライン上にワイヤを挿入する。挿入したワイヤはビームと衝突した際、ビームと同じ時間構造を持つ 2 次電子を生成する。ワイヤに印加した -10 kV により、生成した 2 次電子を検出器部に輸送する。RF Deflector が作る双極子場を用いて、2 次電子の縦方向分布を横方向分布に変換することで縦方向分布を計測する。

現在、J-PARC には 5 台の BSM がビームラインに設置されている。開発の時系列と現状について報告する。

2.5.1 INR-BSM (MEBT2:BSM)

SDTL から ACS へ輸送するビームの縦方向をマッチさせるために、開発者の Feschenko (当時 INR 所属) に 2009 年頃から連絡を取り始め、3 台の BSM を製作し、2012 年に ACS 設置予定位置に BSM (以下、INR-BSM) を設置した。ビームを測定できたが[19]、測定中に真空圧力が 10^{-3} Pa まで上昇することが判明した。この圧力は ACS 空洞の安定運転に支障がある。現在は ACS 空洞から離れた SDTL と ACS の間 (MEBT2) に INR-BSM を 1 台だけ再設置し、排気速度 300 L/s のターボ分子ポンプを 3 台繋ぐことで対応した[20]。主な原因は真空槽の表面処理と洗浄が不十分だったためである[21]。

現在、1 台の INR-BSM を用いて縦方向分布を測定できているが、Twiss parameter や Emittance (以下、ビームパラメータ) の算出には至っていない。

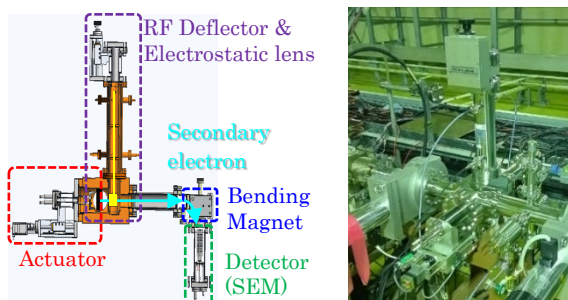


Figure 6: Layout of bunch shape monitor.

2.5.2 ACS:BSM

真空槽の表面処理・洗浄を行った BSM (以下、ACS:BSM) を 3 台新たに製作した [21]。2016 年に ACS1 の近くに ACS:BSM を 1 台設置し、ビーム測定を行った [22]。2018 年に残り 2 台を ACS2, ACS3 の近くに設置したが、それ以降、ビームの測定ができていない。現在、原因調査を進めている。

また、ACS:BSM 上下流に四重極電磁石 (QM) が隣接する。2 次電子をビームラインから検出器部へ輸送する際、漏れ磁場により検出器部まで届かないことが指摘され、磁気シールドの設置が検討された [23]。ACS:BSM を 3 台設置した時に磁気シールドも設置したが、固定が不十分だったため、QM 通電 ON/OFF 時にシールド位置が動いていることが判明した。Figure 7 の左図は ACS:BSM の写真、右図は通電前後の差分を示し、動いた部分を白く明示した写真である。右から左にビームは通過し、中央に ACS:BSM があり、緑色の物体が QM である。このままでは QM の GL 積を正しく見積もれないため、今年の夏に磁気シールドを撤去する予定である。なお、ACS:BSM 測定時に上下流の QM を OFF にしたままでもビームを下流まで輸送する運転条件があるため、磁気シールドが無くても 2 次電子を検出器まで輸送できる。

なお、INR-BSM で実現するつもりだった 3 台の配置は、ACS 空洞 1 台毎に BSM を設置して合計 3 ヶ所で測定することで、縦方向のビームエンベロップ計算からビームパラメータを求めるためであった。しかし、ACS:BSM の測定精度が ± 0.7 deg. 程度であるため、縦方向にミスマッチがあったとしても ACS:BSM では判別できず、代わりに横方向にミスマッチが生じることが数値計算で判明した [24]。なお、この問題は米国の SNS でも同様に問題視されている [25]。よって、測定精度の向上を目指すか、ACS:BSM1 台と BSM の上流に設置された加速空洞の RF 振幅を変えた時の縦方向幅の応答からビームパラメータを算出するか検討を進めている。

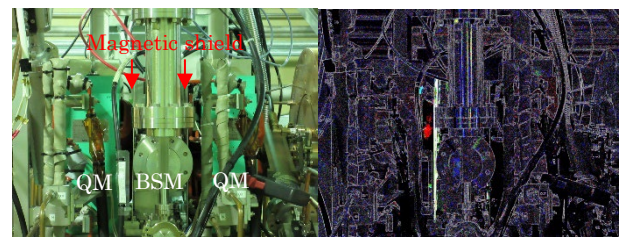


Figure 7: Magnetic shields installed upstream and downstream of BSM.

2.5.3 MEBT1:BSM

ACS:BSM の開発と同時期に、RFQ から DTL へ輸送するビームを縦方向にマッチさせるために、MEBT1 用 BSM (以下、MEBT1:BSM) が開発された [26]。開発当初は他の機器と同様にタングステンワイヤを採用していたが、大強度ビームに当てることで、断線が頻発した。そのため、破断しにくい材質として高配向性熱分解グラファイトを採用し、現在ではビームの測定及びビームパラメータの算出に成功している [27]。一方、ビームパラメータの算出に 10 時間以上要しており、ビーム調整の限られた時間内に解を出すまでには至っていない。また、固定さ

れた磁気シールドが設置されているが、GL 積への影響が未評価のため、評価もしくは撤去を検討している。

2.5.4 L3BT:BSM

400 MeV まで加速されたビームを観測するために、リニアックと RCS の間 (L3BT) に BSM(以下、L3BT:BSM)を設置した[24]。ビーム縦方向分布の測定ができた一方、ビームパラメータの算出ができていない。なお、ビーム測定時に加速電場の振幅を変えてビーム幅の応答を調べるが、操作する加速空洞と L3BT:BSM の間に別の加速空洞が一台ある。測定時はその空洞に RF を印加していないが、ビーム通過時に空洞内に電場が溜まったことを確認した(Fig.8)。この電場がビームパラメータの算出できない原因と考え、現在、低電流試験と測定時のみ空洞を detuning することを検討している。

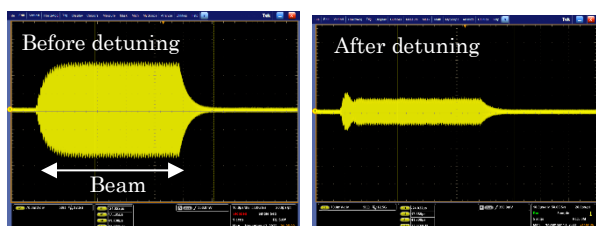


Figure 8: Unintended RF field in the acceleration cavity.

2.6 ビーム損失モニタ (BLM)

Figure 9 にビームロスを検出するための Beam Loss Monitor (BLM)を示す。現在、J-PARC リニアックでキャノン電子管デバイス製 (旧東芝電子管デバイス製) のガス封入型比例計数管 (E6876-600) を採用している。不活性ガスで満たされた円筒管内に放射線が入射すると、ガスは電離して電子を生成する。円筒管と中心に張ったワイヤの間にかけてられた高電圧によって電子は加速し、次々にガスと衝突し電離が生じ、この電子信号量から放射線を検出する。



Figure 9: Layout of beam loss monitor.

利用運転中は BLM の信号を常に監視・記録しており、閾値以上の信号を記録した場合は Machine Protection System (MPS)を発報し、利用運転を一時的に停止する。また、BLM に印加する高電圧も監視しており、指定した電圧が印加されていない場合も MPS を発報する。なお、BLM の MPS モジュール等は制御グループにより管理されている[28]。

2.7 その他のビームモニタ

SCT、BPM、FCT は非破壊型モニタのため利用運転

中でもビームを計測できるが、ビーム分布を測定する WSM や BSM は破壊型モニタのため利用運転中にビームを測れない。現在、真空技術を応用した、横方向分布を非破壊計測する Gas Sheet Monitor を開発している[29]。また、レーザーを用いた縦・横両方向のビーム計測も開発が進められている。

2.8 データ収集系

建設時に導入された WE800,WE900 (横河電機製) は現在も稼働している。ビームモニタの信号波形を 25 Hz 毎に記録せず、約 1 秒毎に記録する。ACS が設置された頃に導入された Wave Endless Recorder(日立造船製)も同様の動作をしている。

これらのデータ収集系には 2 つの問題があり、一つは既に生産が終了したこと、もう一つは最後の中間バンチのみを監視していることである。詳細は後述するが、マクロバンチ先頭部等でビームに異常があった場合、このシステムでは異常を検知できない。現在、後継機の検討を進めており、全中間バンチの波形を取得するだけでなく、25 Hz での波形取得可能なデータ収集系の検討を進めている。RCS では具体的な検討が既に進められており[30]、リニアックでは LLRF で使用している μ TCA.4 規格のデジタイザの転用等が検討されている[31]。

3. 最近のビーム異常とその原因

J-PARC リニアックでは、電磁石を DC 通電している。よって、ビームの行先が異なる場合や 25 Hz 毎に動作する機器は RF と制御機器である。そのため、ビーム異常のほとんどがビーム縦方向の異常を基に生じる。これまで MPS 発報時にマクロバンチ全体のビームモニタ波形を記録する仕組みを用いて、ビーム異常の原因調査を進めてきた[32]。ここでは、2017 年以降に測定したビーム異常について報告する。

3.1 LLRF の設定ミスにおけるビーム異常

ビーム調整時(50 mA、50 μ s)、L3BT に設置された一台目の偏向電磁石で大きなビームロスを検出した。QM の設定ミスではないこと、既存のデータ収集系ではビーム異常が分からないことから、マクロバンチ先頭部で縦方向ビームに異常があると考え、BSM でビームを測定した。

Figure 10 はビーム異常時の縦方向分布である。横軸はマクロパルス幅、縦軸は各マイクロバンチの位相である。マクロパルス先頭部で縦方向ビームが歪んでおり、原因は LLRF の Feedforward 設定の不備であった。この図は INR-BSM でビーム異常を検知した初めての結果である。

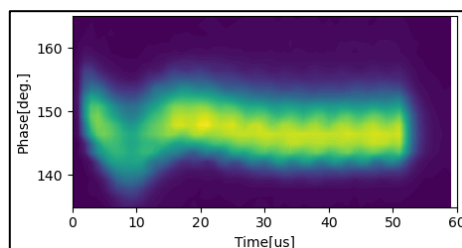


Figure 10: Beam anomaly measurement using INR:BSM.

3.2 リニアック出射エネルギー変動によるビームロス

ある時、RCS の Dispersion ピークや RCS と MR の間 (3-50BT) でビームロスが生じ、利用運転を一時停止させることが頻発した。当時、リニアック出射エネルギーを利用運転中に監視しておらず原因不明であったが、エネルギーを測定するとずれていたことが判明した。出射エネルギーが変わることで RCS 内の縦方向分布が変わったためである。現在、エネルギー変動が起きた時はリニアック最終段の加速空洞の位相を変えることでエネルギー補正を行っている[33]。また、リニアックでエネルギー変動が生じた原因は LLRF の制御機器が湿度により変動したためと判明したため、重要な機器は恒温恒湿槽に入れた。結果、リニアックのエネルギーは極めて安定し、対応以降は同様なビーム異常は起きていない。

4. まとめ

J-PARC リニアックでは、大強度ビームを安定に加速・輸送するために必要なビームモニタを設置・運用している。現在、縦方向分布を計測する BSM の整備とデータ収集系の更新を進めている。また、横方向分布を計測する WSM の駆動部更新によりノイズが増加したため、原因調査を進めている。

謝辞

J-PARC リニアックのビームモニタを維持管理・開発するために、J-PARC リニアックに関わる方々にご協力いただきました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators”, KEK Report 99-4, JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [2] H. Sako, *et al.*, “Development of Commissioning Software System for J-PARC LINAC”, MOPAN044, PAC07, Albuquerque, USA.
- [3] H. Sako, *et al.*, “Unified Beam Control System of J-PARC Linac”, IEEE Trans. Nucl. Science, Vol. 57, No. 3, pp. 1528-1536 (2010).
- [4] J. D. Galambos *et al.*, “XAL application programming structure,” in Proc. PAC2005, Oak Ridge, TN, p. 79 (2005).
- [5] 五十嵐前衛 他, “統合計画リニアック MEBT1 用ビーム・モニターとそのビームテスト”, 第 27 回リニアック技術研究会, 2002.
- [6] 富沢哲男 他, “J-PARC リニアック用ビームモニター”, 第 28 回リニアック技術研究会, 2003.
- [7] S. Sato *et al.*, “Upgrade of Beam Diagnostics in LEBT and MEBT of J-PARC LINAC”, Proc. of LINAC2004, 2004.
- [8] 三浦昭彦 他, “J-PARC リニアック ACS 加速空洞増強におけるモニターシステムの設計”, Proc. of PASJ2009, 2009.
- [9] A. Miura *et al.*, “Design and Delivery of Beam Monitors for the Energy-upgraded Linac in J-PARC”, J. Korean Phys. Soc. 66, 364 (2015).
- [10] A. Miura *et al.*, “Beam Monitor Deformation by Tohoku Earthquake and its Recovery Project”, Proc. of IPAC'11, San Sebastian, Spain, September, 2011.
- [11] T. Tomisawa *et al.*, “Design of 4-stripline beam position monitors of the J-PARC linac SCTL”, Proc. of 1st PASJ, 2004.
- [12] S. Sato *et al.*, “Systematic Calibration of Beam position Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of LINAC2004, 2004.
- [13] H. Akikawa, “Emittance Measurement with Wire Scanners at J-PARC Linac”, Proc. of 1st PASJ, 2004.
- [14] H. Akikawa, “Wire Profile Monitors in J-PARC Linac”, Proc. of LINAC2006, 2006.
- [15] A. Miura *et al.*, “Application of Carbon Nanotube Wire for Beam Profile Measurement of Negative Hydrogen Ion Beam”, Proc. of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, 2018.
- [16] T. Miyao, “Beam profile measurement using Carbon Nanotube Wires (4)”, Proc. of PASJ2020, 2020.
- [17] H. Takahashi *et al.*, “Standardization of Stepping Motor Control System in J-PARC Linac and RCS”, Proc. of PASJ2018, 2018.
- [18] A. V. Feschenko, “Methods and Instrumentation for Bunch Shape Measurements”, Proc. of PAC2001 (2001) and references therein.
- [19] A. Miura *et al.*, “Bunch Length Measurement of 181 MeV Beam in J-PARC Linac”, Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, 2013.
- [20] T. Miyao *et al.*, “Improvement of the Vacuum Pressure of the Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of PASJ2015, 2015.
- [21] K. Futatsukawa *et al.*, “Development of Bunch Shape Monitor at J-PARC Linac”, Proc. of PASJ2015, 2015.
- [22] K. Futatsukawa *et al.*, “Development of bunch shape monitor at MEBT2 of J-PARC linac”, Proc. of PASJ2017, 2017.
- [23] J. Tamura *et al.*, “Numerical Study on the Effect of Magnetic Shield of a Bunch Shape Monitor in J-PARC Linac”, Proc. of IPAC2013, 2013.
- [24] 守屋克洋, “J-PARC リニアックの縦方向ビーム分布測定とその課題”, 2021 年度ビーム物理研究会, 2021.
- [25] A. Aleksandrov, “Operational Experience with BSMs at SNS”, Topical Workshop on Bunch Shape Measurement, 2013.
- [26] S. Fukuoka *et al.*, “Development of bunch shape monitor and study of longitudinal beam matching at J-PARC linac”, Proc. of PASJ2017, 2017.
- [27] R. Kitamura *et al.*, “Measurement of the longitudinal bunch-shape distribution for a high-intensity negative hydrogen ion beam in the low-energy region”, Phys. Rev. Accel. Beams, 26, 032802 (2023).
- [28] H. Takahashi *et al.*, “Update of MPS modules for J-PARC Linac and RCS”, Proc. of PASJ2019, 2019.
- [29] I. Yamada *et al.*, “High-intensity beam profile measurement using a gas sheet monitor by beam induced fluorescence detection”, Phys. Rev. Accel. Beams 24, 042801 (2021).
- [30] M. Yoshimoto *et al.*, “Development of new data acquisition system for several beam monitors in J-PARC RCS”, Proc. of PASJ2023, 2023.
- [31] E. Cicek *et al.*, “Implementation of an Advanced MicroTCA.4-based Digitizer for Monitoring Comb-Like Beam at the J-PARC Linac”, Proc. of IPAC2022, 2022.
- [32] N. Hayashi *et al.*, “Interlocked events of beam loss monitors at the J-PARC linac”, Proc. of IPAC2017, 2017.
- [33] K. Moriya *et al.*, “Energy measurement and correction for stable operation in J-PARC”, J. Phys.: Conf. Ser. 1350 012140 (2019).