

## J-PARC リニアック低電力高周波制御システムの現状 CURRENT STATUS OF LLRF SYSTEM FOR J-PARC LINAC

二ツ川健太<sup>\*,A)</sup>, Ersin Cicek<sup>A)</sup>, Osman Emre Delialioğlu<sup>B)</sup>, 方志高<sup>A)</sup>,  
福井佑治<sup>A)</sup>, 溝端仁志<sup>A)</sup>, 中野秀仁<sup>C)</sup>, 佐藤福克<sup>D)</sup>  
Kenta Futatsukawa<sup>\*,A)</sup>, Ersin Cicek<sup>A)</sup>, Osman Emre Delialioğlu<sup>B)</sup>, Zhigao Fang<sup>A)</sup>,  
Yuji Fukui<sup>A)</sup>, Satoshi Mizobata<sup>A)</sup>, Hideto Nakano<sup>C)</sup>, Yoshikatsu Sato<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> SOKENDAI

<sup>C)</sup> Japan Atomic Energy Agency

<sup>D)</sup> NAT

### Abstract

At the J-PARC LINAC, the digital feedback and feedforward (DFB&FF) systems within the low-level radio frequency (LLRF) control system play a crucial role in achieving high-precision cavity fields. These ensure the stability of the required output momentum from LINAC. The 324-MHz DFB&FF system, comprising 24 units, has been updated with a new digital system until 2022. However, the development for updating the 972-MHz DFB&FF system has not progressed, constrained by budget limitations. On the other hand, the advancements of LLRF systems, developing of the automatic the RF start-up process and enhancing temperature control of the current system, have been carried out to be feasible within a limited development budget. In addition, a beam loading compensation system corresponding to thinnings pulse beam has been developed. In the beam study, this system suppressed the aggravation on RF field stability even in the presence of thinnings. The chopper system to kick two scrapers by the phase rotation been tested to confirm the beam quality for the high-intensity beam test.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex, 以下 J-PARC) の大型加速器は、400-MeV リニアック (LINAC)、3-GeV 陽子シンクロトロン加速器 (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、30-GeV 陽子シンクロトロン加速器 (Main Ring synchrotron, MR) で構成されている。加速器された世界最高レベルの強度の陽子ビームは、物質・生命科学実験施設 (Materials and Life science experimental Facility, MLF)、ニュートリノ実験施設 (neutrino experimental facility) やハドロン実験施設 (hadron experimental facility) に供給される [1]。

J-PARC リニアックでは、324 MHz と 972 MHz の 2 種類の加速周波数の高周波 (Radio Frequency, RF) が使用される。24 式の 324-MHz ステーションと 25 式の 972-MHz ステーションの全部で 49 式のステーションがある。空洞内の加速電界の制御を行う低電力高周波制御 (Low-Level RF, LLRF) システムでは、空洞電界の安定度の性能要求を満たすために、FPGA (Field-Programmable Gate Array) に実装したデジタルフィードバック・フィードフォワード (DFB&FF) システムが活用されている。cPCI (compact Peripheral Component Interconnect) をプラットフォームとした建設時の DFB&FF システムにおいては、アナログ及びデジタルボードで多数の製造中止が発生しており、かつ完全互換品での維持も困難であるため、速やかな次世代の DFB&FF システムの開発と更新が緊急の課題となっている。最初にデジタル系を更新すべく、デジタルイザボックス [2] を利用した次世代の DFB&FF システムを開発した。2020 年の年始と同年のゴールデンウィークに、それぞれ SDTL02 と SDTL13

ステーションに開発した DFB&FF システムの試験運用を開始した。2020 年の夏期シャットダウン中には、DTL2-3、SDTL01-16 ステーションにおいて、大きな問題なく新システムへ移行することができた。2021 年の夏期シャットダウン中には、RFQ と DTL1 にもデジタルイザボックスを導入した。また、残りの 324-MHz システムである MEBT1 の buncher1-2、chopper1-2 にアナログ系も更新された  $\mu$ TCA.4 システムを利用した DFB&FF システムへの更新した。これにより、全 24 式の 324-MHz DFB&FF システムに対して、デジタル系の更新が完了した [3]。高機能の FPGA への更新により配列でのパラメータ設定や細かいモニタが可能になり、高精度のビーム負荷補償システムを組込むことなどが可能になった [4,5]。

MEBT1 以外の 324-MHz アナログ系の更新及び 972-MHz DFB&FF システムの更新の重要性は理解しているが、予算の制限もあり、思うように開発や更新は進んではいない。一方で、現在の LLRF システムに対して、開発費用をあまり必要としないソフトウェア面から強化して、システムの高度化を試みている。一つ一つは小さな更新であり、本件は取留がない発表ではあるが、この積み重ねにより、DFB&FF システムを更新したときに増加する負担を和らげられることを期待している。また、高度化により現在の LLRF システムの品質が向上され、高品質なビーム安定運転に資すると考えている [6]。

### 2. 恒温化の強化

リニアックの LLRF システムが設置されているクライストロンギャラリでは、J-PARC 建設当時から温度による位相ドリフトの影響を懸念したこともあり、ギャラリの空調システムは温度を  $27 \pm 1$  °C の安定度で制御

\* kenta.futatsukawa@kek.jp

している。一方で、ギャラリー内の湿度は、空調システムでは制御されておらず、外気の変動に影響されて年間を通して凡そ 15% から 65% まで変動している。ギャラリーの湿度によって LLRF システム内で位相ドリフトが発生し、リニアックからの出射ビームの運動量も変動した。その影響により、ギャラリーの湿度と下流施設のビーム損失に明確な依存関係があった。そこで一部の 19 インチラックにおいて、高気密ラックと精密空調機を用いて、LLRF ラック内を恒温恒湿に管理した空気で循環させことで、ギャラリー環境と独立した恒温恒湿の環境を設けた。この環境が整備されたのは、

1. 高周波基準信号を生成、分配している MEBT1 ラック、
2. 324-MHz DFB&FF システムの基準となる SDTL16 LLRF ステーションの 2 連結ラック、
3. 972-MHz DFB&FF システムの基準となる MEBT2 B1 (Buncher 1) LLRF ステーションの 2 連結ラック、
4. MEBT1 の  $\mu$ TCA.4 の DFB&FF システムが実装されている集約ラック

の 4 箇所である。これらの DFB&FF システムでは位相ドリフトが発生しない基準と仮定して、324-MHz システムと 972-MHz システムに対して独立で位相ドリフトの補正を行っている [7,8]。

これらのステーションでは、高気密ラックに入れ替え、空気の流入を極力小さくしている。一方で、伝導による熱の流入が起因と思われるラック内温度の日々変動が観測されていた。そこで、MEBT2 B1 の LLRF ラックにおいて、ラック内側に下記の断熱材を貼り付けて、熱の流入を抑制する試験を実施した。

- 20 mm 厚 エアロフレックスシート
- 6 mm 厚 エアロテープ (粘着)
- 3 mm 厚 エアロテープ (粘着)

断熱材は、扉だけでなく、側面、床や天板まで可能な限りラックの金属が見えていた箇所を覆うように貼り付け、恒温化対策を実施した (Fig. 1)。PLC (Programmable Logic Controller) のタッチパネルや、VSWR メータの LCD (Liquid Crystal Display) パネルなどは、現場で確認

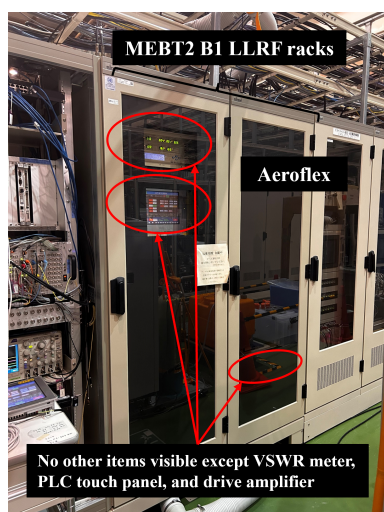


Figure 1: MEBT2 B1 racks with thermal insulation attached.

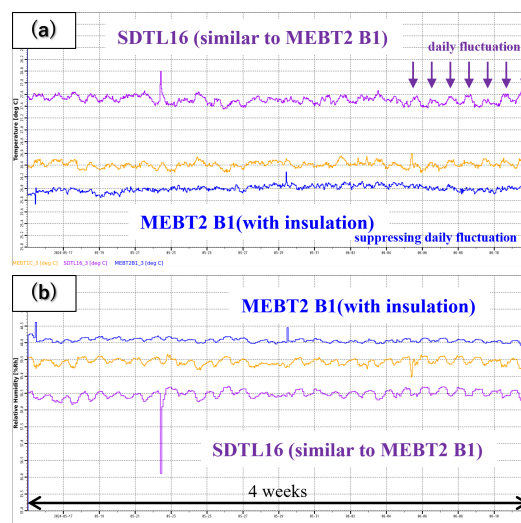


Figure 2: (a) temperature and (b) humidity trends in 19" racks, respectively.

できるように断熱材をくり抜いている。集約ラック、SDTL16 ラック及び MEBT2 B1 ラックにおいて、ラック内の温湿度の 4 週間分の時系列データが Fig. 2 になる。時々、データ内で値が跳ねているのは、メンテナンス時にラックの開閉を行った影響であり、今回の試験における興味の対象外である。MEBT2 B1 に設置場所が近く、LLRF 機器の構成が似ている SDTL16 ラック内の温度は日々変動をしている。一方で、恒温化対策を実施した MEBT2 B1 ラック内の温度は日々変動の影響が抑制してされている。湿度に関してはまだ若干の日々変動が見えているため、継続して原因の調査を行っている。

断熱材は、恒温化の強化に一定の効果があることが確認できたため、他の恒温恒湿ラックにも同様な対策を実施する予定である。

### 3. 半日・1日メンテナンスからの RF 立上げの自動化

J-PARC では、通常 1 週間に 1 回の半日または 1 日メンテナンスが予定される。リニアックでは、加速器空洞への大電力 RF の印加を停止し、加速器トンネルへ入域しメンテナンス作業が実施されることが多い。加速器トンネル内での作業終了後に、加速器空洞への大電力 RF の印加を再開するが、全部で 49 式ある LLRF システムの状態を確認や同時に実施される可能性があるパラメータ再調整は少なからず負担になっていた。また、再調整などの基準が、RF 立上げの担当者によって曖昧であるなどの問題点があった。

そこで、半日または 1 日メンテナンスの RF 停止時からの立上げ過程の大部分を自動化した。RF 立上げにおいて、GUI (Graphical User Interface) は CS-Studio (CSS) で作成され、これが個別の GUI ランチャとチェックリストの役割を果たしている。今回、自動化された部分は python で記述し、Fig. 3 に示すその GUI はこのランチャから立ち上げることができる。自動化した RF 立上げプログラムの内容は、下記の通りになっている。

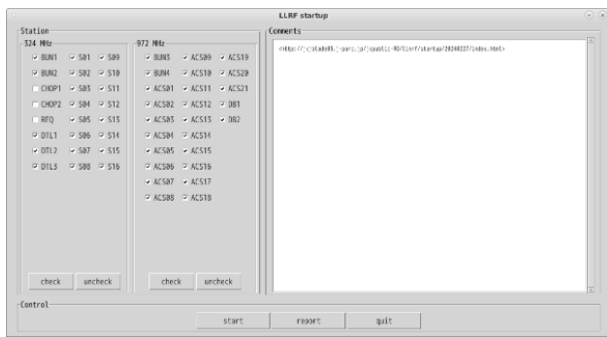


Figure 3: GUI of automatical RF start-up program.

RF ON 前：

- タッチパネル機能付きディスプレイ用の PC (TP-PC) 24 台のフリーズの確認 (ポップアップ警告)
- LLRF PLC 49 台のリモートの確認 (ポップアップ → リモート変更)
- LLRF PLC 49 台の時刻の確認 (自動調整)
- cPCI 25 台への通信確認
- 49 式 LLRF システムのインターロックのリセット (不可の場合、ポップアップ警告)

RF-ON 中：

- 49 式 RF-ON(3 回までは自動再試行、それ以降はポップアップ警告)

RF-ON 中：

- VSWR メータ 49 式の設定値の確認 (ポップアップ警告)
- 24 式 J-PARC イベントタグ受信の確認 (受信機能の自動再起動)
- 漏水検知器の漏水信号の確認 (ポップアップ警告)
- 24 式ファン動作の確認 (ポップアップ警告)
- 精密空調機への供給純水の電気伝導率の確認 (ポップアップ警告)
- ラック内環境管理システムのマスク状態の確認 (ポップアップ → マスク解除)
- RFQ 高速自動復帰の状態の確認 (自動オン変更)

RF-ON、RF 安定後：

- 24 式ドライブアンプの利得の変動の確認 (ポップアップ警告)
- 49 式ドライブアンプの出力低下の確認 (ポップアップ警告)
- 位相ドリフト補正のオン状態の確認 (ポップアップ → オン変更)
- 49 式 離調度 (チューナ自動制御) の確認 (ポップアップ警告)
- 49 式 FB 補正量の確認 (自動 DAC 調整)
- 24 式 高速モニタのオン状態の確認 (自動オン変更)
- ビーム無し時の RF 安定度の確認、グラフ作成
- RF 一定領域の猶予の確認、グラフ作成

これらの内容は、何か問題が発生したり、不便を感じたりすると、現在進行中で改良を加えている。現在、自動で行っていない過程は、3 種類の時系列データの保存、同軸管の温度測定システムのフリーズの確認、通常特定の PC で起動している RF ダウン時の波形を自動取得するシステムの起動だけである。

このプログラムによる RF 立上げの結果は、Fig. 4 の

ように自動的にレポートとしてまとめられ、J-PARC 基幹ネットワーク (JLAN) から確認することができる。基本的には、レポートは自動作成であるが、編集も容易にでき、RF 立上げ担当者名を記載したり、ポップアップで警告だけあった箇所にコメントを追記して上書きできる。レポートの末尾には、3 種類の時系列データ、ビームが無いときの RF 安定性やパルスドビームが通過する RF 一定領域の猶予のグラフのリンクが貼られる。

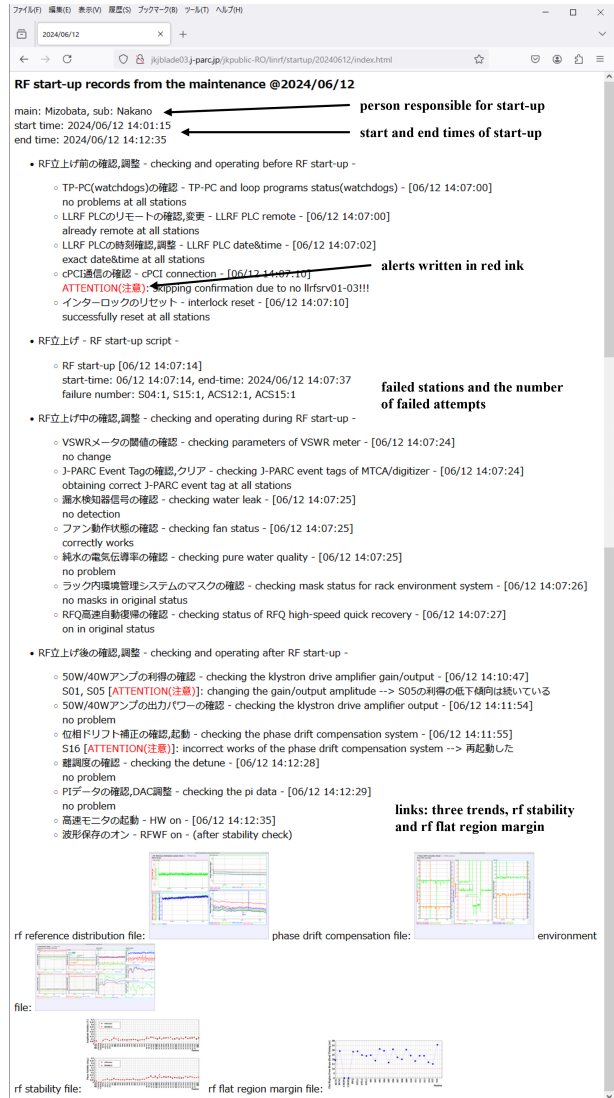


Figure 4: Automatically generated report of RF start-up. It can be checked on the web from the JLAN network.

## 4. ビーム試験

### 4.1 間引き対応のビーム負荷補償

J-PARC リニアックのマクロパルスと呼ばれる 25 Hz のビームは、下流の RCS で 2 バunch を生成させるため、通常中間パルスと呼ばれる周期 1.23 MHz、幅 456 ns の周期的な楕円構造をしている。度々、標的でのビームパワーの調整やビーム試験用に、リニアックで Fig. 5 の (b) や (c) のように周期的には存在するはずの中間パル

スのいくつかを敢えて無いようなビームを加速することがある。このときのビーム運転を間引き運転と呼んでいる。この間引き運転を使用すると、空洞の加速電界にとって外乱であるビーム負荷のパルス内変動が、加速電界の安定度を著しく悪化させ、既存のビーム負荷補償では設計時の要求精度を満たすことが困難に陥ってしまう。

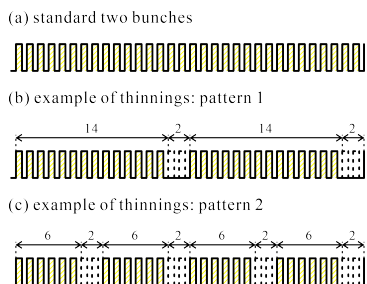


Figure 5: Intermediate-pulses (a) without thinnings and (b)(c) with thinnings, respectively.

そこで、中間パルス対応のビーム負荷補償システムを開発した [5]。中間パルスと同じ形状を持つ外部からの TTL (Transistor-Transistor Logic) 信号に応じて、中間パルス構造に応じたビーム負荷補償の出力のオン・オフをスイッチさせる。この手法での試験の結果、間引き運転でも空洞電界の悪化を抑制でき、更に、外部信号は中間パルス生成と同形状であるために、間引きのパターンを変更しても自動で追従できるなどの大きなメリットがある。一方で、ビーム負荷補償のために必要な DAC (Digital to Analog Converter) 出力増加分が、既存の負荷補償の 2 倍程度必要になり、空洞カプラ窓の破損リスクの増加や必要なクライストロン出力パワーの増加など、利用運転で利用するためにはデメリットもある。そのために、必要な出力パワーの増加がない、間引き対応したビーム負荷補償システムを開発した。Figure 6 に既存のビーム負荷補償 (左)、中間パルスに対応したビーム負荷補償 (中央) と間引きに対応したビーム負荷補償 (右) の概念図の比較を示す。間引きに対応したビーム負荷補償では、ソフトウェアが EPICS レコードの値から間引きがあるタイミングと幅を読み取り、そのタイミングのビーム負荷補償のテーブルの設定値を 0 にして、間引き運転に対応させた。

この開発した間引き対応のビーム負荷補償システムに関して、Fig. 5(b) や (c) の間引きパターンでビーム試験を実施した。このとき、ビーム負荷補償のテーブルを

間引きに応じて 0 にするタイミングをパラメータとしてスキャンし、一度決めたタイミングは間引きパターンを変えても共通とした。Figure 7 と 8 に Fig. 5(b) や (c) の間引きパターンにおいて、通常のビーム負荷補償 (黒線) と間引き対応のビーム負荷補償 (赤線) を使用したときの SDTL09 空洞ピックアップの RF 波形を示す。現在使用中のビーム負荷補償では間引きのタイミングで空洞ピックアップの振幅と位相の安定度が大きく悪化している。一方で、間引き対応のビーム負荷補償を使用することで安定度の悪化を抑制できた。間引きパターンを変更しても対応可能なようにソフトウェアは作り込む必要があるが、開発した間引き対応のビーム負荷補償は現実的に実装可能な方法であることを示した。残念なことに、この方法はデジタイザを更新していない 972-MHz DFB&FF システムでは使用できない。かつ Q 値の低い 972-MHz の ACS 区間の方が出射ビームに対する影響が大きい。972-MHz LLRF システムの DFB&FF システムが更新されたときには、この方法は間引きによる出射ビームの品質の悪化を抑制する有効な手段の候補になると考えている。

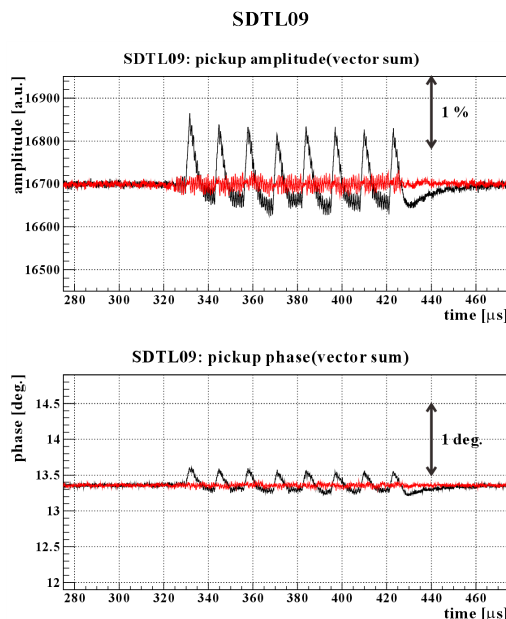


Figure 7: RF waveforms to utilize the beam loading compensations (black lines) of the present system and (red lines) corresponding to thinnings on the thinning pattern 1.

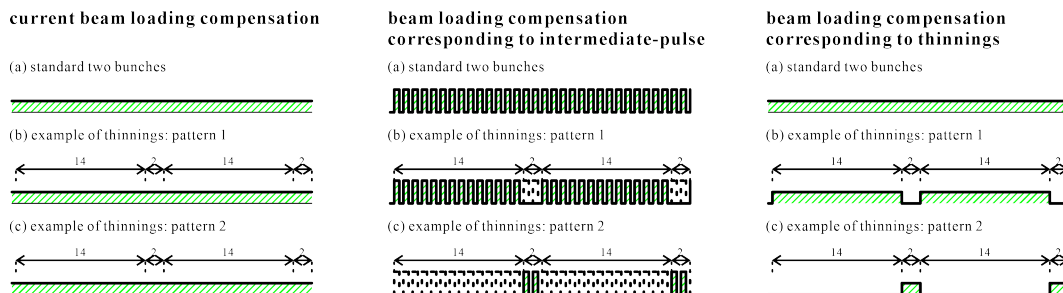


Figure 6: Comparison among various beam loading compensations (FF\_BEAM).

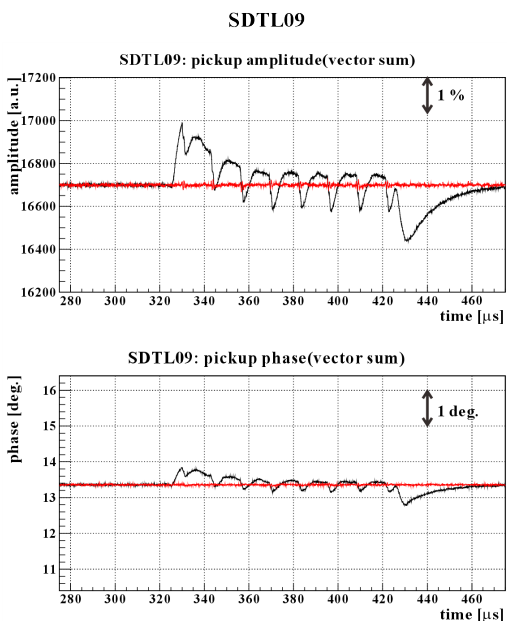


Figure 8: RF waveforms to utilize the beam loading compensations (black lines) of the present system and (red lines) corresponding to thinnings on the thinning pattern 2.

#### 4.2 高周波チョップ蹴り分け試験

J-PARC リニアックの中間パルスビームは、Q 値の低い高周波チョップ空洞の RF のオン・オフをスイッチさせることで生成されている。高周波チョップで蹴り出された不要なビームは、チョップ下流の炭素複合材料のスクレーパに照射され、全エネルギーを損失して止められる。3-MeV の負イオン化水素ビームが照射されることでスクレーパの温度が上昇すると、貯蔵された水素が放出されるブリスタリング現象が発生し、スクレーパの急激な劣化を招く恐れがある。そこで、2 式のスクレーパをビームラインを挟んで水平方向に配置して、チョップの位相を反転させることで中間パルス毎に 2 式のスクレーパへ蹴り分けるシステムを開発した [9]。

令和 6 年度の夏期メンテナンス前に、普段の利用運転より 1.5 倍にパワーを上げた 1.5 MW 相当のビーム試験が予定されていた<sup>1</sup>。このとき、瞬間的なスクレーパの熱負荷は 1.5 倍に増加するために、この蹴り分け機能を使用する予定であった。過渡領域では、1 式のスクレーパに蹴ったときのビームと、2 式のスクレーパに蹴り分けたビームでは、異なる品質になる懸念があった。そこで、1.5 MW ビーム試験の前に、通常電流 50 mA のビームでこの蹴り分けの特性を確認するためのビーム試験を行った。Figure 9 に (a) スクレーパ下流と (b) スクレーパ上流でチョップ下流の BPM 信号を示す。Figure 9 の (b) から、不要なビームが通路側とユーティリティ側に交互に蹴られていることが確認できる。

<sup>1</sup> ビーム試験は中止になった。

一方で、過渡領域のビームは、1 式のスクレーパに蹴ったときは水平方向の片側に存在するが、懸念した通りに 2 式のスクレーパに蹴ったときは両方に存在している。これは、マクロパルス全体で射影したときに、実効的なハローが広がって見える可能性があり、下流でビーム損失の原因になる可能性がある。今回、ビーム試験が中止されたことで、本試験も中断が、2 式のスクレーパへの蹴り分けシステムを使用する前に下流のビーム損失への影響を調べる必要がある。

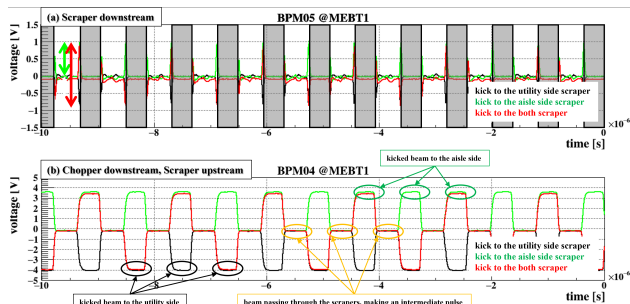


Figure 9: BPM signals of scraper (a) downstream and (b) upstream, respectively.

#### 参考文献

- [1] <https://j-parc.jp/c/en/index.html>
- [2] M. Ryoshi *et al.*, “MTCA.4 RF Signal Processing System”, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, p.340-344.
- [3] K. Futatsukawa *et al.*, “Development of DFB・DFE system for J-PARC Linac LLRF”, Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 9-12, 2021, p.371-375.
- [4] K. Futatsukawa *et al.*, “Development of the novel and superior adaptive beam loading compensation system calculated in the frequency domain for the J-PARC Linac”, J. Instrum., 17 (11) (2022), p. T11002.
- [5] K. Futatsukawa *et al.*, “Demonstration of beam loading compensation system for discrete beam with comb-like structure in proton linear accelerator”, Nucl. Instrum. Meth. A 1047 (2023) 167778.
- [6] K. Futatsukawa *et al.*, “Advancements in LLRF system at J-PARC LINAC”, Proc. of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Aug. 29-Sep.1, 2023, p.195-199.
- [7] K. Futatsukawa *et al.*, “Phase drift correction system of LLRF for humidity at J-PARC Linac”, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, July-Sep. 2-4, 2020.
- [8] K. Futatsukawa *et al.*, “Phase drift correction system of LLRF for humidity at J-PARC Linac”, Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 9-12, 2021, p.937-941.
- [9] K. Futatsukawa *et al.*, “Chopper Operation for the Tandem Scrapers at the J-PARC Linac”, Proc. of LINAC2014, Geneva, Aug. 31-Sep. 5, 2014, p.581-583.