

J-PARC リニアックにおける低電力高周波制御システムの現状 PRESENT STATUS OF J-PARC LINAC LLRF SYSTEM

二ツ川健太^{*A)}, Ersin Cicek^{A)}, 方志高^{A)}, 福井佑治^{A)}, 溝端仁志^{A)}, 佐藤福克^{C)}, 篠崎信一^{B)}
Kenta Futatsukawa^{*A)}, Ersin Cicek^{A)}, Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Satoshi Mizobata^{A)},
Yoshikatsu Sato^{C)}, Shinichi Shinozaki^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} NAT

Abstract

In the J-PARC linac, more than 15 years passed since the low level radio-frequency (LLRF) system were manufactured, and it is in a phase where failures increase due to aging deterioration. In the summer shutdown of 2020, we installed seventeen new digitizers instead of some digital boards of cPCI from DTL3 to SDTL16 for the digital feedback and feedforward (DFB·FF) system. We had to rebuild the LLRF system for this installation of the new digitizer. But we were able to perform the user operation without serious trouble. Also, it was clear that the momentum of the output beam fluctuates depending on the humidity of the klystron gallery. The RF reference distribution system was improved to be able to measure the phase drift from the summer shutdown of 2020. For some measured phase drift values, the operation of phase drift correction has been started.

1. はじめに

J-PARC リニアックの低電力高周波制御 (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 を用いたデジタルフィードバック・フィードフォワード (DFB·FF) システムを採用している。このシステムは開発期間から 20 年、量産から 15 年以上経過して、ハードウェアのモジュールの生産中止やソフトウェアの開発環境の維持が困難になっている (Table 1)。そこで、次世代の DFB·FF システムへの更新が緊急の課題になっている。そこで、DFB·FF を担っている cPCI のデジタルボード (CPU, FPGA/DSP, IO ボード) に代わる、ADC と DAC 及び FPGA を実装したデジタイザを開発した [1]。アナログ回路に関しては、cPCI のアナログボードの RF&CLK ボードとダウンコンバータ/IQ 変調器ボードをそのまま活用している。このデジタイザを実装するためには、PLC ラダー、可動チューナの自動制御、自動 RF 立上げ機能、インターロック履歴管理の変更など LLRF システムとしても大幅な改造が必要になる。そこでデバックの意味も含めて、2020 年の年始から SDTL02 ステーションで、ゴールデンウィーク明けから SDTL13 ステーションで開発したデジタイザを組込んだシステムの試験運用を開始している。

また、J-PARC リニアックの LLRF システムでは、ギャラリの湿度変動による出射ビームの運動量の変動が問題になっている。全ての LLRF システムの設置場所において恒温恒湿環境を準備することは現実的には困難である。そこで、一部の LLRF システムの設置場所に対して局所的な恒温恒湿環境の体制を整えて、正確なドリフト量の測定とその補正を検討している。現在、リニアック高周波基準信号分配システムの中核を成す MEBT1, 324 MHz ステーションの

最下流の SDTL16, 972 MHz ステーションの最上流の MEBT2B1 において、局所的な恒温恒湿環境を設けている [2, 3]。しかし、既設のモニタだけでは位相ドリフト量の全容を把握することができないため、高信頼度のモニタの追加が課題になっていた。

Table 1: Present Status of the DFB·FF System Using cPCI at the J-PARC Linac

manufacture:	
FPGA board	discontinued
DSP board	discontinued
CPU board	discontinued
development environment:	
FPGA	Xilinx ISE Ver 6.2i
DSP	TI Code Composer Studio Ver 2.1
host program:	Redhat 8.0 gcc compiler Ver 3.2
application	python 2.4/wxPython 2.6

2. デジタイザを用いた DFB·FF システム

2.1 デジタイザ

今回実装したデジタイザは、三菱電機特機システム製の μ TCA.4 AMC ボードの A/D·D/A 信号処理カードをベースにしている [4]。このデジタイザは、8ch 16bit ADC と 2ch 16bit DAC, Xilinx 製の FPGA (Zynq XC7Z045-1FFG900C) を実装している。また、このデジタイザの FPGA の内蔵 ARM プロセッサに linux をインストールして、EPICS-IOC を組み込んで制御・モニタしている。Table 2 にこのデジタイザの A/D·D/A 信号処理 AMC ボードの仕様を示す。

FPGA のブロックダイアグラムと他の RF 機器との取合いを Fig. 1 に示す。2020 年は第一段階として cPCI のデジタルボードだけをデジタイザに変更した。その際、cPCI のアナログボードの 324 MHz

* kenta.futatsukawa@kek.jp

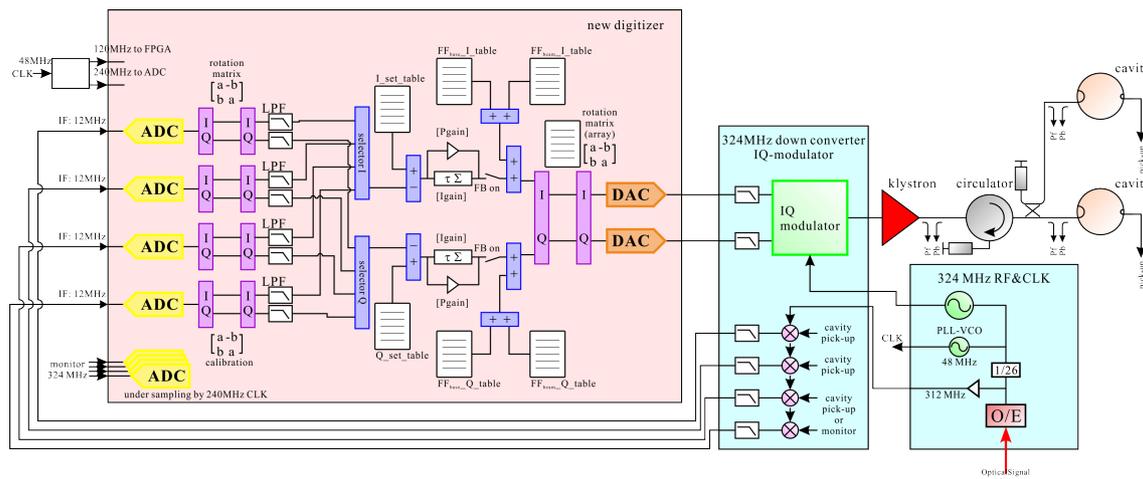


Figure 1: Digital feedback and feedforward system using μ TCA.4 with the block diagram in FPGA.

Table 2: Characteristics of the AMC Board of a New Digitizer for the LLRF System of the J-PARC Linac

platform:	μ TCA.4 AMC
FPGA:	Zynq XC7Z045-1FFG900C, QSPI FLASH-ROM 16 MB, SD-card Remote Update
RAM:	DDR3-SDRAM 1 GB \times 2 (PL, PS)
OS:	Xilinx Linux (EPICS-IOC)
ADC:	8ch 16bit 370MSPS(max.), BW: 800 MHz
DAC:	2ch 16bit 500MSPS
SFP:	2ports

RF&CLK ボードとダウンコンバータ&IQ 変調器ボードを、そのままデジタイザを使用した DFB-FF システムのアナログ回路として使用する。新しいデジタイザの FPGA のブロックダイアグラムは、既設の cPCI のものと比較して、モニタ点数及び要素数が増加しており、パラメータも配列で設定可能になっている。cPCI のダウンコンバータが 4 ch であったのに対して、デジタイザの ADC は 8 ch である。そこで、中間周波数 (IF) 信号に落とせない ADC5~8 は、ダイレクトサンプリングを採用している。

2.2 LLRF システム変更

既存の LLRF システムでは、重要な DFB-FF システムは cPCI ボード内に実装されているが、制御の中心はあくまで PLC である。cPCI の DFB-FF システムの設定パラメータ変更も PLC からシリアル通信で実行している。そのため、LLRF システムのほぼ全てのシーケンスは、LLRF PLC のラダーに組込まれていた。一方で、デジタイザを使用した新しい DFB-FF システムでは、デジタイザの情報は基本的に LLRF PLC を介さない。従って、デジタイザを導入するためには、下記のような LLRF システムの大幅な変更が必要になった。

- PLC ラダー：殆どがインターロックの管理だけ

の役割に変更

- 現場での操作：PLC 用のタッチパネルではデジタイザの制御ができないため、現場に PC を設置してタッチパネル機能付きディスプレイで操作
- 可動チューナの自動制御機能：現場 PC のバックグラウンドで python プログラムで制御
- 自動 RF 立上げ機能：現場 PC のバックグラウンドでスクリプトで制御
- 自動コンディショニング機能：java アプリケーションを用意

これらの機能は事前に SDTL02,13 でデバックを行ったこともあり、基本的には問題なく動作した。しかし、現場 PC がフリーズする現象が利用運転中も何度か発生している。周波数調整用の可動チューナは利用運転中は安定していて、ほとんど動作しないため、基本的にはビーム運転中に現場 PC がフリーズしても直ちに問題になることはない。しかし、一方で最初は PC のフリーズに数日間気が付かないということがあり、これを解決する必要があった。そこで、現在では現場 PC が動作しているかを監視するウォッチドッグを導入して、居室で PC の状態を監視できるようにしている。

2.3 ビーム負荷補償

2020 年の夏期シャットダウン前に、周波数領域で最適な値を計算するビーム負荷補償システムを開発した。デジタイザを先行して実装した SDTL02 ステーションでビーム試験を行い、良好な結果を得た [1]。実際に運用するためには、SDTL02 ステーションだけではなく同一のアルゴリズムで他のステーションの制御も行えることを確認する必要があった。

まず、ビームがないオフライン状態で、DTL3 から SDTL16 まで DAC 前の回転行列の最適化と応答関数を計算した。Figure 2 に計算された DTL3 の応答関数の振幅 (a) と位相 (b) の成分を示す。図の計算された応答関数から、1.6 MHz 近傍に特異点と約 4.4 MHz にピークが見える。DTL3 以外のステーションの応答

関数では、このようなピークを観測できなかった。このピークは加速モード以外の隣接モードが励振されたことを表していると考えている。

Figure 3 に、DTL3 においてビーム負荷補償が無いときの IQ 波形 (黒線) と開発したビーム負荷補償で 10 回試行したときの IQ 波形 (赤線) を示す。DTL3 に関しては応答関数に隣接モードの影響が見え、また他のステーションと比較して周波数に対する位相変動が大きかったため、ビーム試験前には心配したが、結論から言うと全く問題なかった。DTL3 から SDTL16 ステーションまで 100 回の試行を行う試験を行ったが、同一のアルゴリズムで 3 回程度で収束して、その後も発散することがないことが実験的に確かめられた。ビームが無いオフラインで応答関数を正確に求めておくことができれば、自動で最適化するビーム負荷補償は実機で使用可能と考えている。

リニアック RF では自動で定期的にデジタイザ区間の RF 波形を解析して安定性が悪いときに知らせると共に、RF 波形を保存するシステムを実装して運用している [5]。この RF 波形の解析と今回開発した自動で最適化するビーム負荷補償システムを組込むことを予定している。

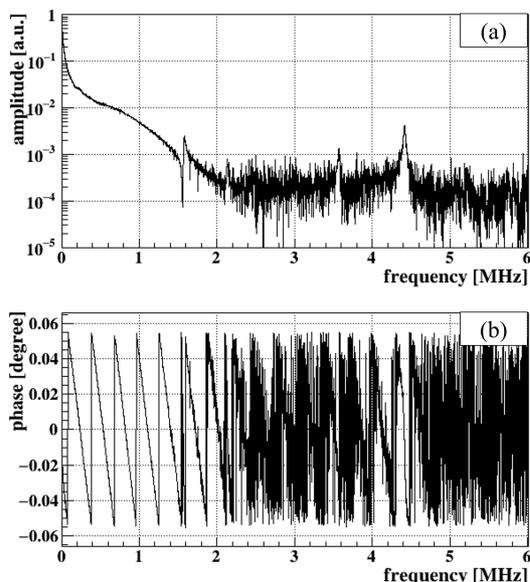


Figure 2: Response function of (a) amplitude and (b) phase for DTL3, respectively.

3. 局所的な恒温恒湿環境

3.1 経緯

リニアックの射出ビームの運動量がクライストロンギャラリの湿度に依存して変動していることが明らかになってから、J-PARC リニアック高周波基準信号分配システムの高周波基準信号発生器 CDX-KEK021 が実装されている MEBT1, 324 MHz 最下流の SDTL16, 972 MHz 最上流の MEBT2B1 の 3 箇所局所的な恒温恒湿環境を整えてきた。

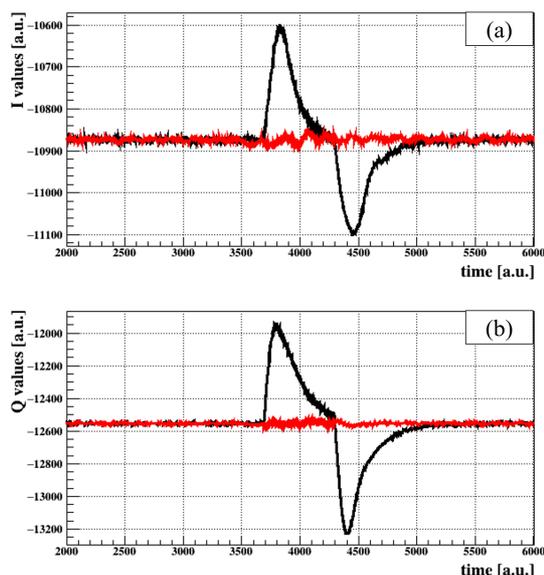


Figure 3: (a) I and (b) Q values with beam for DTL3, respectively. The black lines and red show those with the beam loading compensation and those after 10 times iteration, respectively.

2019 年の夏期シャットダウンの前までに、CDX-KEK021 が設置されている MEBT1 の 19" ラックに精密空調器 (PAU-A1400-S-HC) を設置した。これにより、発振器起因の RF 基準信号の湿度変動は大幅に抑制することができた。また、同ラックは 2018 年度は自営の目張りで空気の流出入を抑えていたが、2019 年の夏期シャットダウン中に気密性の高いラックに変更を行っている。

SDTL16 及び MEBT2B1 では、2019 年の夏期シャットダウン中に高气密ラックへの交換を行い、同年の 12 月から精密空調器 (PAP05A1-K) の運転を開始した。これにより、本ラック内の水蒸気量の変動をギャラリの水蒸気量の変動の 1/20 以下に抑制できている。ここでは、恒温恒湿環境に DFB-FF が実装されているステーションとギャラリ環境化にあるステーションの位相変動の比較をして、ギャラリ環境による位相ドリフトを見積もって補正を行っている。

3.2 MEBT1 の恒温恒湿環境の改修

J-PARC リニアック高周波基準信号発生器 CDX-KEK021 が設置されているラックに対して、恒温恒湿環境を整備したことでビームの安定度の向上が達成された。一方で、敷設している光ケーブルの湿度特性が無視できない量であることがオフラインの実測結果から推測できていた。そこで、2020 年の夏期シャットダウン中に高周波基準信号分配システムの改修を行った (Fig. 4)。まず、光カプラが実装されていた恒温槽を、湿度管理も可能な恒温恒湿槽に変更した。光信号を電気信号に変更する O/E モジュールを湿度による位相ドリフトを減らすために新しく開発しただけでなく、この恒温恒湿槽に実装して、耐湿と恒湿の両面から信頼度を上げた測定ができるよう

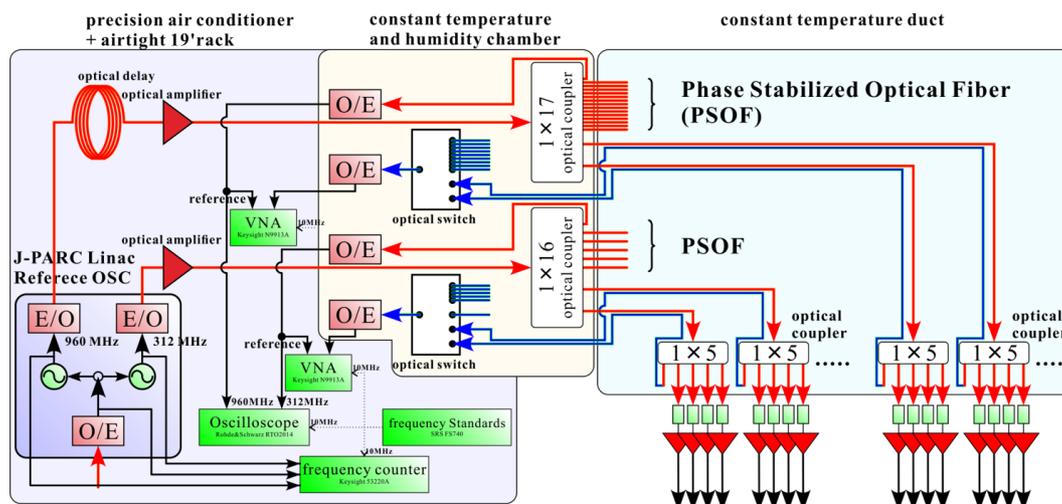


Figure 4: Improved RF reference distribution system.

にしている。

312 MHz LO と 960 MHz LO の 2 種類の周波数間の変動を測定するために、ローデ・シュワルツのオシロスコープ RTO2014 を恒温恒湿環境下に実装した。また、実際に周波数間に変動が生じたときの調整ノブとして、960 MHz の光信号配線には光遅延器を実装した。

高周波基準信号は、位相安定化光ファイバケーブルで各ステーションに分配されている。事前の見積りでは、960 MHz LO の最長ラインで湿度が 20% 程度の変動があったときに 0.3 deg. 程度の変動があると考えられた。各ステーションに敷設している光ケーブルには、既設でモニタ用に戻り信号ラインが用意されていた。そこで改修後の分配システムでは、この活用されていなかった戻り信号ラインを光ファイバケーブルの位相ドリフト量の測定用に活かしている。往路と復路で変動量が同じであり、変動量の 2 倍が測定値になるということである。O/E モジュールと測定器の数を削減するために、光スイッチを活用して、各ラインを順番に測定する方法を採用した。湿度による位相ドリフトはゆっくりした変動であると考えられるため、同時測定は必要ではないと考えている。測定器として温湿度特性が良いキーサイト・テクノロジー製 FieldFox ハンドヘルドマイクロ波アナライザ N9913A を使用している。この補正は分配先のステーションの DFB-FF システムでデジタル的に位相を回転させることで実施している。

基準信号のような長距離伝送の場合は、周波数変動は末端での位相変動に繋がるために、各周波数の確度も測定する必要があると考えた。測定には、SRS 製の GPS 時刻周波数システム FS740 とキーサイト・テクノロジー製の周波数カウンタ 53220A を恒温恒湿の環境下に実装して使用している。

3.3 測定結果

Figure 5 に周波数カウンタで測定した周波数の年間変動 (a) と、N9913A で測定した光ファイバケーブルの各ラインの位相ドリフトの測定結果 (b)(c) を示

す。年末年始でタイミング系の停止があったためか不連続点があるが、それを除いても 960 MHz の周波数変動は年間で 2Hz 以上はあることが明確になった。これは、J-PARC マスタークロックの 12 MHz が変動していることに起因している。但し、最大の周波数が 972 MHz で最長のケーブル長が 300 m 程度の J-PARC リニアックでは、この周波数変動から計算される位相変動は 0.01 deg. 以下となり、周波数変動は無視できる。光ファイバケーブルの各ラインの位相ドリフトの測定結果は、2 月 13 日にも原因不明な不連続点があり信頼度に欠けるが、測定された変動量は無視できない値であった。湿度によって各ラインが影響を受けて位相ドリフトが発生していると仮定すると、ケーブル長に位相ドリフト量が比例することが期待できる。正確な各ケーブルのケーブル長のデータが存在する訳ではないが、この 1 年間の測定結果を定性的も解釈できていない。現在では光ファイバケーブルでの位相ドリフト量の補正は行っておらず、2021 年の夏期シャットダウン中に測定結果が解釈できない原因の調査を行う予定である。

Figure 6 に SDTL16(a) と MEBT2B1(b) の空洞間位相監視モニタで測定した位相ドリフトモニタの測定結果を示す。(a) は SDTL16 と SDTL15 の位相比較、(b) は MEBT2B1 と MEBT2B2 の位相比較を行っている。恒温恒湿環境下にある LLRF システム (SDTL16 と MEBT1B1) は位相変動がなく、ギャラリ環境下にある LLRF システムの位相ドリフト量は個体差が小さく同量であると仮定して、各ステーションの DFB-FF システムを使用してデジタル的に補正している。python で書かれた補正プログラムは基本的には 1 年間を通じて問題なく動作したが、324 MHz において 4 月 18 日に補正の上限値に達したためにプログラムが停止する事象が発生した¹。DFB-FF システムの位相ドリフトの 1 年間の経験が得られたので、

¹ 補正値の上限をプログラム上で定義していて、上限に達成した場合は自動でプログラムが停止するようになっていた。

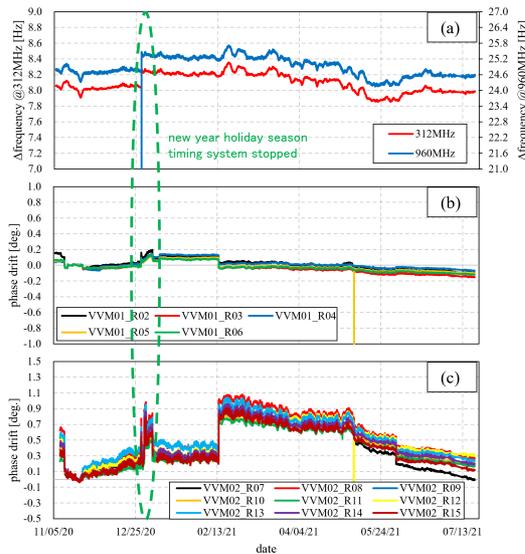


Figure 5: (a) the measured frequencies of the LO signals and the phase drift for each optical lines of (b) 312 MHz LO and (c) 960 MHz LO, respectively.

閾値の上限を見直して 2021 年の夏期シャットダウン以降の運転を行う予定である。Figure6(c) は恒温恒湿環境化に設置されたオシロスコープで測定した 312 MHz LO 信号と 960 MHz LO 信号の差である。光遅延器で補正を行い、2 つの周波数の位相関係を一定に担保することができた。

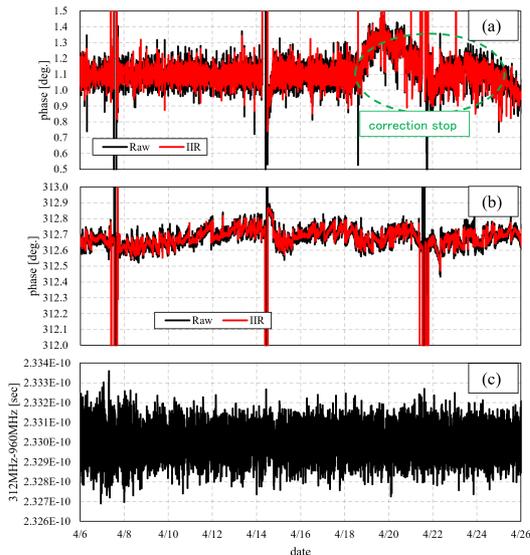


Figure 6: The phase difference measured by the cavity phase monitor of (a) SDTL16 and (b) MEBT2B1, (c) time difference between 312 MHz LO and 960 MHz, respectively.

4. まとめ

2020 年の夏期シャットダウン中にデジタイザを使用した DFB-FF システムを DTL3 から SDTL16 までの 17 ステーションに実装して運用を開始している。このデジタイザを実装するためには、PLC ラダー、可動チューナの自動制御、自動 RF 立上げ機能、インターロック履歴管理の変更など LLRF システムとしても大幅な変更が必要だったが、スムーズに運転まで繋げることができた。

2020 年の夏期シャットダウン中に MEBT1 に設置されている高周波基準信号分配システムを改修して、湿度による位相ドリフトを測定するためのモニタを追加した。現在、位相ドリフトの補正が必要かの判断をしている測定結果の蓄積を行っている。

参考文献

- [1] K. Futatsukawa *et al.*, “Present Status of J-PARC Linac LLRF System”, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, July Sep. 2-4, 2020.
- [2] Y. Fukui *et al.*, “Construction of constant humidity environment for low-level RF system at J-PARC linac”, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, July Sep. 2-4, 2020.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Y. Sato *et al.*, “Analysis of the J-PARC linear accelerator RF down phenomena 2”, THP043 in these proceedings, Online, Oct. 9-12, 2021.