

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

ニツ川健太 ^{*,A),B)}, Ersin Cicek ^{A),B)}, Osman Emre Delialioglu ^{B)}, 方志高 ^{A),B)},
福井佑治 ^{A)}, 溝端仁志 ^{A)}, 中野秀仁 ^{C)}, 佐藤福克 ^{D)},
Kenta Futatsukawa ^{*,A),B)}, Ersin Cicek ^{A),B)}, Osman Emre Delialioglu ^{B)}, Zhigao Fang ^{A),B)}
Yuji Fukui ^{A)}, Satoshi Mizobata ^{A)}, Hideto Nakano ^{C)}, Yoshikatsu Sato ^{D)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} SOKENDAI

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

^{D)} NAT Corporation

Abstract

At J-PARC LINAC, a digital feedback and feedforward (DFB&FF) system is employed to meet the stringent stability requirements of the cavity field. As part of an obsolescence mitigation program, the upgrade from a cPCI-based platform to either a digitizer-box or a μ TCA.4-based DFB&FF system has successfully performed for 324-MHz stations. During the summer shutdown in 2024, the RFQ digital control system was migrated from the digitizer box to the μ TCA.4-based system in order to secure a spare RF&CLK board. The new system offers broader applicability and has been operated with beam-loading compensation for thinned beams, enabling the required performance to be maintained even with the thinning beams destined for MR. In addition, the response time of the RF switch implemented on the μ RTM board was measured, confirming that it can serve as a replacement for the ‘pulse modulator & RF switch module’ of a NIM module. We will proceed with the replacement of the 324-MHz analog boards and the upgrade of the 972-MHz DFB&FF system in order of priority. In light of the increasing number of discontinued components, we will prioritize the replacement of 324-MHz analog boards, followed by the upgrade of 972 MHz DFB&FF systems.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は、世界屈指の高強度陽子ビームを誇る加速器施設であり、国際的な最先端研究の拠点として多岐にわたる科学実験に利用されている。施設内の加速器群は、400 MeV まで加速するリニアック (LINAC)、3-GeV の陽子シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron: RCS)、および 30-GeV の陽子シンクロトロン (Main Ring synchrotron: MR) で構成されている。これらの加速器により生成された高強度の陽子ビームは、RCS から取り出される 3-GeV ビームを利用する物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science experimental facility: MLF)、MR からの 30-GeV ビームを利用するニュートリノ実験施設およびハドロン実験施設へ供給され、物質の基本構造や生命の起源、宇宙の成り立ちに関する最先端の研究に活用されている [1]。

リニアックは、50-keV の負水素イオン源 (Ion Source: IS) から始まり、3-MeV まで加速する高周波四重極リニアック (Radio-Frequency Quadrupole linac: RFQ)、50-MeV まで加速する 3 台のドリフトチューブリニアック (Drift Tube Linac: DTL)、191-MeV まで加速する 32 台の分離型ドリフトチューブリニアック (Separated-type Drift Tube Linac: SDTL)、および 400 MeV まで加速する 21 台の環状結合構造リニアック (Annular-Coupled Structure linac: ACS) で構成されている。また、低エネルギービーム輸送ライン (Low Energy Beam Transport line: LEBT)、2 か所の間接エネルギービーム輸送ライン (Medium Energy

Beam Transport line: MEBT)、および LINAC から 3-GeV の RCS へと接続するビーム輸送ライン (LINAC to 3-GeV RCS Beam Transport line: L3BT) も含まれる。加速空洞の共振周波数は、SDTL までは 324 MHz、ACS ではその 3 倍の 972 MHz である。

リニアックでは、加速空洞に加え、4 台のバンチャ、2 台のチョップおよび 2 台のデバンチャを含む計 49 式のステーション (324 MHz 24 式、972 MHz 25 式) に対し、高周波 (Radio Frequency: RF) 制御を行う低電力高周波制御システム (Low-Level RF: LLRF) が導入されている。この LLRF システム内で、マクロパルス中の空洞電界を安定に維持する上で中核的役割を担うのが、FPGA(Field-Programmable Gate Array) に実装されたデジタル・フィードバックとフィードフォワード (DFB&FF) システムである。建設時に導入された cPCI(compact Peripheral Component Interconnect) ベースの DFB&FF システムは長期間にわたり運用されてきたが、主要部品の製造中止に伴い維持が困難となり、次世代システムへの更新が急務となっている。この状況に対応して、デジタルボックスや μ TCA.4 ベースの新しい DFB&FF システムを開発し、2020 年以降、324-MHz ステーションへ順次導入を進めた結果、2021 年までに全 24 式のデジタル系の更新を完了した [2,3]。更新後のシステムは応用範囲が拡大し、MLF 行きのビームに対しては、周波数領域での演算を用いた適応型ビーム負荷補償を適用して、長期的な安定度の向上にも役立っている [4]。

2. RFQ への μ TCA.4 の導入

2024 年夏期シャットダウン前までは、324-MHz ステーションの RFQ、DTL および SDTL において、計 20

* kenta.futatsukawa@kek.jp

台のデジタイザボックスを用いた DFB&FF システムが稼働していた。このデジタイザボックスを使用する構成では、cPCI のアナログボードを使用している。その中で 324-MHz RF&CLK ボードは故障率が高く、約 1~1.5 カ月で 1 枚の割合で故障が発生していた。そのため、例年は夏期シャットダウンの時期が近づくと予備品が枯渇する事態が発生していた。

一方で、 μ TCA.4 システムの構成品については、2026 年に 324-MHz ステーション全域を μ TCA.4 システムへ移行を行う計画に伴い、既に調達を進めていることもあり、予備品には一定の余裕があった。

以上の背景から、2024 年夏期シャットダウン期間中には、324-MHz RF&CLK ボードの予備品の確保を目的として、RFQ においてデジタイザボックススペースの DFB&FF システムを μ TCA.4 ベースへ置き換えた。これにより、稼働中の μ TCA.4 ベースのシステムは 2 式となったが、現在まで開発した μ TCA.4 ベースの DFB&FF システムに深刻な問題や故障は発生していない。

3. 間引きビーム対応のビーム負荷補償

リニアックの 25-Hz のマクロパルスと呼ばれるビームは、RCS への 2 つのパケツに入射させるため、Fig. 1(a) に示すような櫛型の中間パルスの構造を有している。この中間パルスは、通常は約 1.23 MHz の周波数で、デューティ比は約 54% である。しかし、ビーム強度を調整するために、特に MR 行きのパルスビームは Fig. 1(b) に示すような特定の中間パルスがない間引き運転を行っている。

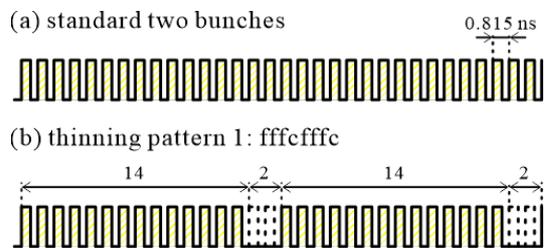


Figure 1: (a) A standard intermediate pulse for two bunches, and (b) an intermediate pulse with a thinning pattern.

従来のビーム負荷補償システムの出力は、マクロパルスビームがあるときに単純に一定の負荷補償分を加算する方法であり、Fig. 2(a) に示すような矩形の形状であった。そのため、間引きビーム運転時には空洞への負荷が急に消失した状態になり、過入力となって加速電界の安定度が著しく低下していた。これを解決するために、Fig. 1(b) に示す間引きビーム運転に対して、Fig. 2(b) の間引かれて中間パルスがないタイミングに合わせてビーム負荷補償のテーブルの要素をソフトウェアでゼロに設定する、間引き対応のビーム負荷補償システムを開発した [5]。

2024 年夏期シャットダウン後の立ち上げ以降は、DFB&FF システムを更新した 324-MHz ステーションでは、実際の MR 行きの間引きビームに対して、間引き対応のビーム負荷補償を実施している。但し、中間パルス幅や間引きパターンなど、中間パルスに関係した条件が変更された場合には、その条件に自動的に追従さ

(a) conventional rectangular structure



(b) adapted to the thinning structure

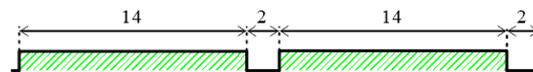


Figure 2: Beam loading compensation methods: (a) using a conventional rectangular structure, (b) adapted to the thinning pattern of the beam shown in Fig. 1(b).

せるのではなく、従来のビーム負荷補償システム的方式へ切り替わるように設計した。一方で、条件が変わらない限りは、定期的空洞ピックアップ信号の波形を監視して、空洞電界の安定度が低下した場合は、居室のディスプレイに警告を表示し、即時の調整が可能となっている。この 1 年の運転で信頼度を確認することができたことから、今後は条件の変更時にも、自動的に追従するシステムへの更新を予定している。

間引きビームに対応したビーム負荷補償の結果を示す一例として、HD へのビーム利用運転時において、Fig. 3、4 および 5 に、それぞれ、バンチャ 2、DTL3 および SDTL09 の空洞ピックアップ信号の振幅 (a) と位相 (b) を示す。黒線は従来方式のビーム負荷補償による測定結果、赤線は間引き対応のビーム負荷補償を用いた場合の測定結果であり、図中の矢印は空洞電界に対する要求精度である振幅 $\pm 1\%$ 、位相 ± 1 deg. を示している。表 1 に、同ビーム運転条件で、従来方式のビーム負荷補償による測定結果と間引き対応のビーム負荷補償を用いた場合の各空洞の振幅と位相のパルス内安定度を示している。DTL において位相安定度のばらつきが大きいのは、DTL1 において中間パルスビームの周波数成分により隣接モードが励振され、その結果、DTL1 の安定度のみが相対的に悪化していることが原因である。SDTL において振幅および位相の安定度のばらつきが大きいのは、SDTL の下流側の空洞に向かうにつれてビーム負荷の影響が相対的に小さくなり、安定度が向上する傾向があるためである。最下流の SDTL16 と最上流の SDTL01 を比較すると、振幅および位相の安定度は共におよそ 1/2 になっている。従来方式のビーム負荷補償を使用していた場合は、実際の振幅と位相の安定度は、要求性能から大きく逸脱していたことが分かる。一方で、間引きビームに対応したビーム負荷補償の適用した結果、空洞電界の安定度は大幅に向上し、要求精度を十分に満たすことが確認された。

残念ながらリニアックから RCS への出射ビームに対する影響は、Q 値が低く、周波数が高い 972-MHz ステーションが支配的であることが判明している。言い換えると、間引きビーム運転に対応するためには、972-MHz DFB&FF システムの更新と間引きビームに対応したビーム負荷補償方式の導入が不可欠である。2025 年に ACS21 へ暫定的なデジタイザボックスを導入して、972-MHz DFB&FF システムのデジタル信号処理の試験を実施し、間引きビームに対応したビーム負荷補償システムに関しても良好な結果が得られている [6]。予算

Table 1: Amplitude and phase stability during MR operation, showing results for both conventional and thinning-beam – adapted beam loading compensation.

	beam loding compensation method	buncher1	DTL	SDTL
amplitude [%]	conventional rectangular structure	± 0.24	$\pm 1.32 \sim \pm 1.40$	$\pm 0.74 \sim \pm 1.53$
	adapted to the thinning pattern	± 0.17	$\pm 0.23 \sim \pm 0.51$	$\pm 0.16 \sim \pm 0.36$
phase [deg.]	conventional rectangular structure	± 1.39	$\pm 0.39 \sim \pm 0.61$	$\pm 0.25 \sim \pm 0.65$
	adapted to the thinning pattern	± 0.61	$\pm 0.12 \sim \pm 0.28$	$\pm 0.08 \sim \pm 0.17$

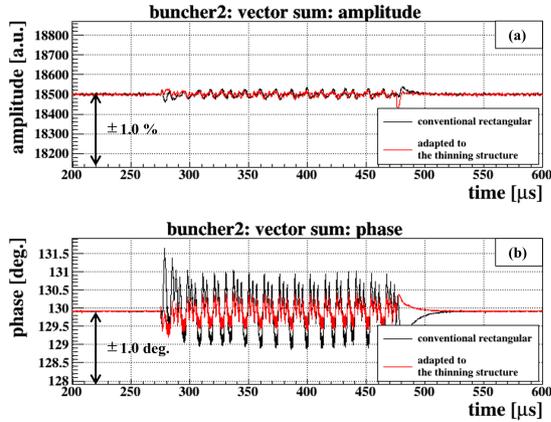


Figure 3: (a) Amplitude and (b) phase of the RF cavity pickup signals of buncher 2 for the MR operation. The black and red lines indicate the one to use the beam loading compensation for the conventional rectangular and thinning structure, respectively.

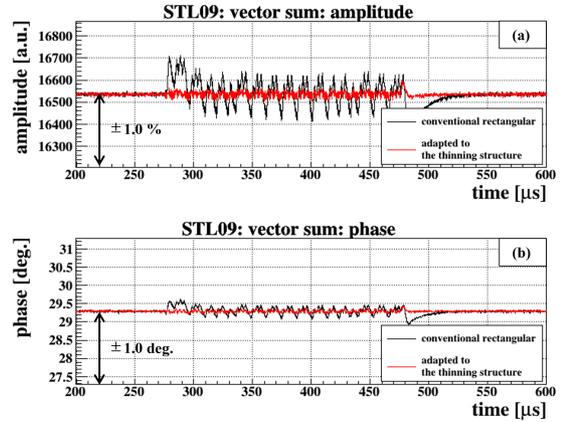


Figure 5: (a) Amplitude and (b) phase of the RF cavity pickup signals of SDTL09 for the MR operation. The black and red lines indicate the one to use the beam loading compensation for the conventional rectangular and thinning structure, respectively.

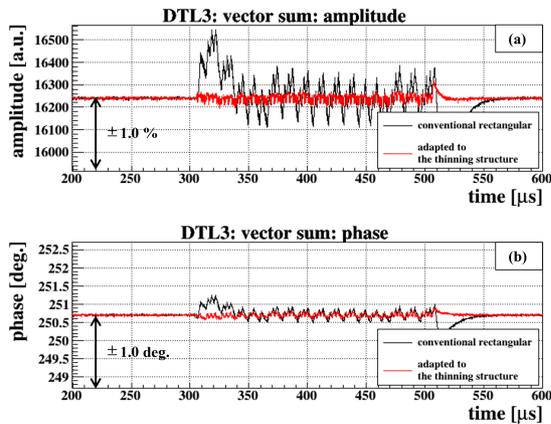


Figure 4: (a) Amplitude and (b) phase of the RF cavity pickup signals of DTL3 for the MR operation. The black and red lines indicate the one to use the beam loading compensation for the conventional rectangular and thinning structure, respectively.

上の制約により 972-MHz DFB&FF システムの更新は未実施であり、計画が立てられていない。しかし、MR においてはビーム強度の増強が計画されていることから、現場の人間としては、それに備えて間引きビームに対応可能な体制を整えておくことが望ましいと考えている。

4. ダミーロードのオーバーホール

J-PARC リニアックにおいて、324-MHz ステーションに設置されている構成機器は、製造から約 20 年が経過しており、経年劣化の進行が懸念されている。そこで、最も古く、かつ RF パワーが高い DTL1 に設置されている 324-MHz 同軸型ダミーロード 1 台を選定し、オーバーホールを実施した。冷却水配管接続部など冷却水が流れている部分には変色が見られたものの、危惧していた抵抗体など主要部品に深刻な損傷は目視では確認されなかった。これを踏まえ、他の 324-MHz ダミーロードについては、現時点でのオーバーホールは不要と判断した。該当のダミーロードは消耗品を交換した後、再組立てを行い、運用に復帰させている。

また、電波吸収体として水を用いるなど構造は異なるものの、972-MHz 導波管型ダミーロードについても、将来的にサンプルピックアップしてオーバーホールを実施したいと考えている。

5. μ TCA.4 の RF スイッチ試験

J-PARC リニアックでは、MEBT1 に設置されているバンチャ 1 および 2、並びにチョップ 1 および 2 は、2021 年度に μ TCA.4 ベースの DFB&FF システムを採用している。また、2024 年度の夏期シャットダウン後から RFQ においても μ TCA.4 ベースの DFB&FF システムを導入した。更に、その他の 324-MHz DFB&FF システム

においても、製造中止部品を含む建設時からの cPCI アナログモジュールを使用しているため、今後、 μ TCA.4 ベースの DFB&FF システムに更新する予定である。

現在、Fig. 6 に「pulse mod.¹」と表記されている NIM モジュール内の RF スイッチを使用して、放電などの異常発生時に高速で RF を停止している。一方で、開発した μ TCA.4 の μ RTM(Rear Transition Module) ボードには、図中に電気回路のスイッチ記号で示されているように、RF スイッチが既に内蔵されている。つまり、現状では出力 RF 信号の経路上に低電力の RF スイッチが 2 つ存在していることになる。現状では、 μ RTM ボードの RF スイッチは、RF ゲートに依存せずに、RF の ON のときに閉、RF の OFF のときに開となる単純な動作として組み込まれている。そこで、FPGA の改造を行い、この内蔵 RF スイッチを活用することで、現在使用していた NIM モジュールの RF スイッチを取り除くことが可能かを検討した。

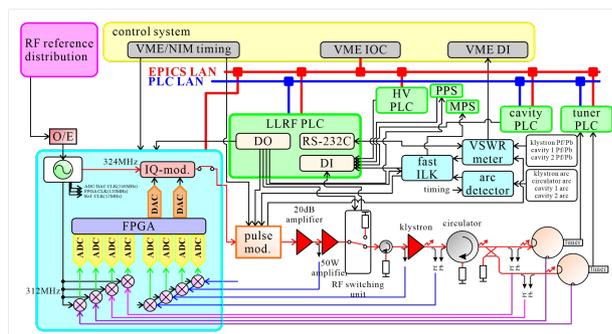


Figure 6: A schematic view of the LLRF system with a μ TCA.4-based DFB&FF system. The μ RTM board within the μ TCA.4 platform incorporates the RF switch function. In contrast, the RF switch in the NIM module labeled ‘pulse mod.’ in the figure is used to rapidly stop the RF.

μ RTM ボードと NIM モジュールでは制御入力信号レベルが異なっていたため、本試験では、自作の信号変換回路を用いて、 μ RTM 内蔵の RF スイッチの応答時間を測定した。既存の NIM モジュールの RF スイッチでは、VSWR メータによる検知の発報から RF 停止までにかかった時間²が Fig. 7(a) に示す 3.0 から 3.2 μ s であったのに対し、 μ RTM ボード内蔵の RF スイッチの場合は (b) に示す 2.9 μ s であり、若干短縮された。J-PARC 建設時の設計仕様である RF 停止時間 10 μ s 以内を十分に下回ることが確認できた。一方で、ビーム停止時間 10 μ s 以内も要求されているが、ビーム停止させる MPS 信号は、既存の NIM モジュールの上位の Fast Interlock モジュール (Fig. 6 の「fast ILK」) から出力されているため、どちらの RF スイッチを利用しても影響がない。この結果を踏まえ、信号変換モジュールを業者による製作を進めて、15 年以上使っている NIM モジュールの RF スイッチの除去する予定である。

¹ pulse modulator & rf-switch module

² この測定にはケーブル遅延量は含まれていない。ステーションにも依存するが、加速器トンネルとクライストロンギャラリ間の遅延量は約 0.2 μ s である。

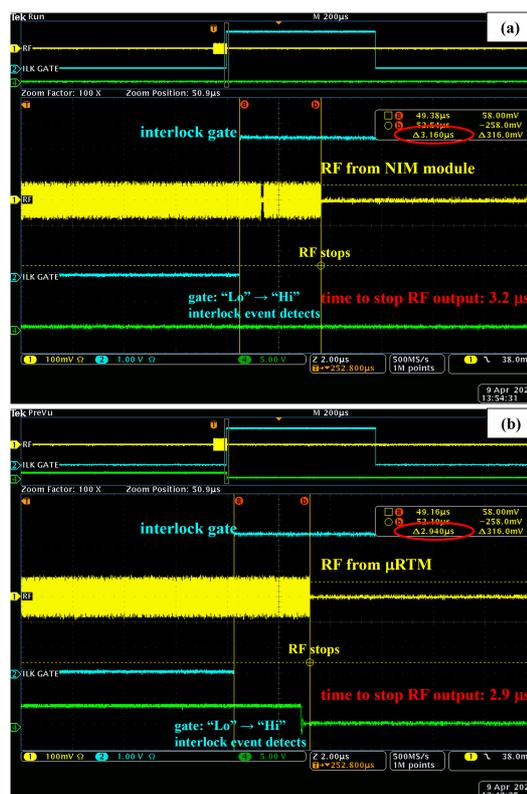


Figure 7: (a) Time from detection by the VSWR meter to stop RF using the NIM module RF switch (3.0 μ s); (b) Time from detection by the VSWR meter to stop RF using the RF switch on the μ RTM board (2.9 μ s).

6. 試験対応

6.1 1.5 MW 相当ビームの加速試験

2024 年 12 月 25 日から 28 日にかけて、MLF 標的において 1.5 MW 相当のビーム加速試験を実施した。このとき、ビーム電流を 50 mA から 60 mA へ、マクロパルス幅を 500 μ s から 600 μ s へと変更した。

過去にチョッパで制御タイミング信号の不具合により、MLF 標的に想定外の強度のビームが送られる事象が発生したことがあった。そこで LLRF システムでは、チョッパ 1 およびチョッパ 2 ステーションにおいてゲート信号の幅と繰り返し周期を測定して、インターロック条件にしている。ビームのパルス幅を 500 μ s までは、空洞の熱負荷を変えないために RF のゲート信号の幅は一定であるが、600 μ s にする場合は、RF ゲート幅を延伸させる必要がある。本試験のようなビームのパルス幅を 600 μ s にする場合は、このインターロック機能をマスクして対応している。

一方で、適応型ビーム中心位置補償システムにおいて、RF ゲート信号とビーム中心位置の関係が変わることを自覚せずに、プログラムが対応していなかった。そのため、RCS のビーム試験時に、マクロパルス中に運動量変動がある問題に見え、その原因調査に時間を要して、貴重な試験時間を消費する結果となった。今後、600 μ s 幅のビーム試験の機会が増える場合には、本事象に対

応することが望ましい。

6.2 50 Hz 試験

2025年5月26日に試験の準備を行い、27日から28日にかけて、リニアックにおいて50 Hzの試験を実施した[7]。冷却水の冷却能力に問題があることは既知であったため、リニアック全域での熱負荷を一定に保つ目的でパルス幅を通常の約半分に短縮した。この試験では、機器への印加のみを行い、RFQからのビーム加速は実施していない。

LLRFシステムの機器については、50-Hz動作に対応するように開発しており、特に問題は発生しなかった。

7. トラブル報告

例年、324-MHz RF&CLK ボードは1~1.5カ月で1枚程度の高い頻度で故障が発生しており、予備品の残数と夏期シャットダウンまでの稼働日数を数えて、利用運転の長期停止リスクに脅える状況であった。しかし、2024年の夏期シャットダウン後から2025年の夏期シャットダウンまでの間に発生した324-MHz RF&CLK ボードの故障は、2枚にとどまった。一方で、2024年12月には972-MHz RF&CLK ボードにおいて2枚の故障が発生した。このボードは、予備品が潤沢ではなく、この故障の時点で予備品が枯渇した。幸運にも、その後は2025年6月末まで追加の故障は発生せず、稼働を維持することができた。また、2024年夏期メンテナンス後から、ACS デバンチャ1ステーションにおいて、ADC1のデジタル値が突発的に下がったり元に戻ったりする事象が発生した。原因はIQ変調器/ダウンコンバータ実装のアナログボードの故障であり、これは記録に残っている限りは初めての事例である。これらのDFB&FFシステム関係のボードは既に製造中止となっており、ビーム利用運転を継続するためには、早急な次世代システムへの更新が必要である。

DFB&FFシステム以外では、324-MHzの空洞間位相監視モニタが1台故障した。この機器も1年間で約1台の故障率を示しており、LLRFが堅牢なシステムを目指すのであれば、更新することが望ましい。

8. 今後の更新方針

J-PARC リニアックでは、DFB&FFシステムを構成しているデジタルおよびアナログボードが製造中止となっている。また、DFB&FFシステム以外にも、旧リニア・テクノロジー製の集積回路がLLRFシステムの様々な構成機器で使用しており、この製造中止による影響を受けている。そのため、現在の予算で全てに対応することは不可能であるが、リスクを最小限に抑え

るため、以下の優先順位で更新を進めることとした。

1. 324 MHz系におけるアナログボードの更新を最優先とする。2025年度にボードおよびシェルフの購入を行い、2026年度に実装する計画である。また、同優先順位で、4チャンネル12-MHz遅延モジュールについて、2025年度に必要な数を確保する。その後は、当面は代替品の開発を行わず、故障などの万が一の事象が発生した場合は追加予算を要しない調整方法を検討する。
2. 972-MHz DFB&FF システムの更新は、324-MHz DFB&FF アナログボードの更新の完了後に実施する。
3. チョップパコントローラの同期モジュールの製作にも影響を受けたが、新しい代用品は972-MHz DFB&FF システムの更新の終了後に行う。

なお、972-MHz DFB&FF システムの更新より、324-MHz DFB&FF システム内のアナログボードの更新を優先した理由は、例年の324-MHz RF&CLK ボード故障の頻度が高く、リスクが高いと判断したためである。その他の機器もほとんどが使用開始から10年以上が経過しているが、現在よりも予備品の数を増やすことは難しく、予防交換も現実的ではないと判断している。

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.*, “Current Status of LLRF System for J-PARC Linac”, Proc. of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, July 31-Aug. 3, 2024, p.1030-1034.
- [6] K. Futatsukawa *et al.*, “Demonstration of 972-MHz Digital Feedback and Feedforward System Update for J-PARC LINAC”, Proc. of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 6-8, 2025, THP052.
- [7] Y. Kondo *et al.*, “J-PARC linac 50Hz operation verification study”, Proc. of the 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 6-8, 2025, FRO601.