

J-PARC リニアック LLRF システムの高度化 ADVANCEMENTS IN LLRF SYSTEM AT J-PARC LINAC

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

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} NAT

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

At the J-PARC linac, more than 15 years passed since the low level radio-frequency (LLRF) system were manufactured. Therefore, it has become difficult to maintain the digital feedback and feedforward (DFB&FF) system. The twenty-four DFB&FF systems in the 324-MHz stations have been improved by the commissioning start in FY2021. For this improvement, their LLRF systems also had to be updated due as the developed DFB&FF systems were to be embedded with the input/output controller of experimental physics and industrial control system (EPICS-IOCs). At the same time, we upgraded the entire LLRF system, which included the 972-MHz stations, using the newly acquired technology from the development to compensate for the lack of manpower and budget.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex, 以下 J-PARC) の陽子加速器は、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, MR) で構成され、世界最高レベルの強度の陽子ビームを物質・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、ハドロン実験施設に供給している [1]。

J-PARC リニアックには、加速周波数が 24 式の 324 MHz の高周波源と 25 式の 972 MHz の高周波源があり、ビームを加速するために加速空洞に高周波を印加している。高周波の制御を行う低電力高周波制御 (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(Field-Programmable Gate Array) 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。しかし、そのシステムは開発から 20 年以上経過して完全互換の維持が困難になり、速やかな次世代の DFB&FF システムへの更新が緊急の課題となっている。そこで、新しい開発したデジタルボックス [2] を使用した次世代の DFB&FF システムを開発して、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。試験運用でデバックを済ませたこともあり、2020 年の夏期シャットダウンには、DTL2-3、SDTL01-16 ステーションにおいて、新システムへ速やかに移行することができた [3]。2021 年の夏期シャットダウンでは、RFQ と DTL1 にもデジタルボックスを導入し、残りの 324 MHz システムである MEBT1 の Buncher1-2、Chopper1-2 に μ TCA.4 システムを使用した新しい DFB&FF システムへの更新を行った。これにより、324 MHz の全 24 式の DFB&FF

システムに対して、デジタル系の更新が完了した。高機能の FPGA の採用により配列での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]。

これらの更新において、開発したデジタル系の制御として、J-PARC 加速器で採用されている分散制御システム (EPICS, Experimental Physics and Industrial Control System) [6] の IOC(Input/Output Controller) を組込んだシステムを採用したことで、DFB&FF システム以外にも全体的に LLRF システムの変更を伴った。なぜなら、既存のシステムでは、全ての信号が LLRF の PLC(Programmable Logic Controller) を経由していたことで、全てのシーケンス動作は PLC に組込まれていた。ローカルでの操作についても、PLC の操作が可能な専用のタッチパネル表示機があれば事足りた。しかし、EPICS-IOC の組み込みシステムへの更新で、PLC を経由しない信号が存在することになり、PLC ラダーへの実装が不可能なシーケンス制御が必要になった。また、既存の専用のタッチパネル表示機では、PLC 経由しない DFB&FF システムの信号を操作やモニタすることができない。それらの理由で、324-MHz LLRF システムの DFB&FF システム以外の機能に対しても、開発が必要不可欠であった。同時に、人手不足や予算不足を補えるように、開発で新しく得た技術を活かして 972 MHz のステーションも含めて全体の LLRF システムの高度化を図ることにした。

2. 現場 PC

デジタル系を更新した各ステーションの現場には、小型の PC(Personal Computer) とタッチパネル機能付きのディスプレイを設置した [3]。これにより、インターロックなどを管理している LLRF PLC と DFB&FF システムを管理しているデジタル系の両方を操作及び監視できる体制になっている。

GUI(Graphical User Interface) 画面として、基本的に EPICS で用いられる制御アプリケーションの統合環境で

* kenta.futatsukawa@kek.jp

ある CSS(Control System Studio) [7] を採用した。Pro-face 製のタッチパネル表示機 [8] のトレンド表示に相当する機能として、CSS の Data Browser を利用した。しかし、J-PARC 原研側の制御グループが管理するアーカイバとして PostgreSQL [9] が使用されているために、CSS の Data Browser とは相性が良くなかった。そこで、リニアック RF グループ専用のローカルアーカイバとして、最初は EPICS Channel Archiver [10] を独自に導入して、現場でトレンド表示が必要なレコードのアーカイブを開始した。現在は、アーカイバを EPICS Archiver Appliance [11] に更新して、トレンドを確認する頻度が高いレコードもアーカイブしているリストに追加している。

CSS の既設機能では実現が難しかった空洞チューナ制御や空洞の自動コンディショニング機能の制御画面は、java で開発を行っている。

インターロック発報履歴の表示機能は、下記に示す PLC ラダーと python プログラムの動作で実現した。PLC ラダーでインターロックが発報時には、データレジスタ (以下、D レジスタ) 領域にインターロックの発報内容と時刻の情報を書き込む¹。この D レジスタ領域には 500 事象分のインターロック情報を書き込むことができ、リングメモリのように最古の情報に上書きして使用する。また、PLC ラダーは次に書き込む D レジスタのアドレスを“D4952”(D レジスタのアドレス)に書き込む。一方で、“D4951”にはデータベース (“DIGI”) に保存済みの次の D レジスタのアドレスが記載されている。python プログラムは “D4951” と “D4952” の両方を読み込み、その値を比較する。その値が異なっている時に、“D4951”に記載されている値の D レジスタの情報を読み込み、発報内容と時刻をデータベースに保存する。その後、“D4951”の値を “DIGI”データベースに保存済みの次の D レジスタのアドレスに更新する。python プログラムは、“D4951”と “D4952”が一致するまで上記の動作を繰り返す。また、D レジスタとして、リングメモリ方式を採用することで高速ポーリングは必要なく、数秒に 1 度の “D4951”と “D4952”の監視でも情報を取り出すことはない。データベースには、一般的なデータベース市場で採択率が高く、LLRF サーバの Red Hat 系の OS と親和性が良い MySQL [12] を採用した。python プログラムは、MySQL の “DIGI”データベースにアクセスして、発報履歴を表示する役割も兼ねている。

リモート操作とローカル操作は、EPICS の ASG(Access Security Group) を利用している。

また、この PC には、linux の screen コマンドを用いたバックグラウンドジョブで、以下の機能が実装されている。

- 自動チューナ制御のシーケンス
- ビーム負荷補償システムのオン・オフ
- 自動 RF 立上げシーケンス

これらのプログラムが停止した場合に、直ちにビーム運転を停止する必要はないが、長期間の停止は運転に支障が発生する。デバック時を除いて、実際にプログラムが停止した経験はないが、PC が停止する事象は度々発生

している。そこで、各プログラムには、ウォッチドッグスが埋め込まれていて、動作状況を常に居室から監視している。

3. バックグラウンドジョブ

linux の screen コマンドを用いて、サーバ及び居室 PC 上で下記のバックグラウンドジョブが常に実行されている。

サーバ PC :

- EPICS-IOC(soft IOCs)
- 高周波基準信号分配システムのデータ収集&補償 (光スイッチ操作、光遅延器操作、ネットワーク・アナライザ、オシロスコープ、周波数カウンタ)
- 位相ドリフト補償システム
- ビーム情報の取得 (後述のインターロック統括システム用)

居室 PC :

- RF ダウン時のオシロスコープの波形画像及びデータ (検波波形) の自動取得 (後述のインターロック統括システム用)
- ウォッチドックス : PC フリーズ及び他のバックグラウンドジョブの動作状態の監視

利用運転に絶対必要な PC の数を減らすために、サーバ PC と居室 PC の各 1 台で上記の役割を担うようにしている。

サーバ PC は、インターロック関係の MySQL データベースサーバ、Mattermost [13] ローカルサーバ、EPICS ローカルアーカイバ、新しいデジタル系のステーション用に NFS(Network File System)・NTP(Network Time Protocol)、cPCI ステーション用に DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)・TFTP(Trivial File Transfer Protocol)・OMNI ネーミングサーバの役割を担っている。

4. 定期動作プログラム

linux の cron コマンドを用いて、サーバ及び居室 PC で下記の適時動作プログラムが実行されている。

サーバ PC :

- RF 波形の確認 (1 回/時間)[324 MHz のみ] : 安定度が悪いときは、波形を保存して、居室の監視用のディスプレイに表示
- RF 波形データの保存 (3 回/日)[324 MHz のみ] : 常時保存していないような波形の保存
- cPCI インターロック発報履歴情報を MySQL データベース (“cPCI”) に保存 (2 回/時間)

居室 PC :

- LLRF PLC シーケンス CPU の時刻合せ (1 回/日) : NTP 機能が実装していないため
- VSWR メータのパラメータの確認/記録 (1 回/時間) : 変更頻度とその影響を考慮
- インターロック統括システムの解析&データベースに保存 (1 回/日)

バックグラウンドジョブが実行されている PC と同じ PC で、定期動作プログラムも実行されている。

¹ 1 事象のデータサイズは、D レジスタの 5 個の時刻と、別の 5 個に発報内容で、計 10 個になる。

5. 監視用の GUI 画面

居室 PC での監視用の GUI 画面に関しても、CSS を用いて開発している。

居室の大型ディスプレイには、図 1 に示す画面が常時表示されている。この画面では、各ステーションの状態(燈色四角)だけでなく、ローカルに構築した恒温恒湿環境の状態や漏水検知器の状態(青色四角)、ウォッチドックス/ファン回転の状態/FB 補正量の過多/波形自動保存のオン・オフ/位相ドリフト補正の状況(赤色丸)などの運転には必ずしも必須でないことも組込まれている。青色や緑色のときは、ビーム運転に問題ない状態であることを表している。一方で、燈色や赤色は、それぞれ直ぐに影響がある訳ではないが問題ある状態やインタロック発報の状態を示していて、遠目からでも全体の状態が確認できるようになっている。

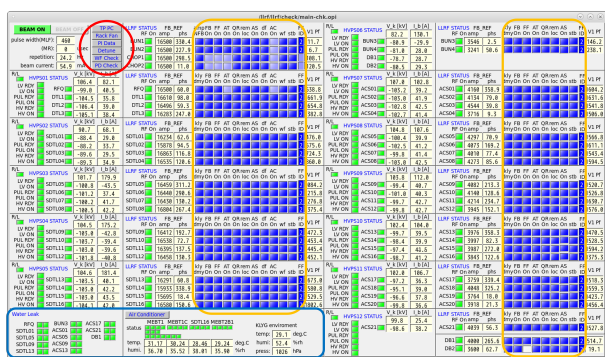


Figure 1: Main display on the local room.

監視用の GUI 画面には、ステーション毎に表示する画面だけでなく、機能毎に表示する画面も用意している。ステーション毎に表示する画面でパラメータの変更を実施した時に、49 式のステーションに対応するために GUI を開いて変更する単純な作業を繰り返すことになる。しかし、どこまで変更したのか分からなくなり、何度か設定し忘れる失敗を犯してしまった。その経験を踏まえ、機能毎の表示する画面の作成は必ず行うようにしている。以下に、凡そ作成された各 GUI 画面の数を示す。

- ステーション毎に表示する画面：5 枚以上/ステーション
- 機能毎に表示する画面：30 枚以上
- その他(ビーム条件、位相ドリフト補正など)：5 枚
- トレンド表示

J-PARC の加速器の利用運転中には、基本的には 1 週間毎に一度の定期メンテナンスが設けられている。その時には、加速器トンネルへの入域するために、RFQ とチョップ以外の空洞への RF 印加を落とすことが多い。空洞が冷えた状態から RF 立上げるために、チェックリストと対応する操作のランチャを兼ねた GUI 画面(図 2)を作成している。LLRF メンバーで週替わりで立上げの責任者を決めて、RF 立上げ操作と機器の状態を確認している。ボタン一つで RF 立上げを行うことも可能ではあるが、技術者も含めた構成員全員に重要な箇所を認識して意識付けることも目的として、この体制にしている。

変わった機能の GUI 画面として、Fast Interlock や Arc

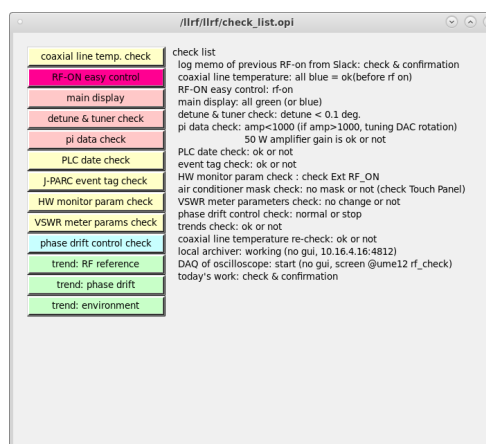


Figure 2: GUI for the RF startup with the check list and the control launcher.

Sensor、50 W アンプのモジュールの製造メーカーの確認や変更を行うものがある。予備品として、完全互換品よりより安全や堅牢な製品を採用するようにしたために、建設時から導入されているモジュールと予備品で a 接点や b 接点などの仕様が若干異なっている。これらの機器と信号の取り合いがある PLC 上で、内部リレー(I レジスタ)を切り換えれば変更できるように、PLC ラダーを作り込んでいる。この I レジスタは、この GUI 画面から設定でき、プログラム開発ツールが使う必要がなく誰でも変更できるような体制にしている。

6. パラメータ調整

パラメータ調整において、その大部分に対して、python を用いたパラメータの自動調整プログラムを開発している。tkinter モジュールの GUI 画面上から、調整のためのデータ測定・測定結果の確認・パラメータの設定が実行できる。測定中のデータのモニタ値を確認するような表示機能を組込まなかった代わりに、同時に複数のステーションでデータ測定を実行できるようにした。測定結果の確認では、パラメータの調整前後のデータを比較でき、データ測定の問題なく、新しい設定値の方が優れていることを目視で確認した後に、設定値の反映ができるという流れに全てのプログラムの書き方を統一している。データ測定及びパラメータの設定が python プログラム上から実行された履歴は、自動的に後述する Mattermost のチャンネルに記載される。

現在、cPCI ステーションにはまだ一部のパラメータの調整は自動化されていないが、現在プログラムの開発が進行中である。2023 年度の夏期シャットダウン以降は、目標としている全てのパラメータの調整を自動化できると見込んでいる。

7. インターロック発報事象の統括システム

7.1 cPCI のインターロック発報履歴

元々はデジタル系を更新したステーションのタッチパネルのインターロックの発報履歴を管理するシステムであったが、利便性が高かったことから cPCI ステーション

ンにも導入した [14, 15]. PLC ラダー CPU の D レジスタをリングメモリのようにバッファとして活用していることから、即時に情報が失われることはなく、PC からの高速ポーリングは必要としない。手動の他に、自動で 30 分に 1 回だけ自動でデータを確認して、cPCI 専用の MySQL データベースに書き込んでいる。

全てのステーションのインターロック発報履歴を表示する GUI 画面を作成して、居室から確認することが可能である。

7.2 オシロスコープ波形の保存

建設時から、各ステーションには空洞コンディショニング用に検波波形をモニタできるオシロスコープが設置されている。この既設のオシロスコープを使用して、RF ダウン時の波形画面及び波形データを収集するシステムを構築した。324-MHz ステーションでは各空洞ピックアップ信号と入力反射信号、972-MHz ステーションでは各タンクのピックアップ信号と入力・反射信号を測定している。

7.3 新しいデジタイザの高速モニタの保存

デジタイザボックス及び μ TCA.4 の AMC ボードには 1GB のメモリが実装されている。このメモリに各 ADC や FB の計算過程を記録する高速モニタを実装した。表 1 に高速モニタの構成を示す。この機能で、RF ダウンのパルスだけでなく、最大 63 前のパルスを確認することが可能である。また、RF ダウン時にメモリのバンクを切り換えることで、時間的な十分な余裕を持ってデータを収集することが可能である。

Table 1: Configuration of High-speed Monitor

number of banks	16
number of pulses	64/bank
number of samples	16383/pulse
number of bytes	64/sample
data	ADC1-8, DAC, VS, IIR, REF, PI, FF

AMC ボードは、更新された J-PARC のタイミング光信号を直接受信することが可能であり、タイミングシステムから J-PARC のイベントタグ情報を取得している。各パルスデータのイベントフッターには、TYPE_DATA 情報、S_EVENT 情報、S_COUNT 情報、TRIG_COUNT 情報を付加している。

7.4 インターロック発報事象の統括システム

RF が関与したインターロック事象は、全てのステーションの累計で 1 ヶ月に 1000 回弱と他のグループと比較して桁違いに多く、これを整理しようとする多くの労力が必要になる。324 MHz と 972 MHz の発報履歴の “DIGI” と “cPCI” データベースとオシロスコープ波形や新しいデジタイザの高速モニタの保存、更にビーム情報を組合わせて、インターロック発報事象の統括システムを構築した 3。

“DIGI” と “cPCI” データベースからは、ステーション名や発報内容、発報リセット時刻、自動復帰の成否の情報が引き出される。

オシロスコープ波形は自動解析され、パルス内での発報タイミング、ピックアップ信号の RF ダウン後の時定数とそこからの原因空洞の同定、推定発報原因、RF ダウンのオシロスコープ波形の png ファイル名などの情報が引き出される。高速モニタの波形も自動解析され、前のパルスからインターロックの痕跡があるかを調査して、RF ダウンの高速モニタ波形の png ファイル名などの情報が引き出される。また、J-PARC イベントタグ情報や、そこから RCS からのビーム先行情報 (ex. MLF 行き、MR 行き) も引き出される。オシロスコープ波形や新しいデジタイザの高速モニタの解析でプログラムにより不可思議な RF ダウン波形と判断された場合は、人が目視で確認が必要かのフラグを立てる。各波形の png ファイルは、制御 LAN 上の public 領域に置かれ、J-PARC 基幹ネットワーク (JLAN) から確認することができる。また、別のプログラムで、各 png ファイル名を入力することで、オリジナルの波形を確認することができ、ここでは拡大や縮小などが可能である。

ビーム情報は、インターロックの発報時はビーム運転中の可否を判断し、ビーム運転中のときはビーム運転の再開時刻が引き出される。

これらの自動で解析された情報は、MySQL の “MPS” データベースに保存される。一方で、同時に他の MPS が道連れで発報したかの情報 (ex. BLM(Beam Loss Monitor) など) は手動で入力している状態である。居室 PC には、mysql-workbench がインストールされており容易にデータベースの編集が可能な状況になっているだけでなく、入力アシストのアプリケーションも開発して活用している。

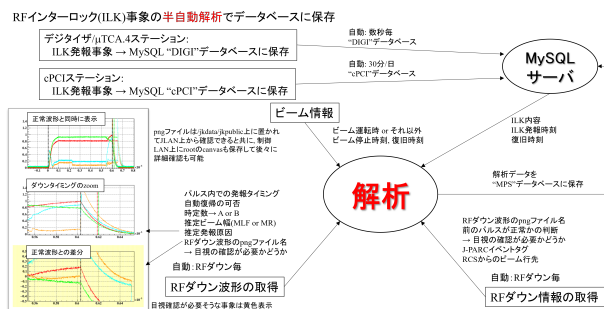


Figure 3: Diagram of interlock event control system.

7.5 重故障の予知

インターロック発報事象の統括システムの最終的な目標は、大きな故障前の予兆を検出して、重故障の予知を行うことである。この統括システムは、2021 年度から本格的な運用を開始しているが、2023 年 3 月の DTL3 上流のカプラ交換をその中での一例として上げたい。

2022 年 1 月から 2 月までに、RF グループから空洞グループに DTL3 上流カプラ周辺 (5 事象) と SDTL11B カプラ周辺で反射が乱れてインターロックが発報している事象があると報告している。SDTL11B はこのインターロック発報時に、空洞内の真空が悪化していることから空洞のカプラが原因であることは明らかであった。また、この反射の乱れだけの事象だけでなく、同カプラのアークによるインターロックや RF オフ後の減衰時定

数が長くなるインターロックが発生するなど、不可思議なインターロック事象が SDTL11B カプラ近辺に集中していた。そこで、空洞グループが 2022 年夏期シャットダウンに SDTL11B カプラを交換しており、その後に不可思議なインターロック事象は無くなった。一方で、DTL3 上流カプラ周辺の反射が乱れたインターロック事象は、真空の悪化が伴わず、これ以外には異常なインターロック事象が見えなかったために、カプラではなく立体回路がこの原因である可能性を否定できなかった。そこで、2022 年の夏期シャットダウン中に、RF グループによる立体回路の健全性の確認だけを行ったが、大きな異常は確認されず、内部の清掃だけを行って復帰した。その後、2023 年 2 月から 3 月頭までに上流カプラで放電が多発してビームを停止させる事象が頻発したため、同年 3 月 10 日に緊急に同カプラの交換作業を実施している。この反射の乱れた事象と、後の放電多発の事象に因果関係があったのであれば、凡そ 1 年前に予兆を捉えていたことになり、2022 年夏期シャットダウン中にカプラを交換して、2023 年のビーム停止の頻発を避けられた可能性はある。

8. MATTERMOST を用いた状態記録

様々な状態を記録するツールとして、制御 LAN 上にローカルサーバに実装した Mattermost の運用を開始した。現状、Mattermost 上には下記の 5 つのチャンネルを用意している。

- “data-acquisition”: データ収集プログラムを実行した記録
- “parameter-set”: パラメータを設定した記録
- “program-error”: プログラムがエラー発生した記録
- “status-log”: 状態の記録 (基本的には、良くない状態が発生したときに記載)
- “temporary”: テンポラリの状態に設定したときの記録

前者の 4 つに関しては、上記に述べたバックグラウンドジョブやパラメータ調整などのプログラムによる自動書記である。EPICS のアーカイバを使用する場合は、ストローブ信号の EPICS レコードのビットと対応する信号の調査や、状態の EPICS レコードのビットと対応する状態の調査に手間と時間を要していた。今回、Mattermost を利用することで、図 4 のように制御 LAN 上のブラウザから誰でも容易に記録を確認することが可能になった。

9. まとめ

J-PARC リニアックの LLRF では、人手不足や予算不足をシステムの高度化で補うように努力をしている。今回は現状を紹介したが、機能の追加のための開発は継続して行われている。また、上記には特筆していないが、積極的に同時に不必要になった機器の取外しや機能の削除も実施して、システムを単純化させる努力も行っている。自営でのシステムの導入や改良を進めていることもあり、開発スピードは決して早くはないが、その代わりに対応力や適応能力は高く、後発開発が活きる LLRF システムにおいては重要なことだと考えている。

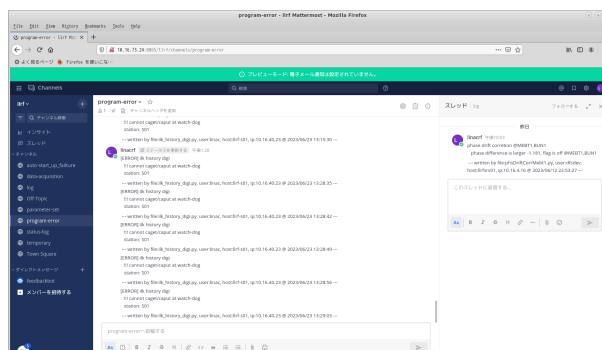


Figure 4: Mattermost on the local LLRF server. If a program encounters an error, it is automatically written to the “program error” channel.

謝辞

研究の進行にあたり、J-PARC の制御グループから貴重な助言と支援を頂きましたことに深く感謝申し上げます。彼らの専門知識と協力のおかげで、この開発が成功裏に進行できました。

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.*, “Present Status of J-PARC Linac LLRF System”, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 9-12, 2021, p.937-941.
- [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] <https://epics-controls.org/>
- [7] <https://controlsystemstudio.org/>
- [8] <https://www.proface.com/en>
- [9] <https://www.postgresql.org/>
- [10] <https://epics.anl.gov/docs/GSWE/starttools/channelarchiver.htm>
- [11] https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver/_docs/index.html
- [12] <https://www.mysql.com/>
- [13] <https://mattermost.com/>
- [14] Y. Sato *et al.*, “Analysis of the J-PARC linear accelerator RF down phenomena”, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Sep. 9-12, 2020, p.341-345.
- [15] Y. Sato *et al.*, “Analysis of the J-PARC linear accelerator RF down phenomena 2”, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 9-12, 2021, p.924-928.