

J-PARC リニアック RF ダウン事象の解析 2

ANALYSIS OF THE J-PARC LINEAR ACCELERATOR RF DOWN PHENOMENA 2

佐藤福克^{*A)}, 岩間悠平^{A)}, 篠崎信一^{B)}, 不破康裕^{B)},
Ersin Cicek^{C)}, 方志高^{C)}, 福井佑治^{C)}, ニツ川健太^{C)}, 溝端仁志^{C)}
Yoshikatsu Sato^{*A)}, Yuhei Iwama^{A)}, Shinichi Shinozaki^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)},
Ersin Cicek^{C)}, Zhigao Fang^{C)}, Yuji Fukui^{C)}, Kenta Futatsukawa^{C)}, Satoshi Mizobata^{C)}
^{A)} NAT Co.,Ltd.,
^{B)} Japan Atomic Energy Agency,
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the J-PARC linac, 49 LLRF systems, which consist of 45 klystrons and 4 solid-state amplifiers (324MHz and 972MHz) to excite the accelerating cavity, are used for the beam operation. Each LLRF system manages the RF status and the MPS is fired when the interlock occurs. The number of MPS fired events for the J-PARC linac RF is largest and the stop time is longest among various beam stop causes of not only the linac but also other facilities. Therefore, it is important for the operation with high availability to analyze the cause of the high frequency down, which is expected to lead to improved J-PARC uptime by measures taken after the analysis. On the other hand, it is difficult to analyze all MPS fired events for the limit of the human resources. In addition to the automatic data acquisition system of waveforms with the RF down events was built last time. In this time we built a system that automatically acquires interlock information and saves it in the archiver. In addition, a system that automatically analyzes the cause of interlock from waveform data in detail and the interlock information was incorporated to analyze the down phenomenon.

1. はじめに

J-PARC 加速器では、ビームのパワーを増加させる試みと共に、効率良くビームを供給するために稼働率を向上させる努力が常に行われている。リニアックの RF システムの MPS を解析し改善することでビーム利用運転の稼働率の向上に直結する。また、ビーム運転でのロスが機器の放射化に繋がるため、RF の振幅、位相のずれは細かく管理しなくてはならない。しかし、改善の努力はしてるとはいえ未だにリニアックの RF システムだけでも多くの MPS が発生している。さらに、マンパワーは有限であり、高周波インターロック情報の蓄積処理、解析が追いつかないのが現実である。このため、MPS の閲覧や蓄積・解析の処理を自動化し簡易的にこなすことが重要であり、同時に監視体制を強化することで安定したビーム運転が可能になる。

データ収集系が充実して、系統的・統計的にリニアック RF MPS 発報の分析を続けることで、復旧までの時間短縮、さらには故障予知が出来れば、ビーム利用運転の稼働率の向上につながると考えている。

2. データ収集系の改修

2.1 MySQL を使用した LLRF インターロック情報の閲覧

J-PARC リニアックの LLRF システムには、機器の保護を目的とした様々なインターロック機能が実装されている。インターロック事象は、RF 出力を停止

した後に自動で復帰するもの(以下、自動復帰)と、RF 出力を停止した状態を維持するものの 2 種類に大別できる。自動復帰の対象になるインターロックは、反射パワーを監視している VSWR メータ、放電発光を監視しているアークセンサ及び外部からの高速のアラーム信号がある。これらは、Fast Interlock Module により集約された後に、RF Pulse Modulator&RF Switch Module に停止信号として伝送され、パルス内で RF 出力を停止させる。また、RF 出力を停止した状態を維持するインターロックには、クライストロン窓やサーキュレータの温度を測定しているもの、クライストロンの高圧電源異常、冷却水や真空度を管理している空洞 PLC からのアラーム接点信号などがある。LLRF に関する全てのインターロック情報は LLRF の PLC に集約される。そこで、自動復帰対象のインターロックだけが発報している場合は、自動での復帰のシーケンス制御が実行される。2020 年のデジタイザの実装前までは全てのステーションのインターロック履歴に関して、PLC 専用のシュナイダーエレクトリックホールディングス株式会社のタッチパネル機能を使用している。2020 年に新しく開発したデジタイザを導入するときに、PLC 専用のタッチパネルではデジタイザの制御ができず、相性が良くなかった。また、RFQ には次のパルスには復帰させる高速クイックリカバリーを実装したが、復帰までの時間が短いため (<40 msec) EPICS 経由でのポーリングしているデータ収集ではタイミングによってはインターロックの履歴を残せない場合があることが分かった。今回開発したのは、MySQL database を使用した LLRF インターロックを管理するシステムである。LLRF PLC はインターロックに対応する D レ

* sato.yoshikatsu21@jaea.go.jp

ジスタの状態が変化したときに、時刻(5レジスタ分:月,日,時,分,秒)¹とインターロックの状態(ex.5レジスタ分)を、リングメモリの役割を担うDレジスタの一定領域(ex.D05000-D10000)に書き込んでいる。デジタイザが実装されているステーションの場合は、PythonプログラムがこのDレジスタの状態を監視して、新しい情報があった場合はMySQL databaseに格納している。また、PythonプログラムはMySQL databaseにアクセスすることで、インターロック発報履歴を閲覧することが出来るようにした。これはデジタイザが実装されているステーション毎に設置されたPC上で発報履歴の閲覧が確認できるだけでなく、加速器の制御用ネットワークの端末であれば、どこでも全てのLLRFシステムのインターロックの発報履歴の閲覧を可能とした。

2.2 RF波形自動解析システム

上記のMySQLを使用したLLRFインターロック管理システムは、元々は新規に導入するデジタイザを使用するステーションを対象にしていたが、使用開始してから直ぐに利便性に気が付き、タッチパネルで管理している従来のステーションまで拡張させた。これにより、LLRFに關与する全てのインターロック情報は、MySQL databaseに集約されることになり、解析の自動化を可能にした。既設の解析の方法では、①システム汎用SCADAのWonderware InTouchにおいてPLCからインターロック情報を取得してPHPを用いて表示された結果、②J-PARCの電子ログのZLogからビームの情報、③オシロスコープのRFダウン時の検波波形の確認を人が仕分けることで月間の集計などを行ってきた。しかし、J-PARCリニアックのRFのインターロック発報は加速器運転のMPS停止事象の中で群を抜いて数が多く、これの人力での解析には多くの時間を要した。そのため、自動復帰した事象に関してはビーム停止時間を集計しなかったり、RFQに関しては波形の解析を諦めたりするなど妥協してきた経緯がある。今回、自動でRFダウン事象の解析を行うシステムを開発した。このシステムでは、MySQL databaseのインターロック履歴、ビーム状態のEPICSレコード、RFダウン波形を時刻の一致性から同一事象かを判別している。MySQL databaseのインターロック履歴からは、発報の内訳だけでなく、発報時刻とリセット時刻を得て整列し直している。ビーム状態のEPICSレコードからは、インターロック発報時刻はビームが運転していたかの情報を得ている。ビーム運転中であれば、ビームの再開時刻の情報も取得して、後々停止時間を計算できるようにしている。RFダウン波形からは、パルス内のどのタイミングで発報したか、Tank AとBのどちらの空洞で落ちたか、RFを遮断した後のRFの減衰の特定数とそこから放電の有無の判断を行っている。また、RFダウン波形の中には放電などの発報以外だけでなく注意すべき痕跡が存在することもある

ので、人がRFダウン波形の確認をするべきかの判断も自動で行い、チェックフラグを立てている。既存のMySQL databaseのインターロック履歴の付加情報は、別のMySQL databaseに整理されて保存される。これのデータは、MySQL workbenchを使用して、チェックフラグの確認や必要に応じて編集を行うことができる。このシステムの試験運用を行い、より便利になるように改修して、実機運用に活用できそうなことを確認した。夏期シャットダウン以降は、このシステムを本格的に活用することでRF発報事象のまとめに要する労力の削減を期待している。

2.3 波形データの監視

ビーム運転を安定化させロスによる機器の放射化を軽減させることは重要な課題であり、J-PARCリニアックにおいては空洞のRF電界を高精度に安定化させることがデジタルフィードバック&フィードフォワード(DFB&DFP)システムを採用している。しかし、各機器の安定性やビーム電流の安定性など、空洞のRF電界を変動させる要因は多々存在している。今回、新たに追加したシステムは、空洞のピックアップ信号の振幅・位相がDFBの基準と比較して閾値より大きい変動があったときにCSSで表示させている運転状況の画面に警告を出してビーム運転時のロスの可能性をいち早く気づくことを可能としている。また、同時にRF波形の保存も行っており、波形の違いも振り返ることができるようにしている。

2.4 異常時RF波形の保存

2020年にDTL3, S01~16にcPCIのDFBシステムに代わるデジタイザを導入している。2021年には、上記に加え、RFQ, DTL1,2にデジタイザ、MEBT1 Buncher1,2, Chopper1,2にmicroTCA.4システムを導入することを予定している。これらのシステムに、新タイミングシステムからSFP経由でJ-PARCのイベントタグを受信できる機能を実装した。デジタイザ及びmicroTCA.4システムには、1Gbyteのメモリをリングメモリとして、波形及びDFBの途中の計算過程を書き込む機能を実装している。このシステムは、1パルス当たり任意の16,384clk分のデータであり、1バンク当たり64パルスを格納でき、全体で16バンク構成になるように設計されている。異常が発生した場合、FPGAが書き込むバンクを切り換え、その間に異常時の波形を含むデータをサーバにコピーする。パルスのfooterには、J-PARCイベントタグを書き込むようにしている。現在、LLRFでMPSが発報した事象のRF波形の解析を行っているが、それ以外のMPS発報事象に関してはデータを収集することを行ってこなかった。この新機能を活用できると、BLMの発報などが発生した場合にRF起因かを判断できることが期待できる。2021年の夏期シャットダウン以降、この機能を活用できるようにデコーダや解析システムの整備を進めている。

¹ シーケンスCPUを採用しているが、NTPサーバと同期したPCで1日に1回LLRF PLCの自動時刻合せスクリプトが実行されるため、時刻は秒単位では正確である。

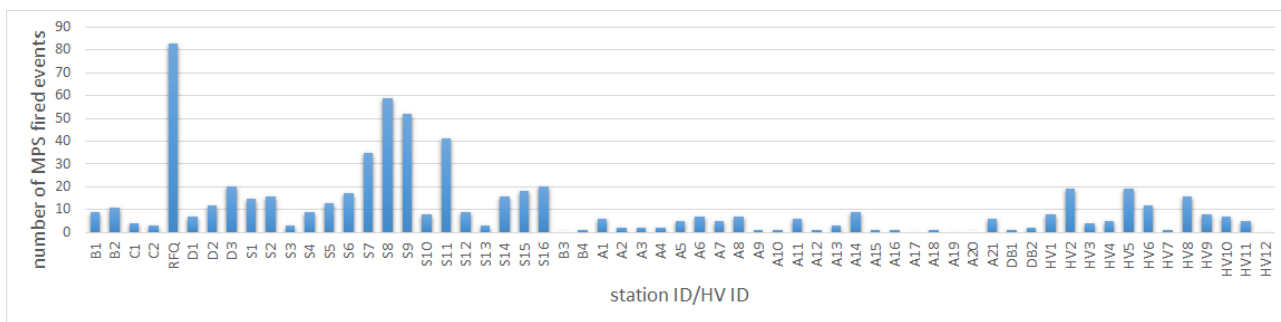


Figure 1: Number of MPS fired events relating the linac RF system.

3. インターロック事象の調査及び対応

今回、はリニアック RF システムの 2020 年 11 月から 2021 年の 7 月の期間内でビーム停止時やビーム試験時を除外して、ビーム利用運転時の MPS 発報した事象のデータに限定して分析を行った (Fig. 1)。

放電による RFQ RF 発報の 1 回目までを、MPS 発報事象から除外してビームを停止させないシステムにしても RFQ での MPS 発報数が最も多く、324MHz 系と 972MHz 系を比較すると、324MHz 系の方が MPS 発報数が多いことが明白である。324MHz 系内では、導波管管内放電で SDTL09、カプラ交換によるエージング不足での放電で SDTL11、タイミング異常で SDTL08,07 の回数が多くなっている。972MHz 系内では、RF&CLK board の故障で ACS14 の回数が多く、972MHz 系内全体でみると近くの HV が落ちたことによる共ずれや隣エリアの同時落ちが目立つようになってきた。

アーケセンサの誤報は Figure 2 に示す通りで自動復帰内の事象とはいえ、全 MPS の DTL は 5%、SDTL では 19% を占めている。972MHz 系では誤報は発生しておらず、324MHz 系特有のものである。おそらくノイズによる影響だが、どこでノイズの影響があるかが分かっていない。972MHz 系との大きな違いは使用しているモジュールの制作会社に違いがあるため、PLC ラダー、コネクタを調整して、972MHz 系のモジュールを 324MHz 系で使用出来るようにした。数カ月だが SDTL13 で試したところ誤報は発生しなかった。今後、これらの対応を別のステーションにも広げていきたい。

Figure 3 に空洞放電の回数のグラフを示す。去年と今年の放電回数を比較してみてもマルチパクタリングの影響が SDTL05A と空洞を開放した SDTL14A,15B,16A が多く、エージング不足が疑われる SDTL09 の発報も多い。次節の運転期間に発報が多い空洞はエージングを依頼する予定。

Figure 4 に Quick Recovery 事象を除いた MPS 発報事象の内、LLRF の内訳 (a) と HPRF の内訳 (b) を示す。合計で LLRF 関連は 16 時間 54 分、HPRF 関連は 64 時間 50 分の停止時間となった。詳細に関しては後述する。

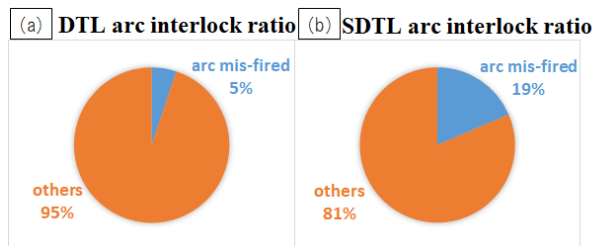


Figure 2: Ratios between mis-fired arc events and others for (a) DTL and (b) SDTL, respectively.

3.1 RF&CLK board の交換 (Fig. 4(a.7))

2020 年 12 月 7 日の未明に、SDTL02 で RF が反射異常でダウンした後に自動では立ち上がらず、担当者が呼出されて対応をしている。そのときは、PLL Lock が消灯していたため、RF&CLK board に原因があると判断し交換をして FB の調整をしている。しかし、その後も RF ダウン事象が頻発したため、FB の再調整を行なったがうまくいかず、現場を確認すると PLL Lock が点滅していた。このため、さらに違う予備品と交換を行った。

予備品に不良があったことも停止時間を長引かせた。予備品の受け入れ試験、保管体制に関しては改善することを計画している。RF&CLK board 交換後はどの board も、出力位相が 3、4 日で 1~2deg. 程度のドリフトが見られることが分かった。これは温度上昇によるものだと考えられる。その他に RF&CLK board 関係の事象は 3 件ほどあった。

3.2 デジタイザの不具合 (Fig. 4(a.6))

2020 年 12 月の運転から DTL3、SDTL01~16 に既存の cPCI に代わる新しいデジタイザを導入している [1]。2021 年 1 月 19 日の未明に、SDTL14 で進行波の過大入力でダウンした後に自動では立ち上がらず、担当者が呼び出され対応している。この時は、デジタイザの AMC エラーが点灯していてデジタイザのリポートをすることでエラーは解消した。デジタイザの不具合の一つに AMC の再現性の問題がある。電源の ON/OFF 等で ADC の読み値が変わってしまうことが多々あるので、業者と連携して調査を行っている。

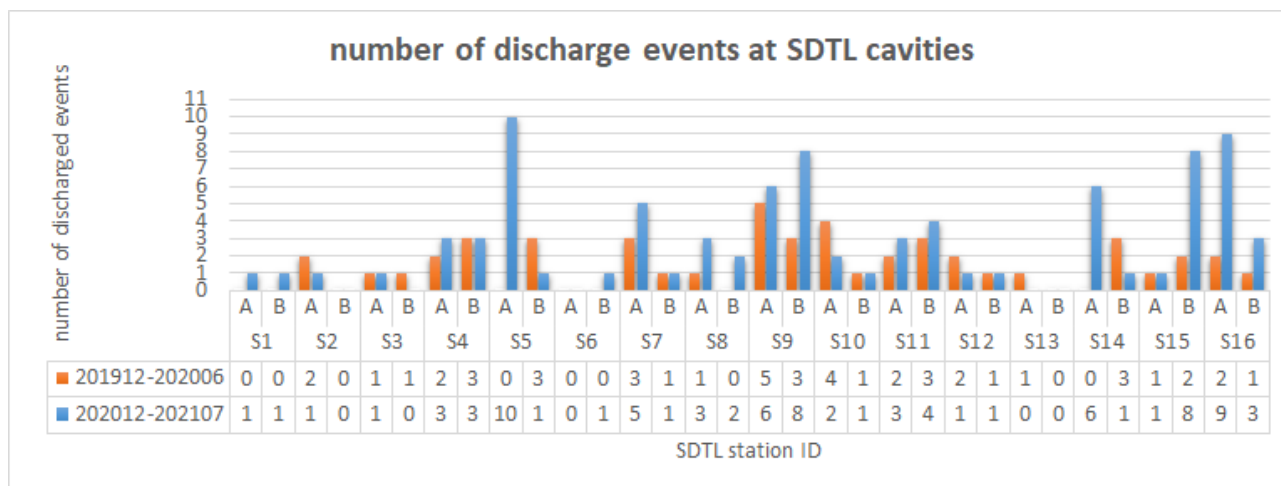


Figure 3: Number of discharge events at SDDL stations.

3.3 50W アンプの upper limit (Fig. 4(a.2))

2021年4月25日から50Wアンプがupper limitのエラーを検出するようになった。調査をしたところ、検知レベルがギリギリに設定してあったのと、クライストロンゲインが若干落ちたことによるエラーであった。

リニアックではクライストロンだけではなく、アンプ類も経年劣化でゲインが落ちている傾向にあるため、これらの監視をデジタイズで行い、交換及びオーバーホールまた、予備品の確保を進めていきたい。

3.4 真空異常 (Fig. 4(a.1))

特にSDDL01、SDDL08、SDDL15の空洞で真空異常が発生する。Figure 3の放電とは関係性はなさそうであり、真空機器の経年劣化も考えられるが、原因究明には至っていない。これらの事象は、RFが原因か空洞が原因かの切り分けが難しく、空洞グループと情報を共有して調査を行っていく。

3.5 タイミング関係 (Fig. 4(a.4))

2020年12月8日からVSWRメータでGATEアラームが数回発生している。調査の結果、タイミング抜け事象を感知していた。タイミングを管理している制御グループと連携して新タイミング送信モジュールに不具合がある可能性を考え、交換を行った結果、タイミング異常は大幅に減った。

3.6 導波管管内・クライストロン・オイルタンクの放電 (Fig. 4(b.9))

2021年1月15日にSDDL09で導波管管内放電のためクライストロン交換。2021年6月19日にSDDL10でクライストロン内の放電。2021年6月3日にACS17のオイルタンクの放電が発生した。導波管管内の放電は、クライストロン窓付近の導波管締結部ボルトの締め忘れによりギャップが生まれその部分で放電をしていた。クライストロン内の放電は

Mアノードの逆バイアス電源不足電圧が発生。高電圧印加を繰り返し行ったことでMPSは発生しなくなった。原因究明までは至ってはいないが、クライストロン内の放電の可能性が疑われる。オイルタンクはタンク内に空気層ができたことによるタンク内での放電が原因と特定された。

HPRFの機器は調査時間が長くなってしまふことから、これらの予兆を捉えることが稼働率の向上に与える影響は大きい。

3.7 クライストロン真空 (Fig. 4(b.3))

HPRFでのMPS発報の内容の中で回数が多いのはクライストロンの真空である。現在実装しているSDDL02及びSDDL04のクライストロンは真空特性が悪く、特に真空での発報頻度が多い。

また、発報後に真空が回復する前に高圧を上げて真空を悪化させ、再度真空で発報させる悪循環に入ってしまうケースが多々あった。現実的には、担当者ではないオペレータがインターロックの内容を判断して、真空のときはゆっくり上げるなどの対応をすることは難しい。スクリプトでの対応も考えたが、実機での実施は行っていない。最も多いSDDL02は今年のメンテナンス時期に交換する予定である。

3.8 高圧ケーブルの不具合 (Fig. 4(b.5))

2021年2月14日にバイアス電源電圧低下でHVが落ちる現象が発生。カソード電圧が10kV付近でHVが落ちることで、高圧ケーブルを交換した。交換した際に絶縁破壊を起こした形跡を発見したことで原因の特定となった。

過去にもケーブルの絶縁破壊は何度か発生していて、ケーブルの改良などが進められている。

3.9 クライストロンメインコイル電源不具合 (Fig. 4(b.1))

2021年1月16日RFQのクライストロンメインコイル電源のファンがロックして停止しており、電源が過熱したため、動作が停止した。原因は特定され

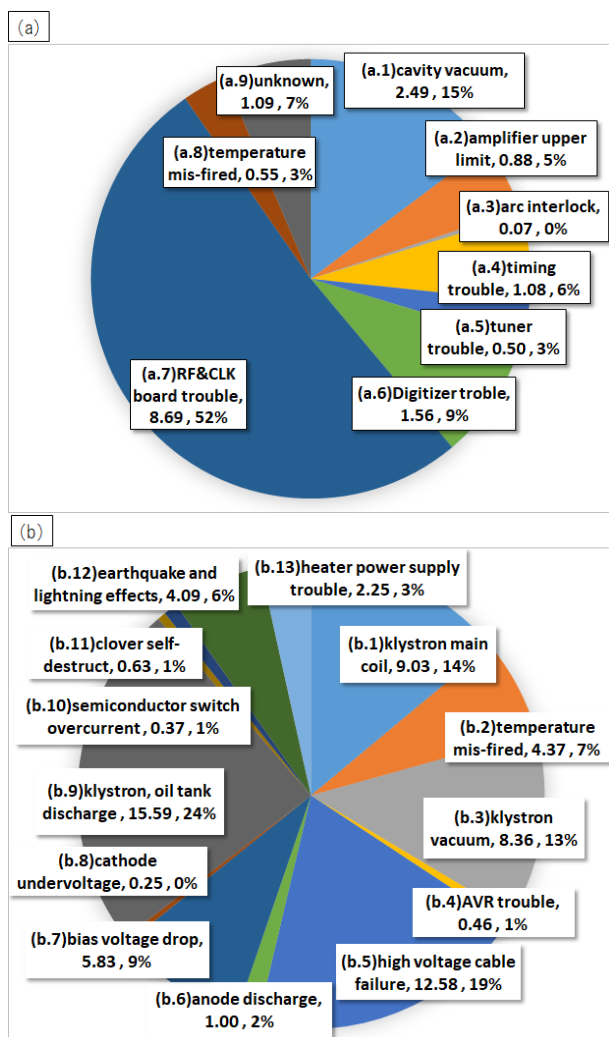


Figure 4: Contents of MPS fired events excluding those of restarting with quick recovery of (a) LLRF and (b) HPRF, respectively.

たが、交換するのに時間がかかった。過去にもあった事象で情報の共有の重要性を再認識した。また、これらの機器も経年劣化が進んでいるため、新しい電源に移行する予定である。

4. まとめ

今回、MySQL database を使用した LLRF インターロックを管理するシステムを開発することで LLRF システムのインターロックの発報履歴が加速器の制御用ネットワークの端末であれば、どこでも閲覧可能になり、RF 発報事象のまとめに要する労力の削減、利便性がよくなった。

また、ビーム運転の安定化のための監視の強化が出来たことと、今後はデジタイザを使用した異常時の RF の波形の取得も実施していきたい。

参考文献

- [1] K. Futatsukawa *et al.*, “Present Status of J-PARC Linac LLRF System”, THPP38 in these proceedings, Sep. 2-4, 2020. Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.