

J-PARC リニアック RF ダウン事象の解析

ANALYSIS OF THE J-PARC LINEAR ACCELERATOR RF DOWN PHENOMENA

佐藤福克^{*A)}, 岩間悠平^{A)}, 篠崎信一^{B)}, 平根達也^{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)}, Tatsuya Hirane^{B)}, Yasuhiro Fuwa^{B)},
Ersin Cicek^{C)}, Zhigao Fang^{C)}, Yuji Fukui^{C)}, Kenta Futatsukawa^{C)}, Satoshi Mizobata^{C)},
^{A)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.
^{B)} Japan Atomic Energy Agency
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the J-PARC linac, 45 klystrons and 4 semiconductor amplifiers (324MHz and 972MHz) are used to excite the accelerating cavity and are used to operate the accelerator. There are various factors that cause the accelerator operation to stop, but MPS fired events of linac RF account for a large proportion of both the down time and the number of stops. Therefore, it is important to analyze the cause of the linac RF issuance, and it is expected that taking countermeasures against the analyzed cause will lead directly to stable operation of J-PARC. We developed the data acquisition system and started to analyze the data systematically and statistically. With all these data, we are dealing with MPS fired events to improve the availability ratio.

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。J-PARC の稼働率は、令和 1 年度で MLF 行運転で約 95%, NU 行で約 90%, HD 行で約 80% である [1]。利用運転の停止時間に着目して想定外の故障による長期停止を除外すると、リニアックの大電力 RF(HPRF)に関連した MPS 発報での停止時間が最も長い。利用運転停止の回数的には RFQ の放電による RF MPS 発報事象が大多数を占めている。即ち、リニアックの RF システムを改善することは、ビーム利用運転の稼働率の向上に直結する。

データ収集系を整備して、2019 年の夏期シャットダウン後から系統的・統計的にリニアック RF MPS 発報の分析を開始した。これにより、ビーム利用運転の稼働率の向上につなげたいと考えている。

2. データ収集系の構築

2.1 RF ダウン波形データの収集

J-PARC リニアックでは、空洞コンディショニングのときなどに RF の検波波形を現場で監視する目的で各ステーションにオシロスコープを常設している。324MHz 系では主に Tektronix の TDS3014B, 972MHz 系では同社の DPO3054 のオシロスコープを使用している。RF 信号は VSWR メータ内で検波され、そのモニタ用の出力信号をオシロスコープに入力している。DTL 及び SDTL では、ch1 と ch2 で空洞入力カプラ直前の方向性結合器の反射波形、ch3 と ch4 で空洞ピックアップ波形をモニタしている。一方で、入力カプラが 1 つの MEBT1B1,B2,C1,C2 及び 972MHz ス

テーションでは、ch1 で空洞入力カプラ直前の方向性結合器の入射波形、ch2 で反射波形、ch3 と ch4 で空洞ピックアップ波形を測定している。

波形データ収集系は予算をかけずに、この既設のオシロスコープを活用することで構築した。最初は、RF ダウン情報を EPICS 経由で感知すると自動で対象ステーションの画像データをサーバの HDD に保存するようにした。また、画像データを保存した後、画像データをクリアする機能も実装した。しかし、324MHz 系の DTL 及び SDTL の時定数が 13~25 μ s であるのに対して、972MHz 系では時定数が 2~3 μ s と短く、画像データからは放電の事象とノイズ等の事象を区別できなかった。そこで、972MHz 系では画像データに加え、途中から csv データも取得するように機能を追加している。また、空洞コンディショニングなどでオシロスコープの設定を変更することもあり得ることから、設定の呼出も遠隔で行う機能を実装している。メンテナンス後に設定の呼出を実行して必ず設定が同じになるようにすると同時に、オシロスコープを現場で自由に使用できるように配慮した。

2.2 インターロック内容の保存・閲覧

低電力高周波制御 (LLRF) システムでは、PLC でインターロックの管理をしている。LLRF の PLC ラダーでは、インターロックが発生したときにその内容毎に割り当てられたレジスタの数をインクリメントさせる機能を実装している。汎用 SCADA の Wonderware InTouch を用いて LLRF PLC との通信を行い、そのレジスタの値が変化したときに Microsoft SQL server に時間情報を付加してデータを保存している。このデータ収集の対象は LLRF PLC だけでなく、HPRF PLC のインターロック情報も含んでいる。Microsoft SQL server 上の PC は、加速器シフト毎のデータの集計などを行い、J-PARC のデータサーバ上

* sato.yoshikatsu21@jaea.go.jp

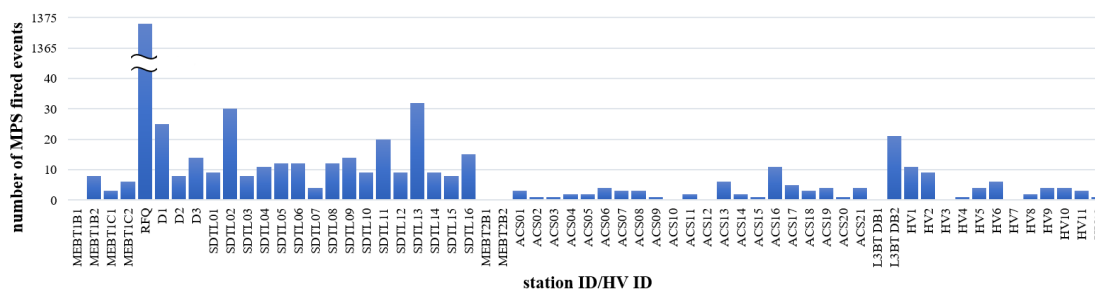


Figure 1: Number of MPS fired events relating the linac RF system.

にデータを送信している。これらの情報は、PHP を用いて web ブラウザ上から確認することができる。Quick Recovery で自動復帰したときは、EPICS のアーカイバ上にインターロックの内容の記録が残らないときもあるが、このシステムを開発することで遠隔で内容を確認することができ、RF 発報事象の分析に要する労力の削減を可能にしている。

3. インターロック事象の調査及び対応

今回、2019年11月から2020年の6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)。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、後述するRF&CLK boardの故障でSDTL13、デジタルの降圧変圧器の故障でSDTL02の回数が多くなっている。972MHz系内では、DB2はSDTL02のチューナコントローラのADモジュールの故障に誘発された事象が、ACS16はクライストロンの放電で進行波の過大出力に誘発された事象が支配的となり、空洞の放電が起因となる事象は極めて少なかった。

今回構築したシステムで収集したSDTL09Bの放電波形とアークの誤発報の波形をFig. 2に示す。Figure 2(a)と(b)を比較すると明らかだが、空洞ピックアップ波形を測定することで、放電事象とその他の事象を区別することができる。また、波形は放電したタイミングの情報も含んでおり、その傾向なども調査としている。

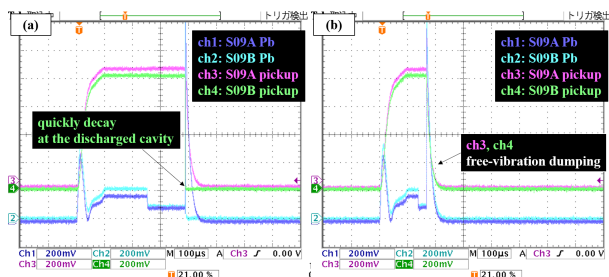


Figure 2: Obtained oscilloscope pictures of (a) a discharge event at the SDTL09B cavity and (b) a mis-fired arc event, respectively.

Figure 3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17時間24分、HPRF関連は27時間36分の停止時間となった。詳細に関しては後述する。

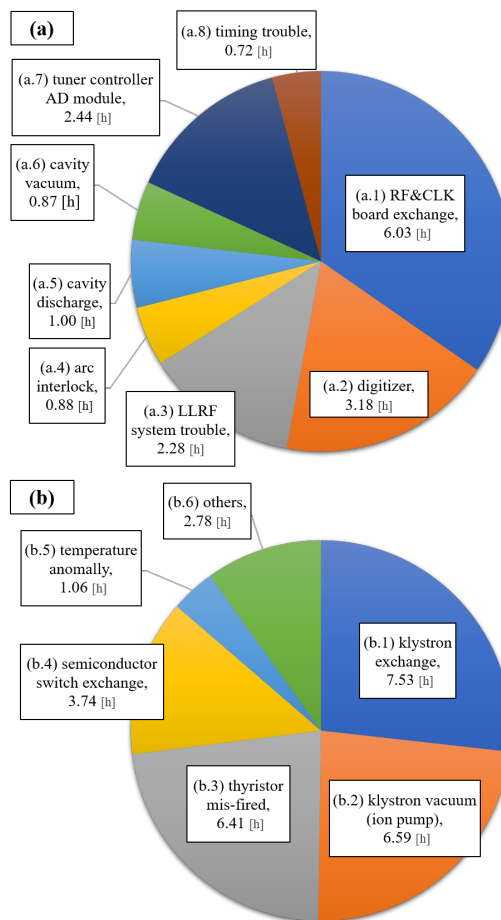


Figure 3: Contents of MPS fired events excluding those of restarting with quick recovery of (a) LLRF and (b) HPRF, respectively.

3.1 RFQのMPS事象

J-PARC リニアックのBLMやRFでMPSが発報してビームを停止する場合、RFQのRFダイオードス

イッチを切ることによってRFQの電場を落とし、マクロパルス内で高速にビームを停止させる。即ち、RFQのRFが発報して空洞電場が落ちた状態と上記の状態は、物理的には同じになる。

J-PARC リニアックは、繰返し周期が25Hzであり、マクロパルス間は約40msになる。この40msの間に、RFの停止、インターロックのクリア、RFの再開の過程を行うことが可能で、かつ次のマクロパルスでもRFQ RFが再び発報することがなければ、ビームを停止させることは必ずしも必要な訳ではない。2019年の夏期シャットダウン中にPLCの全機をマスターにしたことでPLCラダーのサイクルタイムが約10msから2msになり、上記のプロセスを40ms以内に行うことが可能になった。元々、LLRF PLCには、放電でRFが発報した場合に、数秒後に自動復帰させるQuick Recoveryシステムを実装している[2]。復帰まで数秒待つのは、放電で放出されたガスがポンプで排出されることを想定しており、この待機時間を空洞毎にパラメータで決められるようにしている。今回、このQuick Recoveryの待機時間を無くして遅延時間を限りなく短縮させたことで、RFQ RFでMPSが発報しても次のマクロパルスでRFを再開するシステムを実装した(以下、高速Quick Recoveryと呼ぶ)。また、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こととした。1回目の放電事象はMPS発報事象ではなくなったが、放電事象が発生して中途半端なビーム電流のビームが下流に加速されたことはPLCで回数を数えている。また、制御タイミング系からMLF行/MR行の信号を受信してPLCのDIに入力することで、そのときのビームの行先を区別している。

Figure 4に、月別のRFQの発報回数を示している。赤い棒線はRFQによるMPS発報回数を示し、空白は高速Quick Recoveryを採用されなかったと仮定したときに発報した回数を示している。2020年3月18日から上記のシステムの運用を開始しているが、RFQのRF MPS発報でのビーム停止の回数が10分の1以下と激減していることを確認することができる。これにより、ビーム停止回数を減らすことに貢献することができた。

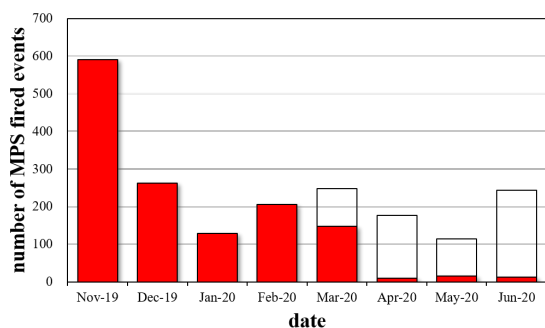


Figure 4: Number of MPS fired events by RFQ. The empty graphs indicate the number excluded from the MPS events due to system improvement.

3.2 RF&CLK boardの交換 (Fig. 3(a.1))

2020年5月30日の未明に、SDTL13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、手動で立ち上げた後にビーム利用運転を再開したが、その後フィードバック(FB)のパラメータを調整している。しかし、FBで空洞位相は一定に担保できたものの、その後もFF_BASEを変化していないが出力位相は1週間に10deg.程度のドリフトが見られて、メンテナンスの度にFBパラメータの調整を行っていた。追加のモニタを増設して位相ドリフトの原因がRF&CLK boardにあることを突き止め、6月19日にビームを停止して交換作業をするように計画した。しかし、前日の18日の夜中にRFダウン事象が発生して立ち上がらず、急遽RF&CLK boardの交換した。

これまでRF&CLK boardの故障は、経年劣化でVCXOの周波数が変動してPLLが外れることがメインであったことと、FBに影響するため安易に触ることを避けてしまったことが重なり、解決までに時間を要してしまった。予備品に不良があったことも停止時間を長引かせた。予備品の保管体制に関しては改善することを計画している。

3.3 デジタイザの降圧変圧器の故障 (Fig. 3(a.2))

2020年1月の運転からSDTL02に、同年の5月のゴールデンウィーク以降からSDTL13に、既存のcPCIに代わる新しいデジタイザを試験導入している[3]。このシステムでは、RF ON信号をLLRF PLCから受信している。その際に、自作の降圧変圧器で+24Vから+5Vに降圧して使用していた。

SDTL02は1月と2月で放電によるRF発報が1回であったのに対して、3月に18回、4月に8回となり、明確な増加傾向が見えていた。しかし、モニタを追加しても増加の原因を特性することはできなかった。上記とは別にSDTL13にインストール時に使用する降圧変圧器を製作したときに、現行の設計では長期使用でトランジスタの故障の可能性があることに気が付いた。ゴールデンウィークでSDTL13のインストールと同時にSDTL02の降圧変圧器に保護抵抗の追加とトランジスタの交換を実施したところ、5月と6月のRFダウンが各1回となり減少した。交換したトランジスタを調査しなかったため直接の証拠はないが、おそらくRFダウン頻発の原因は自作の降圧変圧器である。

今後、デジタイザの量産機のインストール時の降圧変圧器はメーカーに外注した物を使用するが、今回の失敗を活かした設計にしている。

3.4 LLRFシステムによる停止 (Fig. 3(a.3))

自動チューナ制御の再現性の向上のために、離調度の測定結果に狭帯域IIRデジタルフィルタを実装した。これにより自動チューナ制御の反応速度が遅くなることは認識していたが、2020年3月20日にDTLのRFを立ち上げるときに、実装されている自動立ち上げプロセスでは立ち上げることはできなかった。そのとき、呼出し対応となり、担当者がフィルタ

のことを失念していたこともありビーム再開までに1時間30分以上を要した。その後、PLC ラダーを変更してFBを使用した時だけにIIR フィルタが活きるように対応して、同様の事象が起きないように改修している。

2020年1月16日にSDTL05のRF MPSが発報後に立ち上がりせずに、呼出し対応をしている。これに関しては、担当者が到着後に何事もなかったように立ち上がってしまったので、原因不明の案件である。これにより、40分程度のビームを停止させている。

3.5 324MHz系のアーク発報 (Fig. 3(a.4))

LLRFシステムでは、クライストロン窓、サーキュレータ、TankA/Bのカプラの4箇所アークを監視してインターロックとして活用している。ほとんどの324MHz系のTankA/Bのカプラのアークで発報したときには、波形からは発報した痕跡が見られなかった。そこで、アークセンサモジュールのクライストロン窓/サーキュレータの入力にTankA/Bのカプラの信号をTankA/Bのカプラの入力にクライストロン窓/サーキュレータの信号を交換して発報原因を調査した。その結果、発報原因はほぼ100%測定器側のノイズであると結論付けられた¹。DTLに関しては、TankA/Bのカプラを見ている光ケーブルは取り外されて光が入らないようにキャップをしているにも拘わらず、カプラのアークで発報している事象が17%程度あることが分かった。Figure 5に、DTLまたはSDTL空洞がRFダウンする事象の内にアーク発報である割合を示している。言い換えると、アークの誤発報対策を実施すると、DTLのMPS発報の17%、SDTLのMPS発報の37%を削減することができる。

Figure 3(a.4)のアークでのMPS発報は、令和1年度の夏期シャットダウン後の運転で、空洞グループからアークでの発報事象をQuick Recovery事象から除外してほしいとの依頼があったことに起因している。Quick Recoveryが働かない場合は、ビーム再開までは5~10分が必要になり、停止時間が積み重なってしまった。現在は、アーク発報はQuick Recoveryの対象にPLCラダーを戻している。

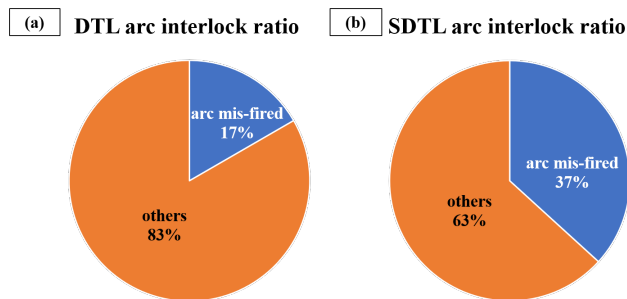


Figure 5: Ratios between mis-fired arc events and others for (a) DTL and (b) SDTL, respectively.

¹ 1年間を通じて、本当にSDTL09でアークで発報したと考えられる事象が1回だけあった。そのときは、反射のインターロックも同時に発報して、検波波形では放電した形跡が観測された。

3.6 空洞放電・真空 (Fig. 3(a.5)(a.6))

これらは避けがたいと思っていたが、今回DTLのMPS発報が増加したときに空洞グループに依頼して空洞コンディショニングを実施したところ発報回数が減ったように見えた。随時、MPS発報データの統計的に分析することで、空洞の放電などのMPS発報回数を効率的に減らすことが可能かもしれない。引き続きデータの取得と解釈を進めていく予定である。

Figure 6に空洞放電の回数のグラフを示す。統計は十分とは言えないが、現状では放電回数が多い空洞は、マルチパクタの影響で不安定であるSDTL05空洞や電場が高いSDTL16空洞ではなく、全く関係ないように思えるSDTL09空洞である。これらのデータは今後のコンディショニングに活かせるデータである[4]。

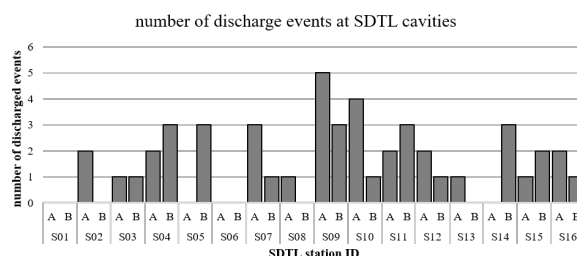


Figure 6: Number of discharge events at SDTL stations.

3.7 チューナコントローラのADモジュールの故障 (Fig. 3(a.7))

2019年12月18日にSDTL08でRFダウンが頻発する現象が生じた。日勤の時間帯ではあったが、不幸にもRFグループのシステムに精通するほとんどの人が出張で不在であった。また、本件で誘発されたDB2のRFダウンに人を割かれたこともあり対応に時間がかかった。原因は、チューナコントローラPLCのADモジュールの故障で、ポテンショメータでチューナ位置が正確に測定できないことにあった。同故障はそれ以前には無かったものの、メンテナンス中であったためにビーム利用運転を停止させなかったが2020年4月15日にSDTL07で発生している。チューナコントローラは製作から15年以上が経過しているため製品の寿命と考えている。

チューナコントローラは空洞グループ所有であり、全数のAD交換を依頼している。本件はMPS多発の数日前に先だって位置の測定値のばらつき現象があり、避けられた可能性が高い。RFグループとしては、故障の予兆を捉えられるように監視の工夫をする予定である。

3.8 タイミング関係 (Fig. 3(a.8))

2019年12月10日にタイミング用CPUボードモジュールの故障が発生した。RFシステムではタイミング異常を検出する機能がいくつか存在するが、後から分析すると20日以上前にタイミング抜け事象を感知していた。

随時, MPS 発報原因を分析して, タイミングを管理している制御グループと連携と取ることで, ビーム停止時間の削減につなげられる可能性がある。

3.9 クライストロン・半導体スイッチの故障 (Fig. 3(b.1)(b.4))

2020年3月8日にACS16でクライストロンを, 2019年11月25日に半導体スイッチの交換を実施した。今回の故障時は後からデータを整理しても予兆を捉えることができなかった。高額機器であるために予備交換も難しいことから, 完全に避けることは困難である。一方で, 原因特定までの手順などで停止時間を短くできるように検討を行っている。

HPRFの機器の交換作業は, 1回での停止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 [5,6]。

3.10 クライストロン真空 (Fig. 3(b.2))

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SDTL02及びSDTL04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。2019年11月29日には夜間に真空で発報して立ち上がらなく, 担当者の呼出し対応があったため停止時間が約2時間20分となってしまった。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。一方で, クライストロンの真空で発報した場合は, 基本的には担当者もイオンポンプの電流値を見ながら高圧を徐々に上げる単純動作をしているだけである。

そこで, 同様の動作をする高圧の立上げスクリプトの整備を進めた。真空インターロックの閾値を緩めたこともあり, SDTL02及びSDTL04の真空での発報数は減少したために運用することはなかったが, 直ぐに実装できる体制までは整備してある。

3.11 サイリスタの誤点弧 (Fig. 3(b.3))

2019年11月18日にクライストロン電源6号機でノイズによるサイリスタの誤点弧が発生して, 約6時間半のビーム利用運転の停止を余儀なくされた。原因はAVR基板のノイズであり, AVR基板の交換で改善している。サイリスタの誤点弧は, 数年に一度くらいの頻度で発生していて, 他のときと比べると今回のビーム停止時間は短縮できている [7]。更に短縮を目指すため, 保守契約しているメーカーの技術者を待つ時間が3分の1くらいを占めているので, その間に問題の基板の特定などの作業を進めることができないか検討している。

3.12 温度高の誤動作 (Fig. 3(b.5))

熱電対でコイルやクライストロン窓の温度を測定しているが, その誤動作と思われる事象が4回あっ

た。夏期シャットダウン中の増し締め徹底で, ある程度は削減できていると思っている。

4. まとめ

今回, RF ダウン時の検波された波形データを取得するシステムを構築した。既存のインターロック内容を保存して確認できるシステムと合わせて, 波形データの解析を随時行い, 対応することができた。特に, RFQの高速Quick Recoveryを実装して運用することで, RFQ RF MPS発報によるビームの停止回数を10分の1以下のすることができた。

また, 分析することで後から予兆があった事象がいくつかあることが分かった。経験を活かすことができれば, 今後の稼働率の向上につながることを期待できる。これからもMPS発報事象の分析を継続して, データの蓄積を行う予定である。

謝辞

RF ダウン波形データの収集システムは, J-PARC 制御グループの加藤裕子氏に協力して頂くことで構築することができました。このシステムを使って波形データを測定することから分析が進んだことは間違いありません。また, RFQの高速Quick Recoveryシステムは, 空洞グループの森下卓俊氏に先頭に立って頂くことで開発が進みました。制御グループの高橋博樹氏には制御機器及び体制の整備をして頂きました。これにより, RFQによるビームのダウン回数が大幅に減少することにつながりました。ここに感謝を申し上げる次第であります。

参考文献

- [1] K. Hasegawa, “J-PARC acclerator overview”, talked in ATAC2020, Tokai, Feb. 24-26, 2020.
- [2] S. Anami *et al.*, “Automatic Recovery Control of J-PARC Linac RF Sources”, Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu, July 20-22, 2005.
- [3] K. Futatsukawa *et al.*, “Present Status of J-PARC Linac LLRF System”, THPP38 in these proceedings, Sep. 2-4, 2020.
- [4] T. Ito *et al.*, “Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac”, Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.
- [5] T. Hori *et al.*, “Improvement for the Trip Rate of Klystron High-Voltage Power Supplies in J-PARC Linac”, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [6] T. Hori *et al.*, “Status and Measures of the discharge of M-anode for 324MHz Klystrons in the Linac at J-PARC”, Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [7] M. Kawamura *et al.*, “Present status of klystron power supply systems for J-PARC linac 2013”, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.