

J-PARC リニアックのビームロスモニタによるインターロックイベント INTERLOCKED EVENTS OF BEAM LOSS MONITORS AT THE J-PARC LINAC

林直樹 *^{A)}、菊澤信宏 ^{A)}、三浦昭彦 ^{A)}、二ツ川健太 ^{B)}、宮尾智章 ^{B)}

Naoki Hayashi*^{A)}, Nobuhiro Kikuzawa^{A)}, Akihiko Miura^{A)}, Kenta Futatsukawa^{B)}, Tomoaki Miyao^{B)}

^{A)}Accelerator Division, J-PARC Center, JAEA

^{B)}Accelerator Division, J-PARC Center, KEK

Abstract

The J-PARC linac operation is stable, however, the numbers of interlocked events due to single beam loss monitor (BLMP) is increasing. Recently, the counts is comparable to the number of RFQ trip, and a measure has been required for improvement of the operation efficiency. Thus, every event data has been analyzed and classified into three categories. It is found that there are characteristic signal or pattern of BLMP for every categories. Although the linac BLMP detector is standard, its setting parameters are differ from those of other two synchrotrons in the J-PARC. To optimize time resolution, the input impedance of its pre-amplifier is selected to be 50 Ω and interlock is defined in raw signal height and width not integral signal of BLMP. Some new parameters has been investigated to reduce unnecessary interlock.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Research Complex) は、3つの加速器、3つの実験施設からなる研究施設である。2014年のリニアックのアップグレード後、RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) での 1 shot ながら、設計性能のビームパワー 1 MW 相当を達成している。現状は、MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) 向けには、150 kW、MR (Main Ring) を経由して NU (Neutrino Experimental Facility) 向けには、470 kW、HD (Hadron Experimental Facility) 向けには、約 40 kW と安定的にビーム供給を行っている [1]。

J-PARC リニアックは、全長約 330 m、設計ビーム電流 50 mA で、負水素イオンビームを 400 MeV まで加速する。現状の繰り返しは、25 Hz (設計 50 Hz)、マクロパルス長 500 μ s である [2]。3-MeV の RFQ (Radio Frequency Quadrupole)、MEBT1 (Medium Energy Beam Transport) の後、DTL (Drift Tube Linac)、SDTL (Separated-type DTL)、ACS (Annular-ring Coupled Structure) の 3 種類の加速空洞から構成されている。ACS で、400 MeV まで加速されたビームは、L3BT (Linac-to-3 GeV-RCS Beam Transport line) を経て、RCS へと導かれる。L3BT は、さらに、0 度ビームダンプ手前までの直線部、90 度偏向させるアーク部、ビームハローなどを削るスクレーパ部 (最後の空洞である debuncher 2 もここに設置されている) からなる。スクレーパ部の最後には、RCS へ向かうラインとは別に、スクレーパ等で削ったハローを回収する 100 度ビームダンプなどがある。リニアック下流部のロスモニタ、SCT (Slow Current Transformer) の位置などを Fig. 1 に示す。

加速器一般で採用されている様に、J-PARC リニアックでも、不必要な放射化を未然防止するため、ビームロスモニタによるインターロックが設けられている。これは、RF システム、電磁石等、機器の不具合でビームを停止する機器保護システム、Machine Protection System (MPS) の一部である。最近の利用運転では、ロスモニタのインターロック発報が目立っている [1]。

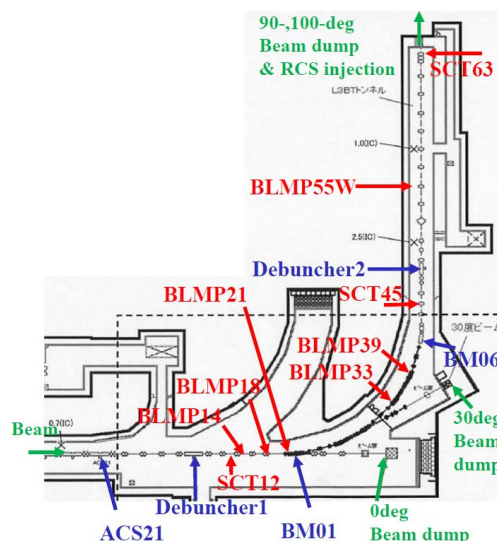


Figure 1: Downstream section of the linac after the final RF cavity ACS21. Locations of SCT and BLMP are indicated. BM01 is the first bending magnet of the arc section.

運転統計によると、停止時間は長くはないが、この発報回数は総数で、RFQ に迫るようになってきており、運転効率の改善に向けて、その対策が必要となってきた。そこで、従来からあるロスモニタの積分値を継続的にアーカイブしているデータ以外にも、MPS ログの活用、MPS 発生時の生波形記録システムを整備、解析を行った。本論文では、インターロックの発報状況と事象毎の分類した結果、今後のロスモニタや MPS の設定変更を検討した結果について述べる。

2. ロスモニタとその MPS イベントの集計

2.1 リニアックのロスモニタ

リニアック・ロスモニタの検出器は、他の 2 つのリングシンクロトロン、RCS、MR と同様に、比例計数管タイプ [3] (以下、BLMP と記す) を使用している。

*naoki.hayashi@j-parc.jp

時間分解能を重視するため、プリアンプの入力インピーダンスは、 $50\ \Omega$ に設定している。感度を極限まで高めるため、高電圧設定は仕様定格限度の $-2\ \text{kV}$ としているが、大きなビームロスが連続的・継続的に起こると、信号が飽和する。また、空洞から発生する X 線をバックグラウンドとして検出している問題もある [4]。

BLMP は、100 台以上存在するが、MPS の入力として使用されているのは、92 台である。各セッションにおける MPS 用 BLMP の数は、以下の通りである。3 つの空洞がある DLT セクションに 10 台、16 台の空洞がある SDTL セクションに 22 台、加速周波数が、 $324\ \text{MHz}$ から 3 倍の $972\ \text{MHz}$ にジャンプする MEBT2 では、3 台、ACS セクションでは、各空洞毎に 21 台、L3BT セクションに 31 台、0 度、30 度、100 度のビームダンプには、合計 5 台がそれぞれ設置されている。

2.2 MPS ユニット及び発報記録

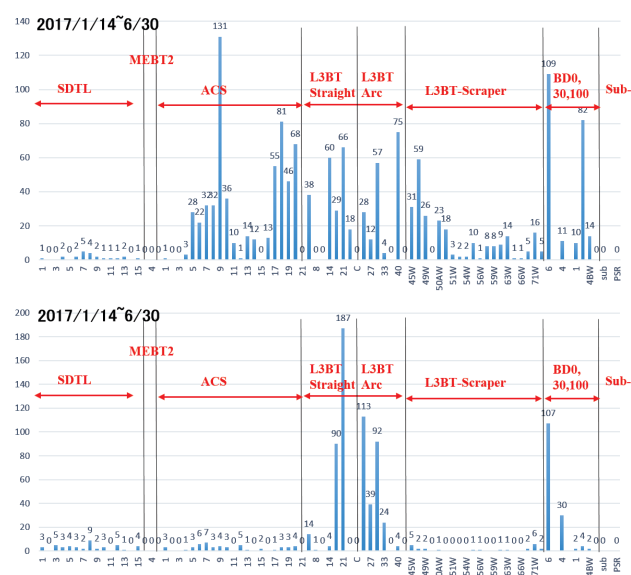


Figure 2: (Top) Numbers of only BLMP MPS events for individual BLMP in 2017. (Bottom) Numbers of BLMP MPS associated with RF MPS events for individual BLMP.

ロスモニタ用 MPS ユニットは、コンパレータ、メインとサブ、2 台の CPLD (Complex Programmable Logic Device) から成る。コンパレータには、EPICS 経由で閾値が与えられ、信号電圧がこれを超えているか、まず判定する。次に、CPLD で、閾値を超えていた時間幅をみる。デフォルト設定では、約 $340\ \text{ns}$ となっており、これを満たすものが、「MPS 発報」と定義される。メインが発報していれば、別途どの BLMP が発報したか記録される。但し、入力された信号が幅の閾値に近いと、2 台の CPLD の内サブ系のみ発報することがある。この際は、集約したデータのみが挙げられて、ビームは停止するが、個別にどの BLMP が発報したかまで判別できず、ログとしても残らない。MPS 発報のログは、場所 (ロスモニタ名称) と時間だけが一行毎に記録が残るが、他の MPS イベントと単

純には、相関が取れない。そこで、「前後 1 分以内に BLMP 以外の他イベントがないもの」という条件で取り出したものが、Fig. 2 の上の図である (2017 年前半分; のべ 1462 回)。また、それ以外のものが、Fig. 2 の下の図である (のべ 830 回)。多くは、空洞の RF による MPS を伴ったもので、直線部の一番最後、90 度アーク部の前半、0 度、30 度のビームダンプにある BLMP が、顕著に反応していることが分かる。ちなみに、この時のサブ系発報回数は、ACS 及び L3BT アーク部前半のもので 239 回、L3BT アーク部後半以降で 86 回であった。

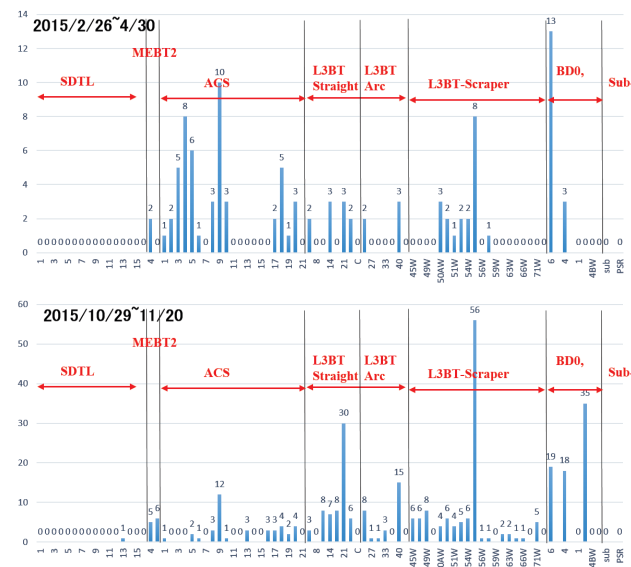


Figure 3: Numbers of only BLMP MPS in 2015 before and after summer shutdown.

2015 年は、MLF へのビームパワーが、 $500\ \text{kW}$ に到達したが、2 度にわたる中性子ターゲットの故障に見舞われた。故障前の MLF 運転時 (並行して MR 運転やリニアック調整運転時間も含む) の BLMP のみの MPS 発報回数を示したのが、Fig. 3 である。図の上が、4 月末まで約 2 カ月間順次、MFL 向けのビームパワーを $300, 400, 500\ \text{kW}$ と増やしていった時期になる (のべ 102 回)。図の下は、11 月後半まで、約 3 週間 $500\ \text{kW}$ 運転時のデータである (のべ 327 回)。これから、分かるように、BLMP のみ発報するイベント数が 2015 年のメンテナンスを境に大幅に増えた。特に、L3BT 直線部の BLMP21、L3BT スクレーパ部の BLMP55W の発報回数が顕著に増えている。残念ながら、その直接の原因は、特定できてはいない。ACS セクションの SCT 等の内径を $37.1\ \text{mm}$ から、 $40\ \text{mm}$ と僅かに大きくしたことはあるが、因果関係を示すのは、困難である。

現状電圧閾値は、 1.6 ないし $1.3\ \text{V}$ が概ね設定されている。幅については、デフォルト $340\ \text{ns}$ で、運用されてきたが、L3BT:BLMP55W を含む、5 台分を、幅を $540\ \text{ns}$ に変更して試験運用している (2016 年 12 月以降)。2017 年で BLMP55W 周囲のカウントが減っているのは、このためである。また、この設定変更によ

る残留線量の大きな変化は認められていない。

3. ロスモニタ MPS イベントの分類と分析

ロスモニタの MPS イベントは、3つに分類できる。

1. RF MPS に付随するもの (ロスがあって当然)
2. 複数の BLMP の MPS 発報 (何らかの理由で比較的大きなロスが発生)
3. BLMP 1 台単独の MPS (2015 後半以降これが増加)

条件がよく分かっている元で、各ロスモニタがどのように振舞うか調べておくのが必要で、まずは今回用いたシステムについて述べる。

3.1 生波形データ・アーカイブシステム

限定的ではあるが、MPS が発報したとき生波形をアーカイブするシステムをオシロスコープ DL1640 で構築している [5]。設定パラメータは、時間分解能 10 ns、レコード長 100 k、すなわち、時間幅 1 ms である。このシステムで取ったデータが、Fig. 4 や Fig. 7 であり、より時間分解能が必要な解析に用いている。但し、このシステムは dead time が長く、該当する MPS イベントが残っていないことが多々ある。また、保存されていても、オシロスコープ間で同期が保証されおらず、保存した 20 波形分の目視・比較を行い、どれが MPS に該当する事象であるか、手作業で決定している。

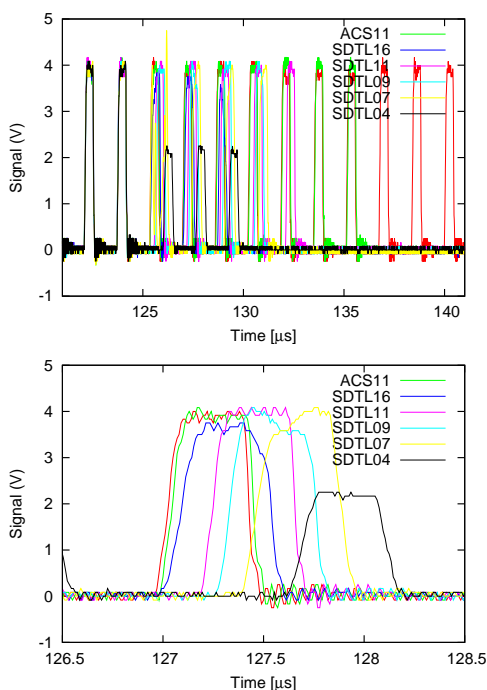


Figure 4: Intermediate pulse delay due to RF MPS. The chopped beam current is measured by SCT.

1 番目の分類についての例を Fig. 4 に示す。チョップされたビーム (中間バンチ; intermediate pulse) は、SCT で、確認できる。ロスモニタの波形と L3BT 直線部の SCT12 の波形を合わせて見ると、正常加速時 (赤色)

と比べて、MPS が発報した空洞の場所に依存した、中間バンチの時間遅れが見られた。上流の空洞で発報すると、ビームはそれ以上加速されないで、時間遅れは大きく、発報箇所が下流に行くにしたがって、時間遅れは、小さくなる (Fig. 4)。ACS セクションの中盤以降では、現データで明確な遅れを見ることは、困難になる。次の目安は、アーク部を通過するか、である。最下流 ACS21 RF MPS の場合、400 MeV より約 10 MeV エネルギーが低くなるが、アーク部直後 SCT45 で、ビームは確認できる。しかし、それより上流で RF が落ちると、ビームは SCT45 まで到達しない。つまり、MPS 発報するのは、ほとんどが、L3BT 直線部の最後、アーク部の前半、0 度または、30 度ダンプの BLMP までである。これは、前述の MPS 統計の結果 (Fig. 2 の下図) を支持するものとなっている。

2 番目の分類、複数台のロスモニタの MPS 発報、他の機器の発報なし、という事象数は、余り多くはない。殆どが、L3BT:BLMP21 を中心とした事象で占められており、1 番目の分類に類似のロス要因が考えられる。生波形が残っている事象について調べたところ、殆どが、マクロパルス先頭から、ロス或は、中間バンチの時間遅れが始まっていた。全てではないが、RF 空洞にトリガが、正しく供給されていない可能性も考えられる。事実、2015 年 11 月には、Chopper へのトリガ抜けが頻発し、問題になったことがある。

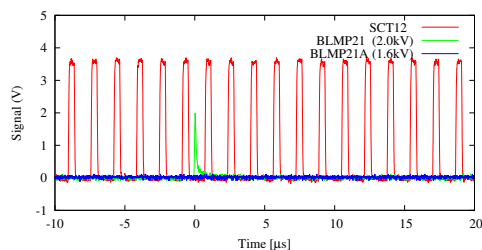


Figure 5: Signals from two BLMP21 and BLMP21A. Although they are located very closely, only one BLMP21 shows single peak signal.

3 番目の分類の事象は、まだ完全には、理解できていないが、確かに、生波形では、Single peak の波形を残している。Figure 5 の緑色 (L3BT:BLMP21) や、Fig. 7 の青、マゼンタ、水色の波形 (ACS09BLMP 及び L3BT:BLMP21) が、そのイベントに該当する。Figure 5 では、印加電圧が異なるが、BLMP21 直ぐ近くに BLMP21A という別のロスモニタを並べて設置したときのものである。BLMP21 に信号はあるが、BLMP21A には、全くない。1 番目の分類の事象であれば、Fig. 6 のように、印加電圧が異なっても両方に信号が出る。もう一つの特徴は、波形の立ち上がり時間である。RF の MPS を伴うイベント (赤、緑色) に比べると、立上り時間は速い。勿論、2 番目以降のピークの立上りは、連続する中間バンチに対応すると考えられるが、かなり緩やかな立上りとなっている。また、他の場合と異なり、テールはない。

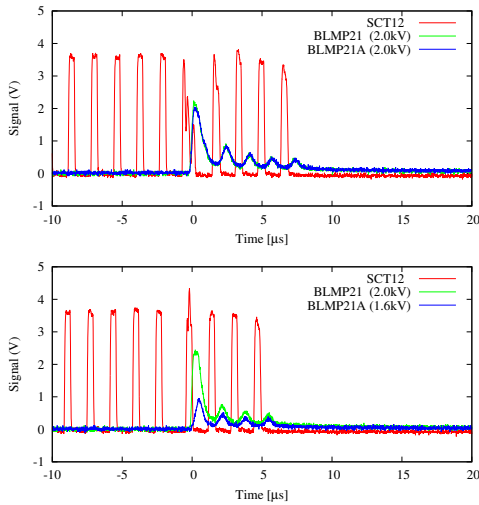


Figure 6: Signals from two BLMP21 and BLMP21A. SDTL06 RF was failed both case. Applied HV is different for BLMP21A.

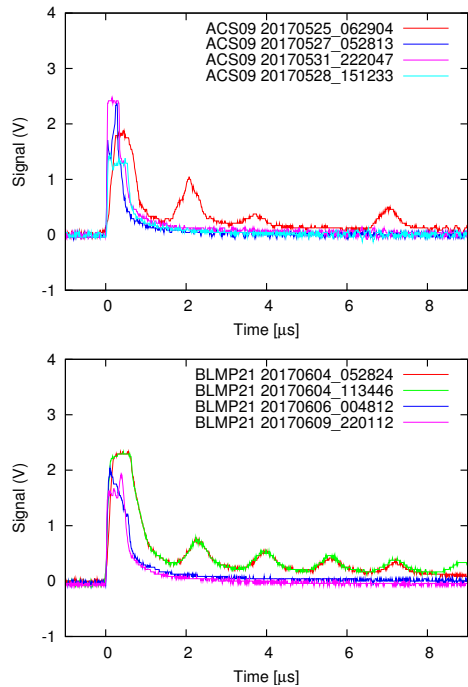


Figure 7: Rise time of BLMP at ACS09 cavity and L3BT:BLMP21 for several events.

3.2 積分アーカイブデータ

リニアックは、25 Hz のパルス運転であるが、2 秒毎にロスモニタ積分の最大値をディスクに保存している。ビーム損失量と信号強度の単純な関係はないが、大きなロスがあった時は、顕著に残る。Figure 8 に、通常運転時の典型例を示す。マクロパルス長の違い (NU 行きパルス $500 \mu\text{s}$ と MLF 行きパルス $225 \mu\text{s}$) により、特に、SDTL セクション (ACS セクションの一部でも) では、空洞からの X 線バックグラウンドの寄与が変わってくる。RF がオン状態の長さは、変わ

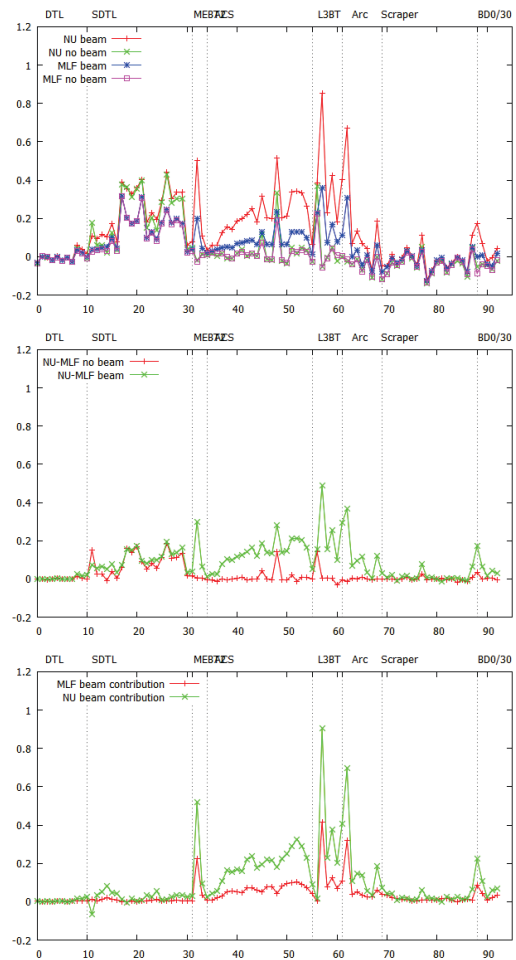


Figure 8: (Top) Typical “BLM display” plot for various pulse. (Middle) Difference between NU and MLF pulse mode. (Bottom) Beam contribution on BLMP signal.

らないが、ビーム行き先に依存したマクロパルス長、ひいては、積分開始タイミングが異なることに起因していると思われる。Figure 8 の 2 番目は、Beam on, Beam off 夫々で、NU, MLF の差をプロットしている。差がない所は、マクロパルス長に依存したバックグラウンドと考えられる。

ACS セクションでは、ビーム強度依存性 (NU 行きパルス 6×10^{13} ppp (particle per pulse) と MLF 行きパルス 1.3×10^{13} ppp の違い) も見られる。3 番目の図は、NU, MLF mode 夫々で、Beam on/off の差をプロットしており、これがビーム強度依存部分である。

各 BLMP 間で同期されていないため、運転モードが混在しているときは、これらの補正が必要である。Figure 9 は、MPS 発報時の各ロスモニタの値を通常ビーム運転時からの超過分を表示している。上の図は、SDTL02, ACS21 の RF MPS 発報分と、下の図は、SDTL09, ACS06 RF 発報分と BLMP21 が単独で発報した時のものをプロットしている。BLMP21 が単独で発報した時のものは、殆ど何の超過分も見られない。

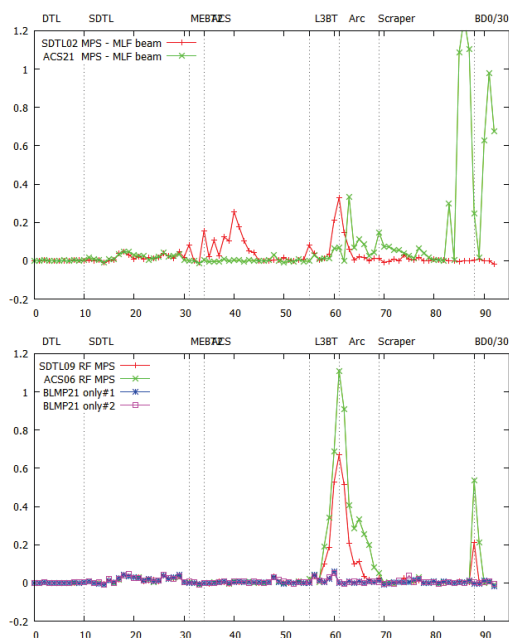


Figure 9: Numbers of only BLMP MPS in 2015 before and after summer shutdown.

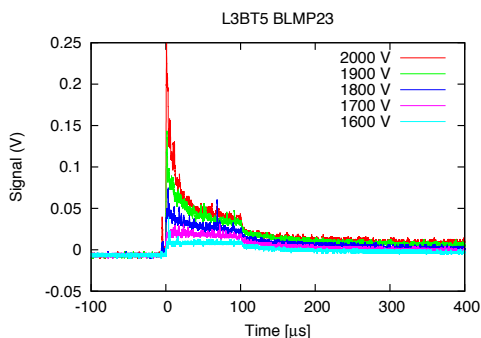


Figure 10: Rise time for every BLM for several events.

4. 今後の対策

前述のように、印加電圧 -2 kV では、信号が飽和している。ビーム調整中(マクロパルス $100\ \mu\text{s}$)で、定常的なロスがある場合に、順次、HV を下げていきその信号の大きさ形を見た (Fig. 10)。ロスは一定なはずだが、 -2 kV では、明らかに、先頭部での信号が大きく、後半で小さくなっている。 -1.6 kV でも、飽和特性は、皆無ではないが、かなり緩和されている。

一方で、HV を下げると、信号強度も下がってしまうので、プリアンプの入力インピーダンスを高くすることで、出力信号を大きくすることが考えられる。高インピーダンスにした場合の問題点は、時間分解能である。ただ、高インピーダンスで受けても、 $\sim\mu\text{s}$ オーダーの立上りは、確保できることが確認できた (Fig. 11)。これらの設定変更を一度にしなくても、逐次実施してゆくことが考えられる。まずは、90度アーク部より下流側、L3BT スクレーパー部と ACS セクションの部分を中心に実施する。L3BT 直線部、アーク部は、

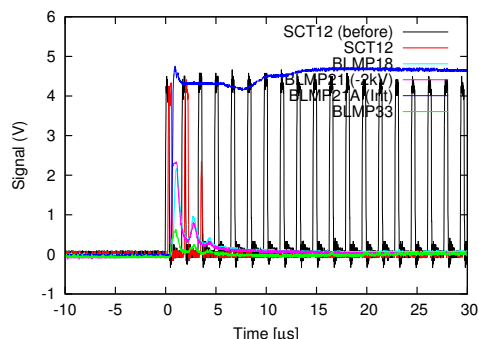


Figure 11: Rise time of BLMP21A with -1.6 kV and high-Z impedance at pre-amplifier.

一番最後に、数台ずつ様子を見ながら設定変更する、というやり方で対応可能であろう。

5. まとめ

J-PARC は、安定的な利用運転を行っているが、最近は、リニアック・ロスモニタ単台 1 台のみによるインターロックが増加している。この状況を詳しく調べるため、これまでの生波形データを中心にした分析に加えて、MPS ログの情報、積分アーカイブデータ、についても解析を実施した。RF MPS に付随するロスモニタ発報箇所は、直線部最後とアーク部前半に集中していることを確認した。また、単独発報イベントは、それよりも、広く分布していることが分かった。RF MPS に付随する場合は、積分アーカイブデータでも発報箇所を明示することができた。単独発報時には、明確な超過は確認できなかった。

MPS ユニットの発報条件の内、幅を広げることで発報回数を抑制することを確認した。BLMP の HV やプリアンプの入力インピーダンスを変えたパラメータでも試験を行い、良好な結果を得た。これに基づき秋以降の運転で設定変更を検討した。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan FSP002.
- [2] K. Hasegawa, “Progress and Operation Experiences of the J-PARC Linac”, Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2016-MOPLR054>.
- [3] S. Lee *et al.*, Proceedings of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, p.2667-2669 (2004).
- [4] A. Miura *et al.*, “Beam Monitors for the Commissioning of Energy Upgraded Linac” Proc. 2nd Int. Symp. Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. **8**, 011002 (2015); <http://dx.doi.org/10.7566/JSPC.8.011002>
- [5] N. Hayashi *et al.*, “BEAM-LOSS MONITORING SIGNALS OF INTERLOCKED EVENTS AT THE J-PARC LINAC” Proceedings of IBIC2016, Barcelona, Spain, p.368-371 (2016) TUPG21.