

J-PARC RCS のインターロック発報時のビームモニタデータ解析 BEAM MONITOR DATA ANALYSIS OF INTERLOCKED EVENTS AT J-PARC RCS

林直樹^{*A)}、吉本政弘^{A)}、守屋克洋^{A)}、畠山衆一郎^{B)}

Naoki Hayashi^{*A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Katsuhiko Moriya^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B)}

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

^{B)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

It is necessary to understand the reason why the accelerator has been interrupted due to beam loss or other machine mal function in order to keep high availability in long term period. At J-PARC RCS, 25 Hz rapid-cycling synchrotron, there is a system to record beam intensity and beam loss monitor signal for all pulses with 10 ms period. At this time, in addition, new system to archive data with better time resolution if interlocked events occurred has been introduced. Using these archived data, the events only RCS BLM gives MPS have been analyzed and it turns out that these events are related to the ion source discharge which makes very low intensity within less than a second. In this paper other typical events are presented and discuss how to improve the accelerator performance in future.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Research Complex) は、大強度の陽子ビームから生成される二次粒子を使って様々な実験、研究を行う複合加速器施設である。その速い繰返しのシンクロトロン RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) は、3 GeV の陽子ビームを物質生命科学実験施設 MLF (Material Life Science Experimental Facility) に、繰返し 25 Hz で供給している。また、ビームの一部は、後段のシンクロトロン MR (Main Ring) にも送られ、30 GeV まで加速された後、NU (ニュートリノ実験施設) や HD (ハドロン実験施設) で利用される。その周期は、2019 年時点では、NU 向けには、2.48 s、HD 向けには、5.20 s 毎に、4 pulse 分のビームが送られている。J-PARC は、ユーザー利用施設として、高い稼働率で、ユーザーにビームを供給することが求められており、このような期待に応えるためには、小さな事象であっても、ビーム停止の原因を特定し、対策を講じることが必要である。近年の高稼働率 (MLF 向け 95% 以上) の運転実績詳細については、別途施設報告を参照されたい [1]。

電磁石や加速空洞の故障、不調、電源の過電圧・過電流が原因でビームロスが発生し、加速器が停止する仕組みは、機器の不要な放射化を防ぐために、必要な機能である。これは、機器の不具合の信号はもちろん、ビームロスモニタ (Beam Loss Monitor; BLM) の信号が閾値を超えたときに、ビームを停止する機器保護システム (Machine Protection System; MPS) として、実現されている。MPS 事象を低減するためには、もちろん、機器の不調を個別に防ぐ必要があるが、そのような要因が明確になっている時に、ビームロス、軌道変動が、どのように発生し、ビームモニタで観測されるのか、予め理解・学習しておく必要がある。これが、後に単純でない複雑な事象を理解するために必要である。実際、多くの MPS 事象は、

機器の不具合によるものが多いが、一部には、機器の MPS を伴わない、BLM のみ発報する事象があり、本質的な原因追求が必要になる。Linac では、このような取り組みを先行して行っており、事象の解析がすすんでいる [2,3]。本論文では、RCS のデータアーカイブシステム、特に異常時のデータ保存システムについて説明し、そこで得られた事象のデータ解析結果について紹介する。

2. 運転データアーカイブシステム

J-PARC は、年間約 9 ヶ月の運転を行っているが、ユーティリティ、周囲環境を始め、ビームモニタの情報についても、少ない頻度 (例えば、Linac BLM では、2 秒毎にその間の最大値) で記録を残している。これら slow control のシステムは、長時間にわたり、比較的ゆっくり変化する現象には、有益な情報が得られるが、突発的なパルス単位で現れる事象理解には、全く不十分である。このため、間引きすることなく全パルスについて記録をしたり、特に異常時に高い時間分解能で事象を記録するシステムが求められる。

2.1 リフレクティブメモリによる記録システム

RCS では、運転開始当初より、インターロック等の発報に関わらず、全パルスの最小限の情報を残せる仕組みを構築し、運用してきた。RCS は、25 Hz の早い繰返しの加速器でかつ、duty 50% なので、一つのサイクル内 (40 ms) で、収集したデータを一時保存後、まとまった時間で一気に処理する、と言った手法を取れない。そこで、共有メモリ空間を複数機器で持つリフレクティブメモリを使ったシステムを構築した [4]。ただ、全パルス分を残す為に、記録する時間分解能は限定している。ビーム強度、ビームロスモニタ積分値については、20 ms のビームが出ている間に、10 ms 間隔で、パルス当たり 3 点、BPM については、1 ms 間隔で、パルス当たり 20 点収集している。それでも、異なる機器間で取得データの

* naoki.hayashi@j-parc.jp

時間同期が可能になるよう、ビームタグと呼んでいる時間情報が、ヘッダーに最初から組み込まれているのは、有用である。リフレクティブメモリを使ったデータ収集系や、それらのデータの解析については、[5,6]に詳しい。本システムは、さらに、改善、効率化され、欠くことのできない 25 Hz のデータ収集系として継続利用されている [7]。

2.2 Wave Endless Recorder

一方で、事象の詳しい解析を実施するには、十分な時間分解能が必要である。Linac と異なり、RCS では、周期 40 ms で、その半分強は、ビームが存在する高 duty のマシンである。これを時間遅れなしに運用するには、dead time を持たないか、非常に短いシステムである必要がある。Wave Endless Recorder (WER) は、1 台当たり 4 channel の 12 bit ADC を持ったデジタルタイザーで、10 MHz 又は、200 MHz でサンプリングできる。通常の波形表示以外に、指定したイベントが起きたときに、後に事後分析 (postmortem analysis) のために、波形保存する設定もできる。RCS の入射パルス電磁石 7 台) や出射キッカー電磁石 8 台で用いられている。また、ビーム診断系でも、4 つの信号、ビーム強度 (DCCT, SCT) とロスモニタ (出射部 PBLM33、出射部下流のアーク部 PBLM43 を監視し記録している。また、何時発報したのかを示す MPS のロジック信号、ビームが MLF 行きなのか MR 行きなのか、示すトリガ信号チャンネルも用意されている。個々の WER は、記録する時間長、スタート時間に差があるが、トリガーカウンタボードを介して、複数の WER のタグ情報を共有する仕組みがある。

2.3 Libera Hadron

Libera Hadron は、高速 ADC と FPGA で BPM (Beam Position Monitor; ビーム位置モニタ) の信号処理を行う [8]。BPM 1 台あたり 4 channel の 16 bit 250 MHz ADC、channel あたり 2 GB のメモリが用意されている。ビーム位置の計算は、平均位置もできるが、今は、turn-by-turn (bunch-by-bunch) で常時計算させ、インターロックにより、ビームが止まった時 (トリガも同時に止まるので)、最後のデータを保存するようにしている。この機器の持つ Postmortem mode では、最後だけでなく、その前の複数イベントを残せるが、バッファが溢れると、測定自体が止まってしまうので、使用していない。

2.4 粒子数カウンター

これは、通常のビーム診断系とは、独立に加速器の積算ビーム強度を担保するために用いられている。電流モニタは、リニアックの上流部にあるものを使い、パルス毎の積算ビーム強度、粒子数を完全に記録している。システムの仕様上、オンラインでデータの受信はできないが、RCS の DCCT、SCT と並んでパルス毎のビーム強度の時間変動の基準としても使われている。

3. INTERLOCK EVENTS

この章では、実際にインターロック発報時に記録された、ビームモニタ、電磁石等のデータを示し、再構成したイベントについていくつか紹介する。

3.1 キッカー電磁石

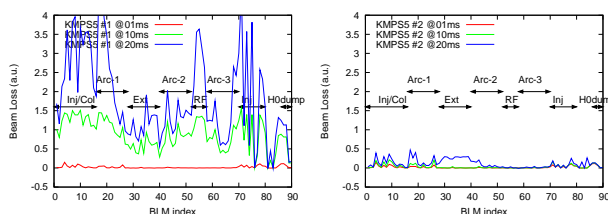


Figure 1: BLM pattern due to kicker magnet 05 MPS.

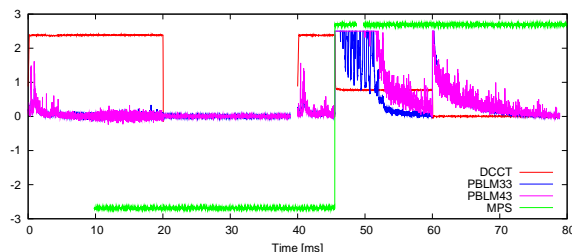


Figure 2: Beam intensity (DCCT) and BLM (BLM33; blue and BLM43; cyan) variation in time for two consecutive pulses. Kicker magnet 05 failure occurred around 45 ms (Fig. 1 Left). MPS status signal is indicated with green.

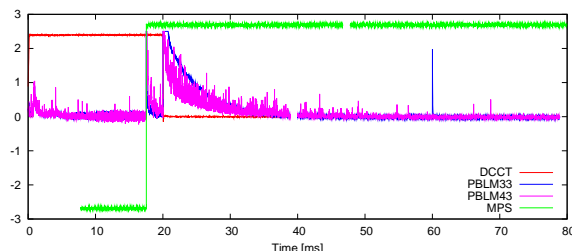


Figure 3: As same as Fig. 2. Kicker magnet 05 miss fired around 18 ms (Fig. 1 Right). BLM33 signal appears at 60 ms, which corresponds to next extraction timing. It is small intensity beam that is leaking from the Ion Source.

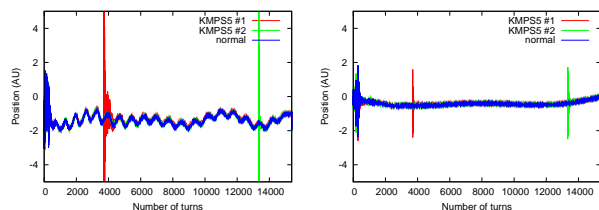


Figure 4: Turn-by-turn beam positions of MPS and normal events. Left is horizontal and right is vertical position.

キッカー 5 号機が MPS を発報した二つの事象について、全周に渡ってのビームロスパターン (Fig. 1) と 2 つの連続するパルスについての時間変動 (Fig. 2, 3) を示す。同じキッカー電磁石によるものでも発報タイミングによってロスの様子は、大きく異なる。Figure 2 の加速前半 (45 ms 付近) で大きなロスが発生し、ビーム強度モニタ (DCCT) でも明確な減少が見られる。BLM は、飽和して頭が切れた形になっている。次は、加速終盤 (Fig. 3, 18 ms 頃) に起きたもので、ビームロスは比較的小さい。また、今回の MPS 事象の次の出射のタイミングで、小さな PBLM33 信号が見られる。これは、わずかにイオン源から引き出され続けた非常に低い強度のビームがそのまま加速され、キッカー電磁石の不調により、ビームロスしていると考えられる。キッカーの MPS の発報タイミングが、ビームのない時であれば、当然、ビームロスは発生しない。また、DCCT などビーム強度モニタで判別できるほどのビーム強度低下は、5 ms くらいまでが多い。Figure 4 は、Fig. 2, 3 の時の turn-by-turn のビーム位置を Libera Hadron によって記録したものである。キッカー放電時に大きく軌道が変動しているのが分かるが、平均の軌道は、その後、通常と変わらない。

3.2 ロスモニタ単独 1

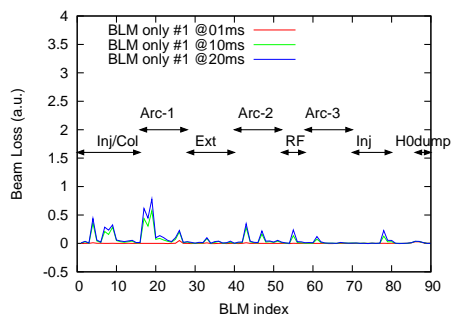


Figure 5: BLM pattern due to RCS BLM only MPS in case of ion source discharge.

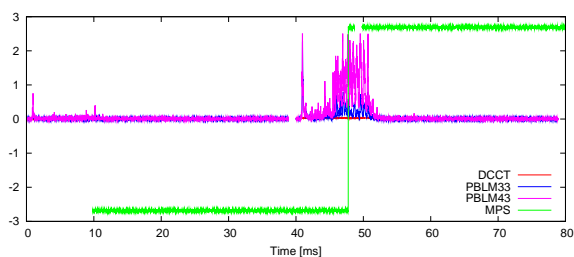


Figure 6: Interlock event due to RCS BLM only. Beam intensity is very low and it is due to ion source discharge.

時々発生する、RCS での BLM のみ発報する MPS 事象は、複数台のため、ビームロスは大きいように思われていたが、むしろ、ビーム強度が弱い際に、発生していることが分かった。Figure 5, 6 に、その典型的な例を示す。発報前のビーム強度は、ほぼゼ

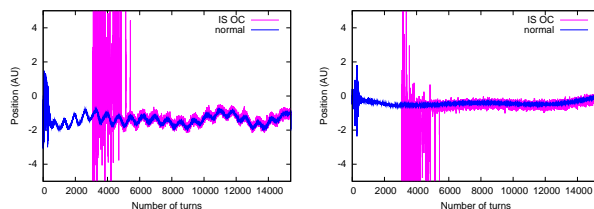


Figure 7: Turn-by-turn beam positions of Fig. 6 event.

ロ、発報時のビーム強度も非常に小さく、ビームロスも主に dispersion の大きなアーク部を中心に断続的に続いている。RCS では、強い空間電荷効果の抑制のため、縦・横方向ともペインティング、結果的に、位相空間上で平坦な粒子密度となるようなパラメータ設定をしている。ビーム強度が想定より大幅に小さくなると、却ってビームロスし易くなると思われる。Figure 7 は、その時の周回毎のビーム位置である。ビーム強度が低いため、前半では、バンチの同定ができていない。中盤から後半にかけてバンチ同定は出来ているが、測定バラつきは大きくなっている。

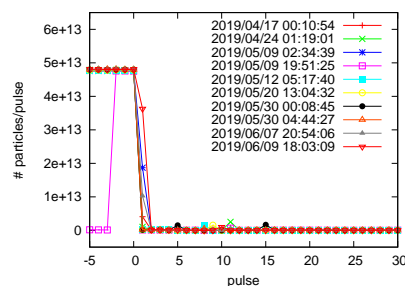


Figure 8: Beam intensity of each pulse during the ion source discharge events in case of RCS BLM MPS related to an ion source discharge.

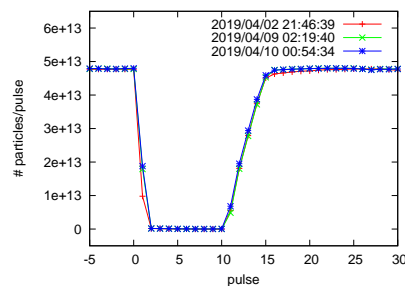


Figure 9: As same as Fig. 8 but no BLM MPS interruption.

このビーム強度の突然の低下要因は、イオン源の放電に関係していることが分かった。Figure 8 は、RCS BLM のみ MPS 事象の際の、ビーム強度の記録である。MPS 発報のタイミングは、強度ゼロが続いた後、僅かにビーム強度が回復し始めた時に起きていた。逆に、イオン源が放電しても、RCS BLM のみ MPS が起きない時もあり、そのビーム強度変化を示したのが、Fig. 9 である。典型的には、1 pulse (40 ms)

以内程度で、ビーム強度がほぼゼロまで下がり（この時を 0 pulse 目とし）、概ね約 10 pulse (0.4 s) 秒後から、5 pulse 程 (0.2 s) かけて元に戻る。以前は、多くあったが、リニアックでの MPS 等で、入射途中のビームが中断されると、RCS でも、結果的に、ビーム強度の低下になるため、RCS BLM の MPS も付随して発報するのが頻繁に観測された。

他にもイオン源の放電と連動して Linac の空洞や RFQ が落ちるなどの事例も確認している。想定していない低強度ビームが突然来た時、通常の feedforward をそのまま適用するのか、別のパラメータに変えるのか、このような事象への対応も、今後の課題である。

3.3 ロスモニタ単独 2

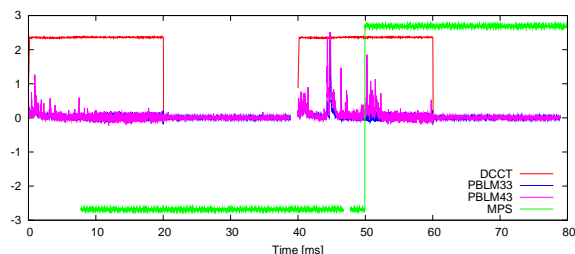


Figure 10: As same as Fig. 6 but not related to the ion source discharge. The cause of these events is under investigation.

頻度は、少なくなるが、イオン源放電とは無関係でも、RCS の BLM のみの MPS 発報事象も存在する (Fig. 10)。1 つ前のパルスを見ても、ビーム強度は、通常と変わらない。1 台~数台のアーク部の BLM が発報しているが、現時点で明確な要因は分かっていない。

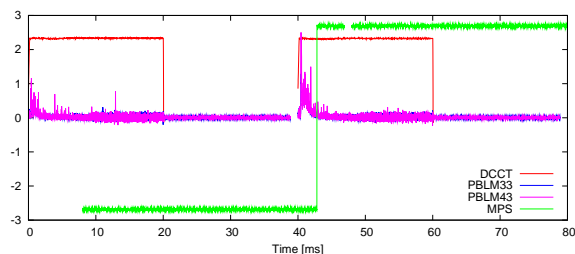


Figure 11: RCS BLM MPS event but it is known to related to main dipole magnet control program bug.

Figure 11 は、やはり RCS-BLM のみの発報事象であるが、偏向電磁石のプログラム変更に伴う、設定パラメータの突発的な変動と後に分かった。ビーム位置を見ると 1000 周目付近で、vertical 方向に振動が見られる (Fig. 12)。また、平均的な BPM 軌道を見ると、通常と異なることも分かる [7]。

3.4 その他の事象

Figure 13, 14 は、RCS の RF 電源 12 号機がトリップした事象である。DCCT が示すビーム強度が、15 ms

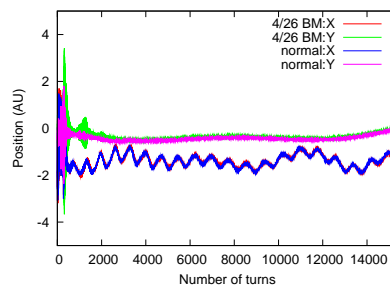


Figure 12: Turn-by-turn beam positions of Fig. 11 event.

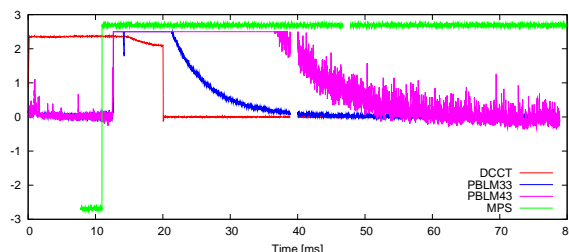


Figure 13: RCS RF MPS event. Large beam loss and intensity drop is shown.

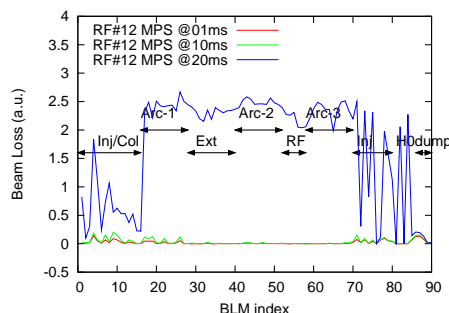


Figure 14: BLM pattern due to RCS RF MPS event (Fig. 13).

から下がる前に、巨大なビームロスが発生している。また、ロスモニタのテールは、ビームが止まった次のパルスでも尾を引いている。

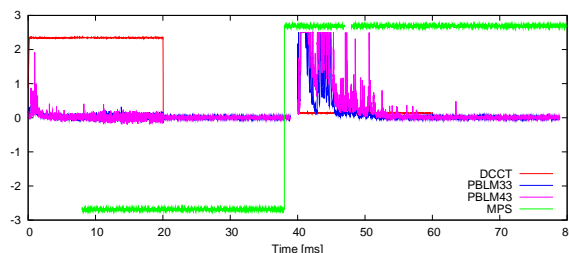


Figure 15: The last accelerating cavity ACS21 MPS event. It gives beam loss around injection and the first half of accelerating period. Small DCCT signal is visible.

Figure 15 は、Linac 最終段の空洞 ACS21 がトリップした事象である。入射時のビームロスと周回になってもビームロスが続いている。リニアックのビーム

をみると、入射マクロパルス長は、通常 $270 \mu\text{s}$ の所、MPS 発報のため、 $27 \mu\text{s}$ 程しかなく、僅かなビームしか入射していないが、DCCT が示すように、10% 程のビームは普通に周回している。

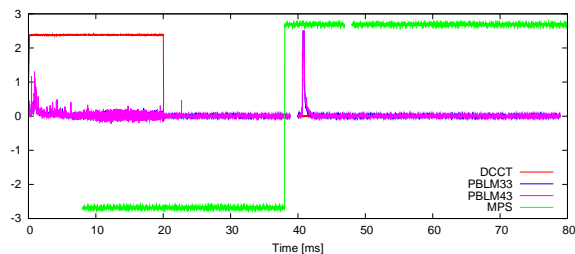


Figure 16: Klystron-12 which drives ACS21 gives MPS signal. Fast loss is concentrated in the injection period.

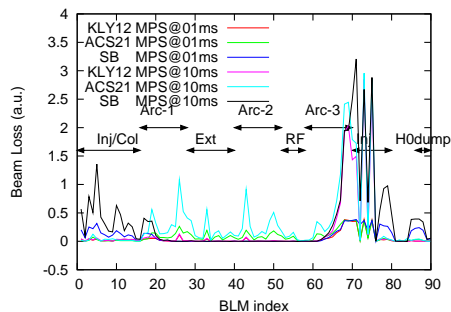


Figure 17: Comparison of BLM pattern for various MPS.

Figure 16 は、リニアック最終段のクライストロン電源 12 号機の MPS 事象である。Linac 内でのエネルギーが定格の 400 MeV を下回ると、Linac から RCS へのビーム輸送ラインのアーカ部を通過できないので、RCS には到達しない。しかし、12 号機は ACS21 空洞をドライブしているので、前と同様、RCS に到達してからビームロスを生じている。これら、リニアック最終段の MPS 事象 (Fig. 15, 16) の他、RCS の入射パルス電磁石 (Shift Bump 電磁石; SB) の不具合でも、入射部に集中的なビームロスが起きる。しかし、Fig. 17 に示すように、入射部以外にどれだけビームロスが起きるか、原因によって様子は異なってくる。

4. 今後の課題

今回、WER で保存したデータを中心に紹介した。ただ、時々、MPS イベントを誤認したり、更には、取り逃したりしている場合が散見される。個々の WER のタイミングを最適化、確認すると共に、信頼度の高いシステムとするため、原因を追究する必要がある。特に、入射部周辺の BLM が足りず、ビームロスが入射部のみに集中する場合、事象理解の為の情報不足が不足した。また、大きなビームロスに対して、信号が飽和することが多かった。通常監視との兼ね合いも必要だが、対応を検討したい。今回紹介した Libera Hadron で、turn-by-turn のビーム位置監視に使ってい

る BPM は、dispersion が小さい場所にある。ビームロスの状況によっては、dispersion が大きなところの方が影響が現れやすいので、その監視も行いたい。今回は、MLF のみの運転が長く、MR との同時運転での課題など、引き続き注意して観察を継続する。

ビームタグを持つデータは、複数機器間で確実なデータ同期を行うのに非常に有用である。ただ、リフレクティブメモリのみに頼ったシステムでは、今後の機器の供給、継続性に課題が残る。そこで、タイミングシステムの更新に伴い、ビームタグをより使いやすくする仕組み [9] を前提にしたデータ収集系を検討中である。現在は、異なるシステムで別々にデータを照らし合わせてみているが、もっと、広域的に、ビームモニタで管轄しているもの以外も、定型化し、容易に照会、相関を確認できるようになるともっと見通しがよくなる。

容易ではないが、さらには、ビームロスがビームを止める必要のないイベントでも、色々な変動を予兆診断として活用できるのが望ましい。

5. まとめ

RCS のインターロック発報時の事象解析に必要な機器の整備を進め、それらの事象解析を行った。同じキッカー電磁石の放電でも、そのタイミングによりロスの様子が異なることを複数のモニタの時間情報を示し、明確に示した。RCS BLM のみ発報のイベントの殆どは、最上流、イオン源の放電による 1 秒未満のビームの消失に関連するものであった。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “J-PARC 加速器の現状”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan FSPI001.
- [2] N. Hayashi *et al.*, “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”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan pp.540-544, TUP077.
- [3] 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.
- [4] H. Takahashi *et al.*, Proceedings of EPAC 2008, p.1553-1555., Genova, Italy (2008).
- [5] N. Hayashi *et al.*, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, June 12-17, 2014, 3800-3802 (2014).
- [6] N. Hayashi *et al.*, Proceedings of IBIC2015, Melbourne, Australia, September 13-17, 2015, 381-385 (2015).
- [7] S. Hatakeyama *et al.*, “The fast measurement of the monitors data with the beam synchronized tag in J-PARC” THPI025, in this proceedings.
- [8] Libera Hadron, user manual, Instrumentation Technologies.
- [9] F. Tamura *et al.*, “J-PARC 次世代 タイミングシステム”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan THO108.