

J-PARC Linac/RCS における機器インターロック発報イベントの解析 ANALYSIS OF MACHINE PROTECTION SYSTEM EVENTS IN THE J-PARC LINAC/RCS

林直樹 *^{A)}, 畠山衆一郎 ^{A)}, 福田真平 ^{B)}

Naoki Hayashi*^{A)}, Shuichiro Hatakeyama^{A)}, Shinpei Fukuta^{B)}

^{A)}Accelerator Division, J-PARC Center, JAEA, ^{B)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

In order to achieve a high availability in a user facility accelerator complex, it is necessary to understand in detail not only the simple failure cause of the magnet or the acceleration cavity power supply, but also complex interlocked events. At J-PARC, not only the primary interlock information but also the data recorded by the beam diagnostic system before the interlocked event is used to carefully reconstruct the event and clarify the cause more accurately. This time, we proceeded with the analysis based on more detailed waveform of the RCS Beam Loss Monitor and the events during simultaneous operation of MLF and MR. We present various events of the beam destination switching problem, the influence of the ion source discharged, and the events related to the RCS extraction kicker.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、Linac, RCS (Rapid-Cycling Synchrotron), MR (Main Ring) の3つの加速器がつくる大強度陽子ビームにより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 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 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、2021 年時点では、NU 向けには、2.48 s、HD 向けには、5.20 s 毎に、4 パルス分のビームが送られている。

電磁石や加速空洞の不調、電源の不具合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、機器のインターロック信号はもちろん、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。ユーザー利用の加速器においては、ビーム強度の増強はもちろん、安定的で高い稼働率が求められる。これを実現するためには、電磁石や加速空洞電源単独のインターロック以外に、複合的な発報事象についても詳しく理解する必要がある。J-PARC では、単に1次的なインターロック情報だけでなく、ビーム診断系で記録された発報事象以前を含むデータにより、丁寧な事象再構成を行い、原因をより的確に、明らかにする取り組みを行っている [1-4]。

今回新たに RCS ロスモニタのより詳しい波形情報、MLF と MR の同時運転時の状況などを踏まえた解析を進めた。同時運転時の特有のビーム行き先切

り替え時の問題、イオン源放電時の影響、RCS 出射キッカーに係る事象等を紹介する。

2. インターロックイベントの例

2.1 MR unrequested beam

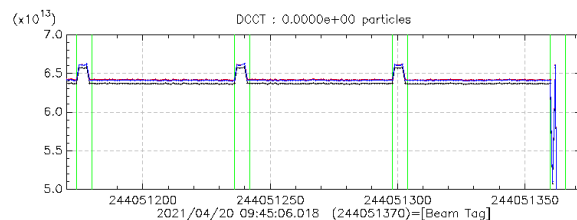


Figure 1: Beam intensity plot (pulse-by-pulse) based on RCS intensity monitor (DCCT).

Figure 1 は、このイベントを含む直近のパルス毎のビーム強度推移である。この時、MLF 行きは、700 kW、 6.41×10^{13} ppp (protons per pulse)、MR を経由した NU 行きビームは、500 kW、 6.61×10^{13} ppp で運転していた。MR 周期の、2.48 s、62 パルス毎に、緑線で区切っている 4 パルス (K1, K2, K3 及び K4 と呼称) 分の強度が少し高いことが分かる。図の最後は、K1 だけ 5.10×10^{13} ppp と低く、K2 は、通常のビーム強度に戻っている。

MR では、DCCT でビーム強度を測定し、期待されるビーム強度と異なると、MR のみ入射を停止する (MR inhibit)。但し、その手続きが間に合わない場合、Linac, RCS で beam abort する仕組みがないため、MR へ入射されてしまう。この際は、「ビーム入射を停止中に、想定外のビームがきた」と判断し、MLF も含めた全ビームの停止を行う。これが、MR unrequested beam と呼称する MPS である。

現状、MR inhibit では、詳細なデータは残らなが、MPS 発報では残る。その時の Linac での波形を Fig. 2 及び、RCS の入射時の様子を Fig. 3 に示す。留意す

* naoki.hayashi@j-parc.jp

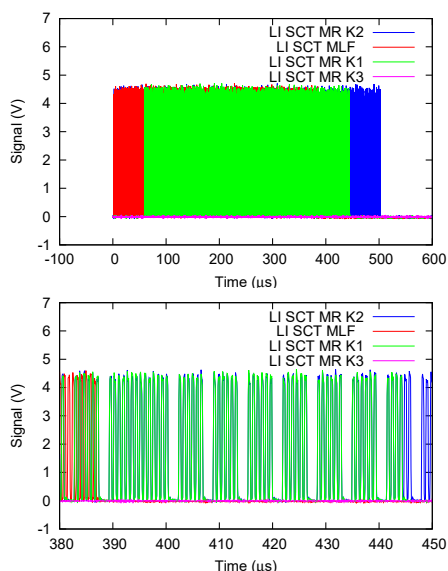


Figure 2: Linac beam current monitor plot. The macro pulse length of NU mode is $500 \mu s$ (blue). That of MLF 700 kW operation is $385 \mu s$ (red). MR K1 (green) is abnormal pattern. The lower figure is zoom of the upper figure.

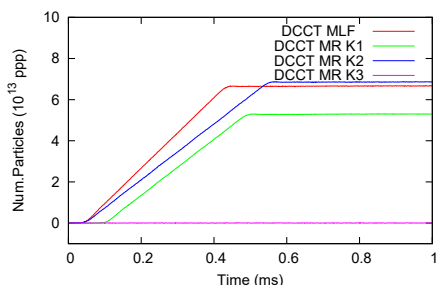


Figure 3: The RCS beam intensity during injection period. MLF and MR K2 mode are normal cases, MR K1 mode is abnormal case.

べき点は、この際、Linac, RCS で、ビームロスなどは起きていない、という点である。設定とは、少し異なる RCS への入射時間（マクロパルス長）となり、ビーム強度は変わっているが、加速自体は、正常に行われていた。今回、MR 用の K1, K2 は、RCS でのビーム強度の増加率、傾きは同じだが、MLF 用よりは、緩やかである (Fig. 3)。Linac 上流では、Chopper により、RCS の RF バケツに合わせた中間パルスを形成しているが、この中間パルスの間引きパラメータもマクロパルス長と共に、ビーム強度の微調整に使われている。通常、MLF 用は、 $385 \mu s$ 、MR 用は、 $500 \mu s$ のマクロパルス長である。ただ、異常であった MR K1 用は、マクロパルス長は、MLF 用と同じだが、スタートが遅れて始まっていた。ビーム行き先毎に、加速のタイミングやパルス長等のパラメータで、ビーム強度を変えるのがタイミングシステムで、各機器にタイプと呼ぶ信号を送っている [5]。今回の発端は、MLF から MR への切替時に、最上流の一部の機器に送るタイプ信号が非同期となること

で、上記の問題が起きていることがわかった。

2.2 MR から MLF への切り替わり時の場合

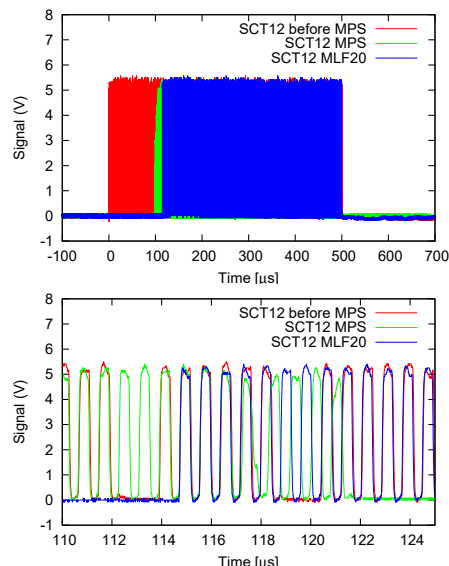


Figure 4: Linac current monitor plot. MLF20 (blue) is normal MLF pattern. Before MPS (red) is normal MR pattern. MPS (green) is the interlocked event and its pattern is disturbed around $118 \mu s$.

タイミングのタイプ信号の伝送不具合は、逆のパターンでも起きていた。MR K4 の次の、MLF パルスが通常と異なり、 $17 \mu s$ 程、早く始まっている。拡大図を詳しく見ると、最後は、パルス形状が乱れて、Linac RF のインターロック、ビームロスにつながっていることがわかった (Fig. 4)。数日間の加速器停止後、再立ち上げの際に、タイミングシステムのリセット等を実施し、問題は解消している。

2.3 Chopper 動作不良

先に述べたように、Chopper は、RCS 入射時に、RF バケツに合わせて、ビームを楕形状に整形する。この動作が不完全だった例も見つかった。Figure 5 に、通常時と比較した異常時のマクロパルスの様子を示す。異常時は、RF バケツに補足できる中間パルスの間に、chop が不十分で、ビームが残っている。また、本来のマクロパルスの前にも同程度のビームが残り、最後は、中間パルス自体も透過率が下がっている。更に、最後の中間パルス 4 つ分は、RCS への入射粒子数が予め定めた閾値を超えたため、ビームが停止した。Linac でのビームロスではなく、RCS のビームロスモニタは、入射粒子数の MPS に遅れて発報した。

2.4 イオン源放電イベント

ここでは、RCS 全周にあるビームロスモニタの波形データを使ったビームロス分布を示す。Figure 6, 7 は、横軸が RCS の周長に沿ったロスモニタの番号で、縦軸は、0 から 20 ms 超までの時間である。どちらもイオン源放電時のイベントで、前者は、RCS の

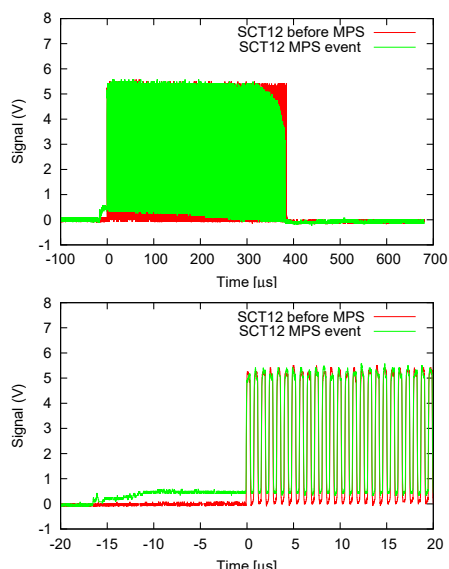


Figure 5: Linac current monitor plot. Before (red) and the chopper failure event (green).

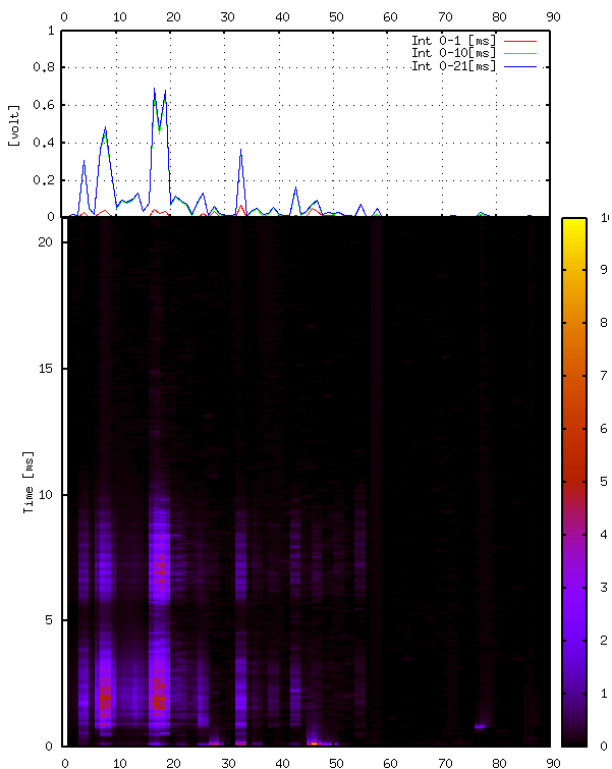


Figure 6: Beam loss distribution due to the ion source discharge. The event triggered RCS BLM MPS.

ロスモニタ MPS により停止したもので、0 ~ 10 ms の間にアーク部の幾つかでロスが確認される。後者は、ロスモニタによる停止はなかったが、MR で、ビーム強度低下を感知し、MR inhibit を経由して、MR unrequested beam の MPS が発報したものである。イオン源放電により、ビーム強度は、一旦ゼロになるが、約 0.5 s 程で回復する。その際に、毎回必ず RCS

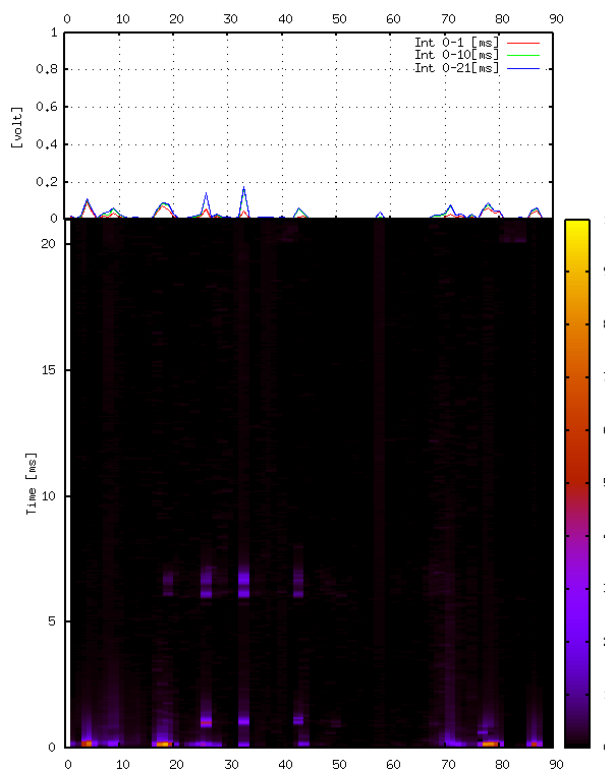


Figure 7: Beam loss distribution at the right after the ion source discharge. This event did not trigger RCS BLM MPS, but interrupted due to MR unrequested beam MPS.

ロスモニタが MPS 発報するわけではない [4]。イオン源放電事象を抽出し、RCS ロスモニタとの関係を見ると、再開時にある程度のビーム強度があれば、MPS を発報するほどのロスにはつながらない傾向がみられた。この値は、 2×10^{12} ppp 程度であったが、この前後でも、ロスが多い場合も、少ない場合もあり、確定的なものではなかった。引き続き、現象の調査が必要である。

現状の仕組みでは、最終的に MPS に至ったイベントは、詳細記録を残せるが、そうでない場合、MR inhibit のみの時などは、従来からアーカイブしている 10 ms 毎の値しか利用できない。さらに、元々、ビーム強度が低いと、記録された信号も小さく、算出するビーム位置等の誤差も増える。これらは、今後のデジタイザ課題の一つと考えている。

2.5 Kicker 関連イベント

RCS の出射キッカー電磁石は、8 台から構成されており、1 台につき 2 つの PFL (Pulse Forming Line) 回路が組み込まれている [6]。Figure 8 は、キッカー電源 5 号機の MPS 発報時のビームロス分布の一例である。加速途中で電源の MPS が、発報した。ビームロスモニタ出力は、とても大きいですが、ビーム強度モニタ DCCT の減少は、限定的であった。他でも、DCCT の減少がほとんどみられない例もあった。

一方で、Fig. 9 に示すイベントには、キッカー電源の MPS は、含まれず、20 ms 以降、出射部周辺のビー

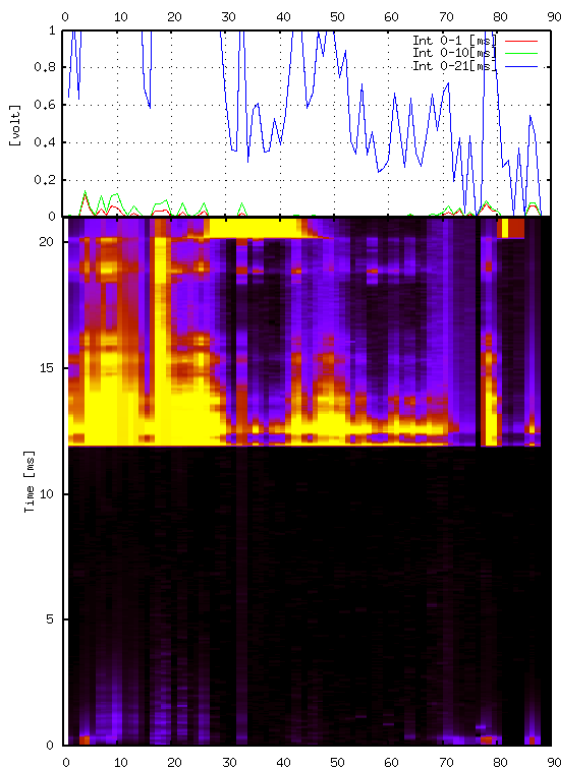


Figure 8: Kicker magnet failed around 12 ms and related large beam loss is shown.

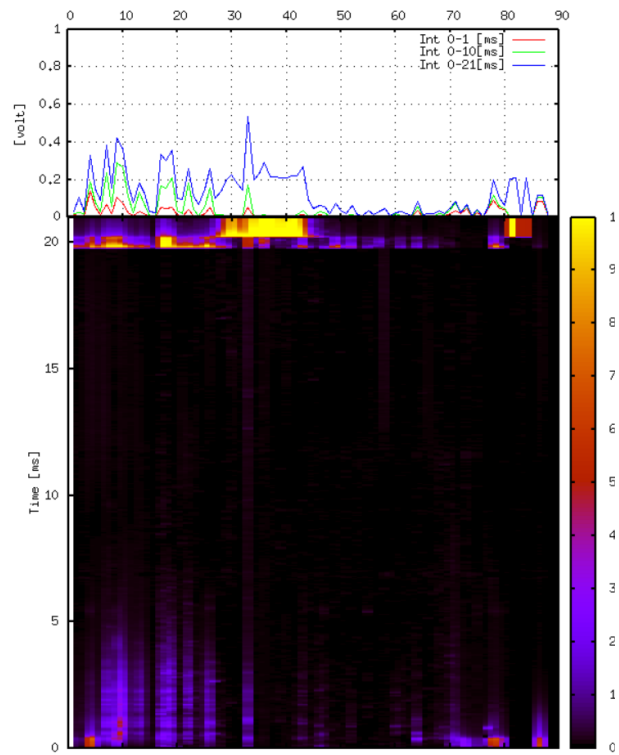


Figure 9: Beam loss occurred after beam extraction. One of kicker magnet was not fired without interlock.

ムロスにより MPS を発報している。キッカー電源の出力波形のモニタリング出力を確認したところ、16 回路中、1 回路の出力が途切れていることが分かった。この回路は、事象後も正常にパルス出力運転を継続していたので、異常を検知しなかったと思われる。同様の現象は、何度か確認されているので、電源側のより詳しい情報取得の検討が求められる。

3. まとめ

J-PARC は、2021 年度前半も高い稼働率で運転した。更なる向上のためには、インターロッカー一つのイベントの詳細な原因を調べる必要がある。今回は、MLF/MR 同時運転中のインターロックイベントについて調べ、タイミングシステムのタイプ信号伝送に問題があることが分かった。RCS BLM のみ発報のイベントの殆どは、イオン源の放電に関連するものだが、復元時のビーム強度依存性は認められた。より詳しいメカニズムについては、引き続き検討が必要である。現在は、MPS 発報に伴い、詳細なデータを残している。しかし、MR inhibit や、そうでないケースでも、調査に必要なデータがある。MPS のみに限定せず、詳細な記録を残す仕組みも検討が求められる。

これまでは、加速器内のビームモニタのデータに特化しているが、キッカー電磁石や高周波加速空洞のデータ、出射後のビームトランスポートラインのビームモニタデータなど、他グループとも連携してデータを共有し、活用が求められる。その際に、複数

機器の同期を確実、かつ容易にするため、タグ情報、時間情報を付与するのが必要とされる。また、興味あるデータの可視化などの自動処理も特異イベントの抽出を効果的に行うために対応したい。

参考文献

- [1] 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.
- [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.*, “ANALYSIS OF INTERLOCKED EVENTS BASED ON BEAM INSTRUMENTATION DATA AT J-PARC LINAC AND RCS”, Proceedings of IBIC2018, Shanghai, China, p.219-223 (2018) TUPA04.
- [4] N. Hayashi *et al.*, “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”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan pp.1096-1100, FRP1031.
- [5] 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 pp.149-152, THO108.
- [6] J. Kamiya *et al.*, “Performance of extraction kicker magnet in a rapid cycling synchrotron”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 072401 (2009).