

トリガ付き加速器スケーラモジュールによる MPS 発報の可視化

VISUALIZATION OF MPS ALARMS USING TRIGGERED SCALER MODULE

田島 佑斗^{#, A)}, 上窪田 紀彦^{B)}, 楊 敏^{B)}

Yuto Tajima^{#, A)}, Norihiko Kamikubota^{B)}, Min Yang^{B)}

^{A)} Kanto Information Service (KIS)

^{B)} J-PARC Center, KEK/JAEA

Abstract

A PLC-type "triggered accelerator scaler" module was developed at J-PARC. It is designed to read back timing signals delivered by J-PARC timing system, and is expected to detect unexpected trigger failures, like a miss trigger. On the other hand, the MPS (Machine Protection System) system is used to stop accelerator operation immediately when a failure at an accelerator device (a magnet power supply, an RF system, beam loss over threshold, and others) occurs. In J-PARC Main Ring, it is important to know which phase (injection, acceleration, slow extraction, and else) an MPS event occurred in an accelerator cycle (1.36s or 4.24s). While it has been difficult to know it for an accelerator operator. Using the triggered accelerator scaler module, we have developed a system to visualize the MPS phase. The system has been demonstrated in the beam runs in spring, 2024. With this system, we expect an operator to identify the cause of an MPS event quickly, hence the recovery time due to an MPS event would be shorter.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、大強度陽子ビームを用いる研究施設で、茨城県東海村にある。J-PARC は3つの加速器から成るが、それらは 400-MeV Linac (LI)、3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、および 30-GeV slow cycling Main Ring Synchrotron (MR)、である [1, 2]。2006 年に LI で最初の陽子ビーム加速が始まり、その後時間をかけて各加速器の性能(ビーム出力)を向上させてきた。J-PARC MR のビーム出力の初期設計は 750 kW であるが、2023 年 4 月に 1 shot で 753 kW のビーム加速を達成[3]、2024 年 6 月には Neutrino 実験施設へ 800 kW の安定ビーム供給が実現した[4]。

加速器の運転を支える技術の一つに、MPS (Machine Protection System)がある。MPS は、ビーム供給中に何らかの機器に異常が生じた時、迅速に(<10-100 μ s) 加速器を安全に停止するシステムである。J-PARC MR でも MPS が整備されている[5]。ビーム供給運転中の MPS 発報は、おおむね数回/1 日で、ほとんどは発生原因が理解されていて、復旧マニュアルで対処する。しかし原因が判明しない MPS 発報では、すぐにはビーム運転を再開しない。深夜でもコミッショニングチームに連絡して原因を調査、ビーム運転を再開してもリスクが無いか検討する。MR 加速器は slow cycle synchrotron で、数秒単位 (FX-mode 1.36 s, SX-mode 4.24 s) で加速を繰り返している (Fig. 1)。MPS 発報時、MR 加速器サイクル内のどこで MPS が発報したか(入射(INJ)、加速(ACC)、遅い取出し(SX)、その他)の情報は、原因を追究する際の重要な基礎情報である。

J-PARC 加速器は EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) toolkit をベースとした制御システムで開発・運用されている[6]。MR 加速器サイクル開

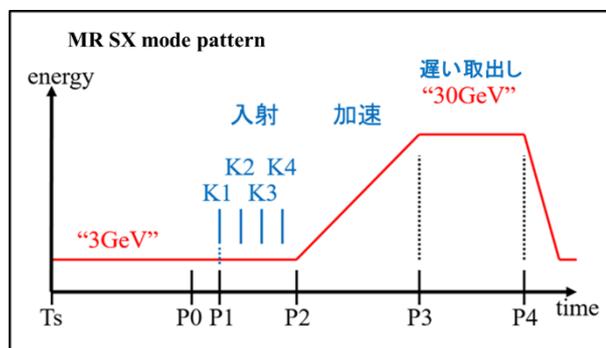


Figure 1: Machine cycle pattern of J-PARC MR.

始の時刻と MPS 発報時刻は、EPICS で監視・記録されている。それらの時刻情報を収集・確認して発報が加速器サイクル内のどこかを計算するのは経験が必要で、運転員やシフトメンバには難しい。EPICS 枠内での自動計算はややこしい(可能なはずではある)。

ところで、PLC 型トリガ付き加速器スケーラモジュールは、タイミングシステムが配信する各種信号の異常、例えば稀に発生する(かもしれない)トリガ抜けを現場で確認するモジュールである[7-9]。このモジュールを使用して MPS 発報信号を直接測って GUI に表示すれば、MPS 発報の時間情報を簡単に可視化できるはずである。

本稿は、加速器スケーラによる MPS 発報の時間情報の可視化の試みの報告である。

2. MPS 信号可視化システムの開発

2.1 トリガ付き加速器スケーラについて

J-PARC タイミングシステムは、あらゆる加速器機器に delayed trigger 信号を配信している。しかし、MR では trigger 生成装置と機器の間が数 10 m ある場合があり、機器側に届くべき信号がノイズを受けたり、稀に抜けたり

[#] z-tajima@conf.bunken.co.jp

する事象があった。トリガ付き加速器スケーラモジュールは、J-PARC タイミングシステムに対する read back 用に開発された。このモジュールは、配信された delayed trigger 信号を現場で確認し、異常をすぐに検知できる。

トリガ付き加速器スケーラは、J-PARC MR で標準 I/O となっている PLC 型モジュールである。J-PARC タイミングシステムが配信する S signal (加速器サイクル開始の信号)と Trigger clock (25 Hz 基準信号)を基に、入力した pulse 信号(最大 4 ch)を計測する(Fig. 2)。

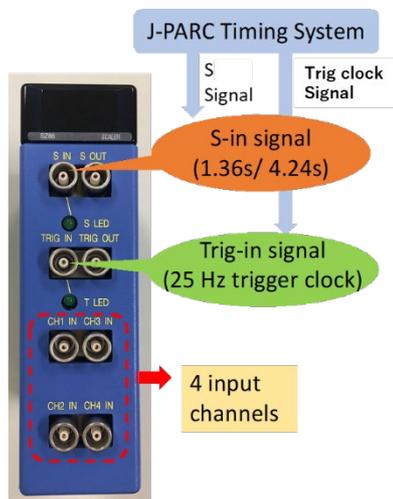


Figure 2: Front view of triggered scaler module.

Figure 3 に、トリガ付き加速器スケーラの動作原理を示す。基本動作はスケーラで、ch 1-ch 4 に入力される pulse をカウントし、memory に書き込む。計数は S signal で始まるが、Trigger clock (25 Hz) のたびに memory へのポインタがシフトし、次の S signal でポインタは元に戻る。加速器サイクルが 1.36 s の場合、memory は 34 個の配列として使用される。なお、memory は各 ch で 2 系統のダブルバッファとして実装され、取りこぼしを無くしている。また、memory サイズは 192 で、標準設定では S signal から 7.28 s の間の信号を計測可能である。FPGA の役割や内部トリガの詳細は [7]を参照されたい。

MR 加速器の機器は 1 回の加速器サイクルに 1 度だけ delayed trigger が来るが、その信号を計測すれば、配列のどれか 1 つが 1 になる。Figure 3 の memory は、その例を示している。

トリガ付き加速器スケーラモジュールは、J-PARC MR のタイミング信号の監視などで利用されている。例えば、MR 周回信号(LLRF 信号)や入射キッカー信号(K1-K4 信号)の監視が、[9, 10]に紹介されている。また、MR 主電源向けの delayed trigger 信号の監視システムが、[11]に紹介されている。

2.2 MPS 可視化システムの開発

MPS 可視化システムは、PLC-CPU(F3RP71-2L)、トリガ付き加速器スケーラ、PLC 電源、から構成される(Fig. 4)。CPU で Linux および EPICS が稼働し、このシステム単独で stand-alone な EPICS IOC (Input/Output Controller)である。

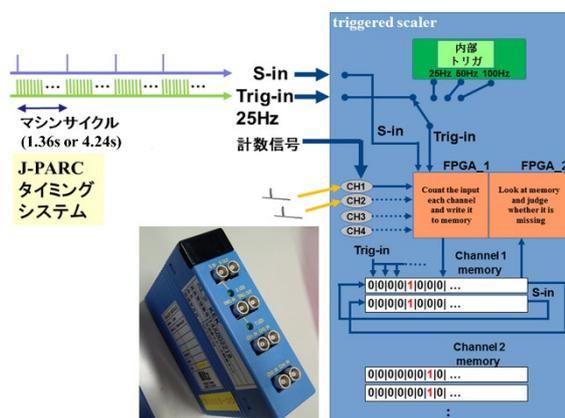


Figure 3: Overview of triggered scaler module.

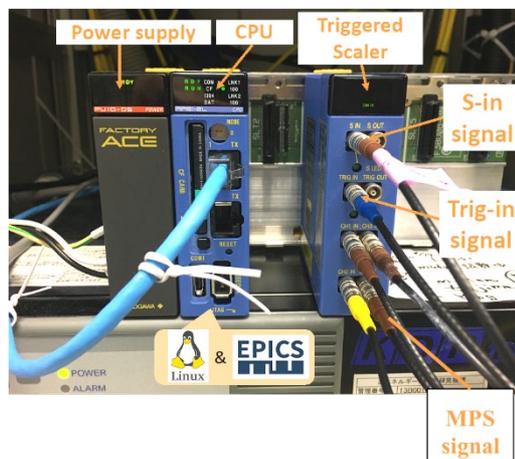


Figure 4: Visualization system of MPS alarms with triggered accelerator scaler module.

トリガ付き加速器スケーラモジュールには、J-PARC タイミングシステムから S signal と Trigger clock が供給され、また MPS 発報信号が ch 4 に入力されている。

2.3 GUI の開発

MPS 発報情報を、トリガ付き加速器スケーラモジュールで検知した時間情報とともに表示する GUI を、EPICS 標準ツール edm で開発した(Fig. 5)。GUI に表示される情報を以下の①～⑧に示す。

- ①現在の加速器運転情報
Run No、Shot No、年月日時
- ②MPS 発報時の情報
発報年月日時、発報時の Run No、発報時の Shot No、その shot の加速器サイクル開始日時
- ③入射キッカー信号の何番目で発報したかを表示
- ④加速器サイクル(この画像では 4.24 s 周期)のどこで発報したか、加速器スケーラの取得情報を表示
- ⑤加速器スケーラの情報から発報判定結果を表示
- ⑥MPS システムから、MPS の種類を表示
- ⑦MPS 発報時の DCCT 波形
- ⑧加速器サイクル開始から MPS 発生までの時間を表示(ms 単位)

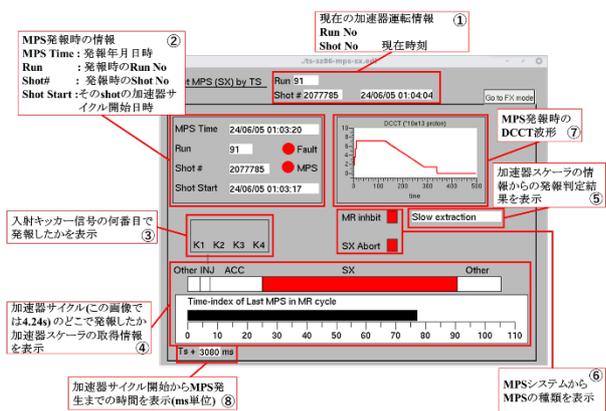


Figure 5: Details of MPS visualization screen.

3. 可視化システムの試験運用

3.1 試験運用について

開発した MPS 可視化システムを、J-PARC MR 加速器のビーム運転期間に試験した。期間を Table 1 に示す。

Table 1: Periods of System Test with MR Beams

SX mode [1.36 s] (Beam to Hadron)	4/11-5/05, 5/21-24, 5/30-6/04, 2024
FX mode [4.24 s] (Beam to Neutrino)	6/06-25, 2024

3.2 典型的 MPS イベントの紹介

約 2 か月間の運用で、実際に発生する MPS イベントでシステム改善を施しつつ、FXとSXの2種の運転modeで経験を積んだ。検知した様々な MPS イベントの中から、以下に典型的な 3 つを紹介する。

3.2.1 FX mode の入射中(INJ)の MPS

Figure 6 に示すのは、FXmode の運転中、INJ(入射中)に発生した MPS である。原因は、3-50BT BLM (Beam loss monitor) である。

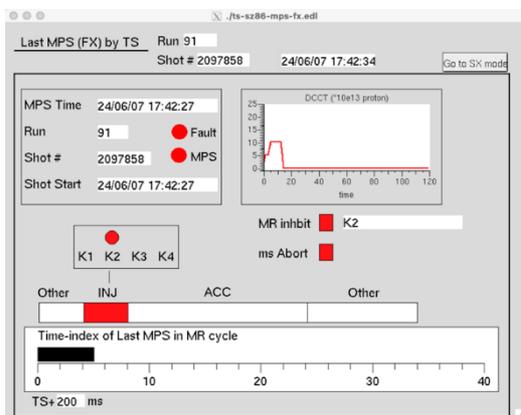


Figure 6: MPS event of FX mode during INJ phase.

4 回ある入射のうち 2 回目の入射(INJ/K2)で発報したことを、本システムが捉えて可視化している。ビームは入射終了後に Abort(廃棄)されたため、DCCT 波形は途切れる形になっている。

3.2.2 FX mode の加速中(ACC)の MPS

Figure 7 に示すのは、FX mode の運転中、ACC(加速中)に発生した MPS である。原因は、Neutrino Online Monitor である。本システムでは、加速の途中で MPS が発生したことが確認できる。

この MPS は、本システムが提供する情報だけでは理解が難しい。Neutrino Online Monitor の MPS の判定には 1 秒弱かかり、発報した時は次の加速器サイクル(の ACC)に入っているからである。

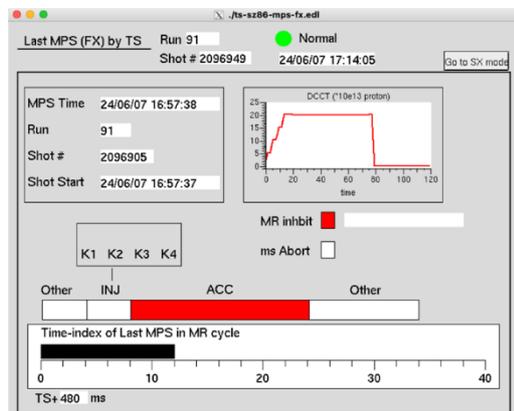


Figure 7: MPS event of FX mode during ACC phase.

3.2.3 SX mode の遅い取出し中(SX)の MPS

Figure 8 に示すのは、SX mode の運転中、SX(遅い取出し中)に発生した MPS である。原因は、BLM (Beam loss monitor) である。

本システムでは、遅い取出し中の後半に MPS が発生したことが確認できる。この場合、MR 加速器は Hadron Facility へのビーム取出しを停止し、残ったビームは Abort される。DCCT 波形は、MR 加速器の振る舞いを反映している。

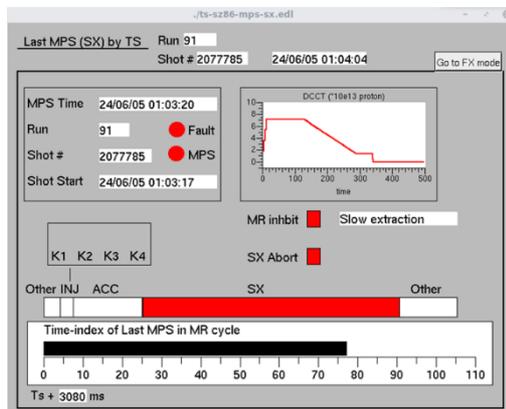


Figure 8: MPS event of SX mode during SX phase.

4. 議論

加速器スケーラによる MPS 情報の可視化はうまくいったのかについて議論する。

加速器スケーラモジュールで、加速器サイクル開始と MPS の 2 信号を直接計測することで、GUI による MPS 発報時間情報の可視化は実現した。一方、4-6 月の試験運用では、単純な計測値表示では混乱する事例が現れた。試験運用中に判明した問題点を以下に示す。

- 問題点 1: 機器異常ではない MPS
HD 運転中は、機器の異常では無く、ビーム停止中の機器設定変更で MPS が発生することがある。この MPS を除外するため、ビームが停止している時に発生する MPS は本システムを起動しないようにした。
- 問題点 2: サイクル越えてから発生する MPS
MPS 判定に時間がかかる場合、あるサイクルに起因する MPS が、その次のサイクルになってから発報する。そのため、3.2.2 で示した Neutrino Online Monitor のように、問題の無い次サイクルの情報を表示してしまう。
この問題に関しては現状対策を検討中である。

GUI のさらなる改善点として、視認性を考慮し、加速器サイクルのどこで発報したか加速器スケーラの取得情報と DCCT 波形との相関関係をより分かりやすくした方が実践的になる。

試験運用の経験を元に、さらに改善をすすめ、秋の運転からの本運用を目指す。これによって MPS 発報の原因特定から加速器の運転再開までの時間を短縮する。

謝辞

本試験を行うにあたり、多くの支援をして頂きました。

KEK/J-PARC 職員 山田 秀衛 氏には制御全般に関するご支援を頂きました。ここに深謝の意を表します。

同じく KEK/J-PARC 職員 木村 琢郎 氏には MPS 関連の助言を頂きましたこと感謝申し上げます。

KIS の皆様にも、資料作成のため支援頂いたこと感謝いたします。

参考文献

- [1] J-PARC website. <https://j-parc.jp/index-e.html>
- [2] S. Nagamiya, "Introduction to J-PARC", Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2012, p. 02B001, 2012. doi:10.1093/ptep/pts025
- [3] Y. Sato *et al.*, "The beam operation of J-PARC main ring after the first step of the high repetition upgrade", The 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEOB4. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/WEOB/WEOB4_oral.pdf
- [4] 「MR でこれまでの記録を更新するビームパワーでの利用運転を実現、記念写真撮影を実施 (6月21日)」, J-PARC News 第 230 号 <https://j-parc.jp/c/topics/2024/06/28001363.html>
- [5] T. Kimura, "Update of Machine Protection System and Opticalization of Interlock Signals in J-PARC Main Ring", the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, THP037, this meeting.
- [6] S. Yamada, "15 years of the J-PARC Main Ring Control System and its Future Plan", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, pp. 172-177.
- [7] K. C. Sato *et al.*, "Development of Triggered Scaler to Detect Missing Trigger", Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017), Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 627-630.
- [8] Y. Tajima *et al.*, "Development of EPICS-based Software of Triggered Scaler", Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 1091-1094.
- [9] M. Yang *et al.*, "Applications of Triggered Scaler Module for Accelerator Timing", Proc. 22nd Virtual IEEE Real Time Conference, (RT2020), Online meeting, Oct. 2020, arXiv:2010.14716v2 [physics.acc-ph].
- [10] K. C. Sato *et al.*, "Demonstrative Applications of Triggered Scaler in J-PARC MR", Proc. 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2018), Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 1095-1098.
- [11] M. Yang *et al.*, "Application of Timing Read-back System in J-PARC Main Ring", Proc. 13th Int. Workshop on Emerging Technologies and Scientific Facilities Controls (PCaPAC2022), Prague, Czech Republic, Oct. 2022, pp. 8-11.