

トリガ付きスケーラの応用: J-PARC MR 加速器信号の計測

DEMONSTRATIVE APPLICATIONS OF TRIGGERED SCALER IN J-PARC MR

佐藤健一^{#, A)}, 田島佑斗^{B)}, 上窪田紀彦^{A)}, 吉田奨^{B)}, 山本昇^{A)}

Kenichi Sato^{#, A)}, Yuto Tajima^{B)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Susumu Yoshida^{B)}, Noboru Yamamoto^{A)}

^{A)} J-PARC Center / KEK (Tokai campus)

^{B)} Kanto Information Service (KIS)

Abstract

A new PLC-type module, "Triggered Scaler", has been developed and tested as a read-back system for the current timing system in J-PARC. It stores counts in a memory array, and each external trigger (typically 25Hz, from the timing system) shifts the pointer to the array during a machine cycle (2.48s or 5.20s). We have developed three applications of "Triggered Scaler", using real accelerator signals in J-PARC MR: (1) an injection signal of MR, (2) a MR-circulation signal provided by LLRF, and (3) a pulsed signal generated when a MPS event occurred. In this report, demonstrated usefulness of the module is described. In addition, we discuss prospects for the future of the module.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で計画及び運営を行っている大強度陽子加速器施設である[1]。リニアック(LINAC)、3GeV シンクロトロン(RCS: Rapid Cycling Synchrotron)、50GeV シンクロトロン(MR: Main Ring)の3つの加速器で構成されている[2,3]。

J-PARC のタイミングシステムは、これら3つの加速器が無理なく同居できるように同期して運転するための司令塔となっている[4]。LINAC と RCS は 25Hz、MR は周期 2.48s (Fast extraction(FX) mode)または 5.20s(Slow extraction(SX) mode)で繰り返し運転をしている。J-PARC タイミングシステムは、MR のサイクルの始まりである S 信号と、LINAC と RCS のサイクルの始まりである 25Hz トリガ信号を供給する。

MR は、ビームを加速するために、1 サイクルの中で決められた時間間隔で各機器の状態を遷移させる必要がある。Figure 1 に、MR の 1 サイクルで電磁石の磁場(赤線)がどう振る舞うか、SX-mode を例に示した。ビーム待

ち受けの 3GeV と、加速後の 30GeV を、決められた時間で遷移することを毎サイクル繰り返す。このような台形波形をパターンと呼ぶ。Figure 1 中の P0 から P4 は、それぞれ (P0)電磁石のパターン開始、(P1)ビーム入射開始、(P2)ビーム加速開始、(P3)FLATTOP(30GeV を維持する期間のこと)開始、(P4)FLATTOP 終了、を意味する。また、RCS から MR へは、1 サイクル内で 4 回連続入射するが、「K1」から「K4」はその番号を意味する。最後に「Ts」は、1 サイクルの開始を知らせる特別なタイミング(S 信号と同じ)である。

J-PARC タイミングシステムは、MR のあらゆる装置に「トリガ信号」を配信し、総数は約 300 点にも及ぶ。しかし、MR では「トリガ信号」生成装置と機器の間が数 10m ある場合があり、機器側に届くべき「トリガ信号」が稀に抜ける事象が起こった。そこで、「トリガ信号」を現場で確認し、稀に発生するトリガ抜けをすぐに検知できるような新しいモジュールとして「トリガ付きスケーラ」を設計・開発した[5]。

トリガ付きスケーラは、J-PARC のタイミングシステムに対する Read-back 系として 2016 年 3 月に試作された。J-PARC 加速器で広く使用されている横河電機製の PLC(FA-M3 シリーズ)の I/O モジュールとして動作する。昨年度の加速器学会では、ラダーCPU と PLC 開発ソフト「Widefield3」でデータレジスタを確認することで、トリガ付きスケーラの基本動作を確認した[5]。次の段階として、J-PARC 加速器制御の標準である Linux CPU モジュール「F3RP61-2L」を用いて EPICS 環境を構築した[6,7]。その経緯は別報告にて詳細が述べられている[8]。

2. トリガ付きスケーラを使ったデモンストレーションについて

トリガ付きスケーラを現場の環境で評価するため、MR の加速器運転中の信号でデモンストレーションを試みた。

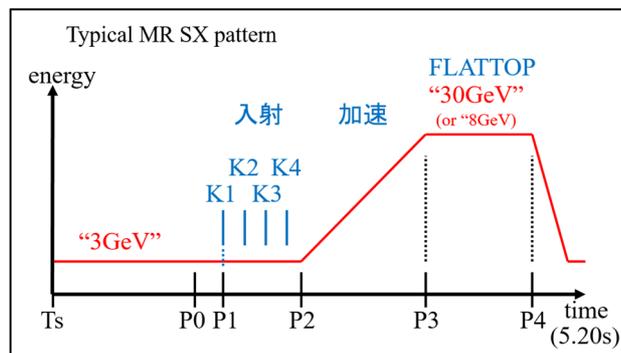


Figure 1: Typical MR pattern and special timings.

[#] kenichi.sato@j-parc.jp



Figure 2: Photo of demonstration setup.

使用した信号は以下の通りである。

1. MR 周回信号
2. MR 入射タイミング信号
3. MPS 発報信号

Figure 2 にデモンストレーション用のセットアップの写真を示す。スロット 1 には CPU モジュールとして「F3RP61-2L」、スロット 3 にはトリガ付きスケーラが装着されている。入力されている信号は、J-PARC タイミングシステムが供給する S 信号、25Hz トリガ信号、および上記計数対象の信号 3 種類である。

トリガ付きスケーラは、25Hz トリガ信号毎(40ms 幅)のパルスカウントを計測し、MR 周期分を配列に格納する。SX mode 運転時は、周期 5.20s なので、配列要素数は 130 (5200ms / 40ms)である。

3. デモンストレーションの説明

3.1 MR 周回信号表示

MR 周回信号は LLRF が供給する信号(空き bucket に対する加速周波数)で、MR をビームが 1 周するたびにカウントする信号である。

この信号をトリガ付きスケーラに入力すると、スケーラの値は単位時間(40ms)の間にビームが何回 MR を周回したかに相当する。そのためカウント値はビームが加速されるとともに増加する。このカウント値をグラフ化したのが Fig. 3 である。

横軸は、40ms 単位の time slot 番号を表し、縦軸はそれぞれの time bin におけるカウント値を表している。MR の入射タイミングは 20 番から 23 番であり、そのあと 59 番までビーム加速が行われる。Figure 3 を見ると、横軸 20 番目から 23 番目に最低値(7430)をカウントし、そのあとカウント値が増加、59 番目で最大値(7647)をカウントして飽和している。これは 3GeV から 30GeV への RF 加速パターンに対応している。

計測したカウント値から加速エネルギーを逆算できる。計測値を x (40ms 当たりの MR 周回数)と置けば、以下の Eqs. (1)-(2)を用いてエネルギーを求めることができる。

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{x}{0.040} \cdot \frac{L}{c} \quad (1)$$

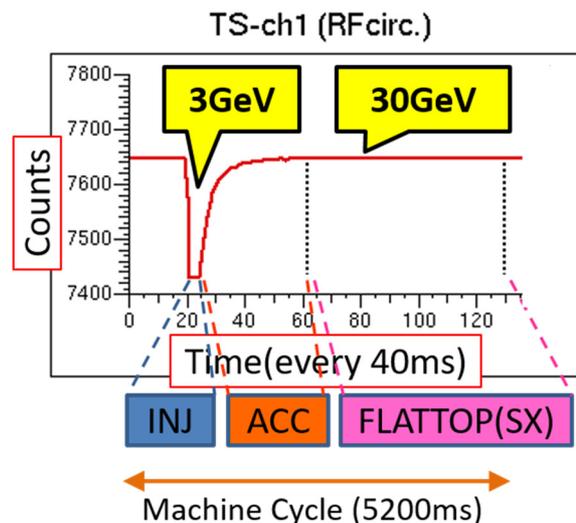


Figure 3: Observed MR-circulation signal.

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2 \quad (2)$$

なお、L は MR の周長(1567.5m)、 v は陽子の速度、 c は光速(299792458m/s)、 β は相対速度、 $m_0 c^2$ は陽子の静止質量(0.938GeV)である。Equations (1)-(2)を用いてカウントからエネルギーを逆算したのが Table 1 である。

Table 1: Observed Counts and Calculated Energies

| 運転エネルギー | カウント値 | 逆算したエネルギー |
|---------|-------|-----------|
| 3GeV | 7430 | 3.000GeV |
| 8GeV | 7608 | 8.004GeV |
| 30GeV | 7647 | 31.46GeV |

逆算したエネルギーが運転エネルギーと微妙にずれているのは、計数の間隔が 40ms と短く、カウントが 1 違うだけで値が大きく変化するためである。特に 30GeV のカウントが 7646 に変わった場合、逆算したエネルギーは「27.35GeV」になる。

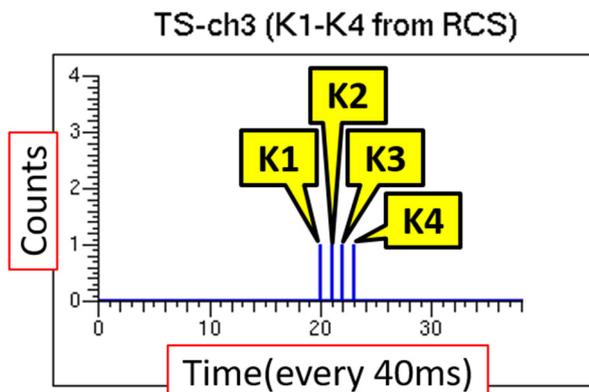


Figure 4: Observed MR-injection signal.

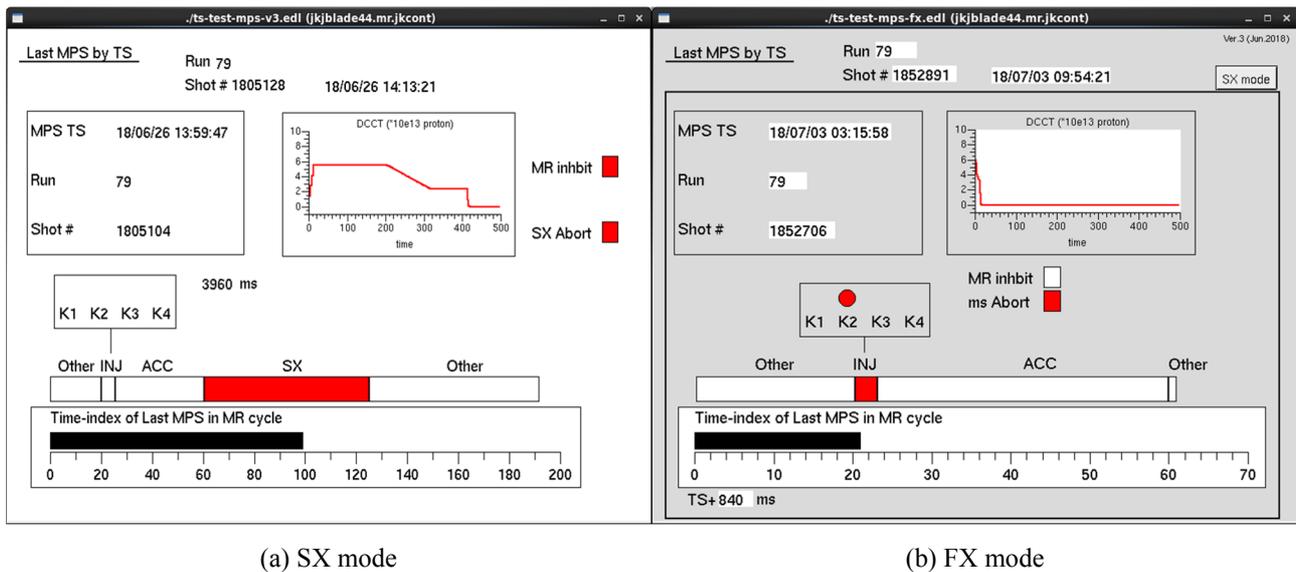


Figure 5: Accelerator status screens when a MPS occurred.

3.2 MR 入射タイミング表示

MR 入射タイミングは、RCS で加速されたビームを MR へ入射するときを使うタイミングで、入射キッカーを適切なタイミングで動作させるために使われる。入射は 40ms 間隔で合計 4 発行される(1 章参照)。この信号をトリガ付きスケーラに入力した計測結果が Fig. 4 である。

Figure 4 を見ると、横軸 20 番目から連続して 4 発、それぞれ 1(他の場所は 0)がカウントされている。これは入射タイミングとして妥当なものである。K1 のタイミングは Ts から 837ms と決められているので、K1 のパルスは 800ms から 840ms の間である 20 番目に記録される。なお、入射タイミングでトリガ抜け検知が起こった際の挙動を[8]で検討している。

3.3 MPS 発報時加速器状態表示

MPS は加速器の機器で何らかの異常があった時にビームの運転を止めるシステムである。例えば MR 電源機器で温度異常を検知すると、その機器がインターロック信号を出し、他の機器分も合わせて MPS ユニットが集計し、MPS システムが MPS 発報信号を生成、加速器を安全に停止する[9]。

MPS 発報信号は、通常 0 で、MPS 発報時に 1 になる信号である。この信号をトリガ付きスケーラで計測すると、毎サイクル配列の中身は全部 0 で、突発的な出来事として MPS が発報すると、配列のどこかのメモリが 1 になる。そのため、MPS が MR サイクルのどの time slot で発報したかを検知することができる。

しかしこれだけでは画面表示としてはつまらないものである。そこで、MPS 発報信号を引き金として、発報時の加速器の状態を記録・表示するアプリケーションを開発した。アプリケーションは 2 種類用意し、(a)SX mode 用と (b)FX mode 用がある (Fig. 5)。グラフの横軸や、特殊な MPS mode[10]の表示で違いがある。トリガ付きスケーラの計測部分は、両アプリケーションの下部に表示される。MPS 発報の MR サイクル内の time slot をバーグラフで

表示、またそれが MR の「入射(INJ)」「加速(ACC)」「FLATTOP(SX)」のどこに当たるかを四角形で視覚化した。さらに、入射時間で MPS 発報した場合は、4 回入射のどこであったかを吹き出し内に赤丸で示す。Figure 5(b)は、K2 で発報した例である。アプリケーション上部は、MPS 発報時の加速器の状態を表示する。発報時の timestamp、Run number、Shot number、DCCT 波形などが表示される。

4. まとめと今後の課題

トリガ付きスケーラを加速器運転に用いるために F3RP61-2L モジュールを使って EPICS 環境を構築した。3 種類の信号をデモンストレーションとして用い、アプリケーション上で確認することができた。

本報告ではトリガ付きスケーラを用いた応用例を示したことになる。しかしながら本モジュールの目的はトリガ抜け検知であるため、今後はトリガ抜け検知を主眼にした準備を進める予定である。たとえばどこに設置するのが効果的か、どの信号を監視するのかを決定する必要がある。また、アプリケーションに関しても、運転員が欲しい情報の選定や、画面のレイアウトに関しても議論を重ねる必要がある。とは言え、他にも有用な応用例があれば随時検証する。

参考文献

- [1] J-PARC ホームページ; <http://j-parc.jp/>
- [2] K. Hasegawa *et al.*, "Performance and Status of the J-PARC Accelerators", Proceedings of IPAC2017 in Copenhagen, Denmark, May 14-19, 2017, pp. 2290-2293.
- [3] T. Koseki, *et al.*, "Beam Commissioning and Operation of the J-PARC Main Ring Synchrotron", Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) 2012, 02B004, 10.1093/ptep/pts071.
- [4] N. Kamikubota *et al.*, "Operation Status of J-PARC Timing System and Future Plan", Proceedings of ICALEPCS in Melbourne, Australia, Oct. 17-23, 2015, pp. 988-991.
- [5] K. Sato *et al.*, "Development of triggered scaler to detect missing trigger", Proceedings of 14th Annual Meeting of

- Particle Accelerator Society of Japan in Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 627-630.
- [6] N. Kamikubota *et al.*, “J-PARC Control Toward Future Reliable Operation”, Proceedings of ICALEPCS in Grenoble, France, Oct. 10-14, 2011, pp. 378-381.
- [7] J. Odagiri *et al.*, “Integration of PLC with EPICS IOC for SuperKEKB Control System”, Proceedings of ICALEPCS in San Francisco, US, Oct. 6-11, 2013, pp. 31-34.
- [8] Y. Tajima *et al.*, “Development of EPICS-based Software of Triggered Scaler”, Proceedings of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Nagaoka, Japan, Aug. 8-10, 2018, THP094, to be published (2018).
- [9] T. Kimura *et al.*, “Performance Evaluation of MR-MPS and Development Plan of New MR-MPS for J-PARC”, Proceedings of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1148-1150.
- [10] T. Kimura *et al.*, “Upgrade Plan of Beam Abort System in J-PARC MR MPS”, Proceedings of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 641-643.