

J-PARC ビーム同期タグ付モニターデータの高速測定

THE FAST MEASUREMENT OF THE MONITORS DATA WITH THE BEAM SYNCHRONIZED TAG IN J-PARC

畠山 衆一郎^{#, A)}, 山本 風海^{B)}, 吉本 政弘^{B)}, 林 直樹^{B)},
Shuichiro Hatakeyama^{#, A)}, Kazami Yamamoto^{B)}, Masahiro Yoshimoto^{B)}, Naoki Hayashi^{B)}

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

^{B)} JAEA J-PARC Center

Abstract

The J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS) accelerates 400 MeV LINAC beams up to 3 GeV, and distributes them to the Materials Life Science Experiment Facility (MLF) and the Main Ring Synchrotron (MR) in 25 Hz cycle. To prevent radiation damages from the beam loss, also to detect failures of accelerator's machines, an interlock mechanism called the Machine Protection System (MPS) has been utilized. Once the beam is stopped by the MPS, we should recover it quickly for users in experiment facilities. MPS events related to the beam dynamics are usually diagnosed by beam loss monitors (BLM), beam position monitors (BPM) and current transformers (CT). Data of these monitors should be distinguished MLF or MR since the parameters for the magnet and the RF systems are different between MLF and MR. It is introduced the method to distinguish the beam destination using the information of the beam synchronized tag from the timing system when taking the monitor's data in 25Hz.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、ビーム損失によるビームラインの放射化を防ぐため、また機器自身の不具合を検出するために機器保護システム(MPS)と呼ばれるインターロック機構が使用されている。MPSの発報によるビーム運転の停止は実験ユーザーの貴重なビーム利用時間を削ることになるので迅速な復旧が求められる。MPSの発報原因は機器からのインターロックの種類によってある程度特定可能であるが、ビーム損失モニター(BLM)のMPSはその原因の特定が難しい。RCSの場合、MLF行とMR行の2種類のビームを切り替えながら運転しており、ビームモニターのデータもそれらを区別する必要がある。ビームの行先を区別する方法として2章で述べるタイミングシステムのタグ情報を使用する。3章ではタグ情報を埋め込んだモニターデータ収集系の概要を述べ、例として行先毎に区別されたデータ表示アプリケーションを示す。またいくつかのMPS発報時の例を示す。

2. タイミングシステムとタグ情報

J-PARCのタイミングは、大きく次の2種類ある[1,2]。

(1) スケジュールドタイミング

中央制御のマスタIOCから送信される50Hzのトリガークロックからのディレイとして定義される。

(2) シンクロナイゼーションタイミング

マスタIOCとは独立に加速器機器より生成されるトリガーからのディレイとして定義される(例:RCSのRFシステムによって生成されるキッカー放電トリガー)。

RCSのモニタに付与されるタイミング情報は、スケジュールドタイミングである。マスタIOCからはトリガークロックに先立ち、次のパルスの動作を示すTypeが送信され、受信IOCはそのTypeにもとづきLook Up Table(LUT)からディレイ値を取り出す。LUTはマスタIOCから、Reflective Memory(RFM):(光ファイバーネットワークを通じた共有メモリシステム)を通じて各受信IOCに配信される。またRFM経由では、Beam-Type(Typeに対応する受信タイプ値)、Beam-Tag(ビームの総カウント値)、MR-Tag(MR周期でリセットされるカウント値)などがビームに同期して各受信IOCに配信される。Table 1はMRの早い取り出し(FX)62パルス・2.48秒周期、Table 2は遅い取り出し(SX)130パルス・5.2秒周期のMR-Tag、Beam-Typeの例を示している。

Table 1: Timing Tag for FX Cycle (2.48s)

MR-Tag	Beam-Type	Destination
1	28	MLF
...
20	28	MLF
21	104	MR
22	104	MR
23	104	MR
24	104	MR
25	28	MLF
...
62	28	MLF

[#]hatake@post.j-parc.jp

Table 2: Timing Tag for SX Cycle (5.20s)

MR-Tag	Beam-Type	Destination
1	25	MLF
...
20	25	MLF
21	100	MR
22	100	MR
23	100	MR
24	100	MR
25	25	MLF
...
130	25	MLF

Beam-Type は MLF 行ビームは 20~29 の値、MR 行ビームは 100~199 の値として定義される。MR-Tag は値が 21~24 までの 4 パルスが MR 行として定義され、その他は MLF 行である。MLF と MR のビーム輸送ラインを切り替えるパルスバンド電磁石のヒステリシスの影響を考慮して MR 行の直後の MLF 行ビーム(MR-Tag=25)が粒子数ゼロの no beam に設定されることもある。

3. RCS モニタデータ収集系と新フォーマット

3.1 RCS のビームモニタ

RCS ではビーム診断用として、様々なビームモニタが設置されている [3]。その中でも、MPS のインターロックに組み込まれている 85 台の比例計数管型ビーム損失モニタ (PBLM)、また MPS には組み込まれていないが周回ビームの閉軌道の歪み (COD) を監視するための 54 台のビーム位置モニタ (BPM)、及び周回ビームのビーム電流を監視する直流ビーム電流モニタ (DCCT)、低域時定数を伸ばした遅い電流モニタ (SCT)は、ビーム診断に重要な情報を持っており、非破壊型のビームモニタなのでビーム利用運転中も 25Hz で全ショットのデータが保存される。

3.2 ビームタグ付データ収集

RCS のビームモニターの信号は、地下 2 階の加速トンネルから地下 3 階のメンテナンストンネルを経由して地上の 3 つの制御室(モニタ装置室、高周波制御室、タイミング装置室)のフロントエンド IOC にて収集される。モニタのフロントエンド IOC は、タイミング受信モジュールで生成されたトリガー信号 (for BPM, DCCT/SCT) または入射から出射までの範囲の積分ゲート信号 (for PBLM) を受けてアナログ的に処理を行い、デジタイザによってデジタル情報に変換する。タイミングのタグ情報は、タイミング系の RFM ネットワークから、トリガーカウンターボード (TCB)を通して、タイミング系とは独立したモニタ系の RFM ネットワークに書き込まれ、モニターデータと共に上

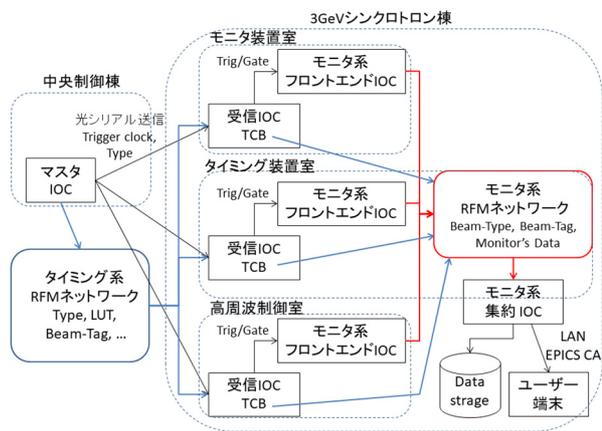


Figure 1: Overview of Monitor DAQ with Timing Information.

位の集約 IOC で取得される。集約 IOC では、ディスクに 25Hz でデータ保存するとともに制御 LAN を通して EPICS [4]の Channel Access プロトコルで 2 秒毎にデータを更新してユーザー端末からデータを参照できるようになっている。フロントエンド IOC のハードウェアは VME CPU ボード(Advme7501) と PMC 規格の RFM ボード (VMIPMC-5565)で OS は VxWorks、集約 IOC は Intel 系 CPU の PC と PCI 規格の RFM ボード(PCI-5565) で OS は Linux である。Figure 1 に以上の概要を示した系統図を示す。

3.3 新しいデータフォーマット

RCS では DAY1 の立ち上げ当初から、モニタのデータをファイルに保存するために C 言語で実装された JWF フォーマットというバイナリファイルが使用されてきた。BLM, DCCT, SCT では、RFM から VME クレート単位でデータを取得し JWF ファイルに保存するという手法をとることによって、25Hz のデータを高速に保存することが可能であった。しかし、それらの分離したファイルから BLM だけをまとめたり、DCCT のみのデータを取り出したりするのに煩雑な手続きが必要で、せっかく保存してあるデータもあまり活用されない状況であった。BPM の JWF ファイルは 54 台全てのデータがまとめて一つのファイルになっているが、最高でも 60 秒毎に 20 秒のデータしか保存できない状況であった。また、以上の JWF ファイルはタイミング情報は Beam-Tag (ビームの総カウント値)のみ付加されていて MR, MLF のビームの区別は不可能であった。

これらの問題点を解決するために、データ構造をモニタごとに一つの構造体にまとめ、タイミング情報に Beam-Tag の他に MR-Tag, Beam-Type も付加した新しいデータフォーマットを開発し C++言語で実装した。新しいデータフォーマットでは、PBLM, DCCT でもモニタ単位で簡単に参照できるようになった。BPM のデータ構造も単純化し、アルゴリズムを改善して 25Hz で全ショットのデータが取れるようになった。また、MR-Tag, Beam-Type が追加されたため、MR 行と MLF 行のデータが区別できるようになった。このほかに、JWF ではバイナリデータを圧

縮せずに保存していたため PBLM で 1.1TB/month のディスク容量が必要であったが、新しいフォーマットは zlib の gzwrite() 関数を用いてバイナリデータを圧縮しながら保存しており、データサイズが、12GB/month と約 1/9 になっている。

3.4 データ表示アプリケーション

ディスクに保存したデータを表示するプログラムは、JWF の場合、一度データをテキストファイルにダンプして gnuplot などで表示していたが、新フォーマットでは圧縮したバイナリファイルを gzread() 関数で直接読み込んで PLPLOT [5] で表示している。アプリケーションの操作は GUI で任意の日時を指定し 25Hz の連続表示、コマ送り、巻き戻しが可能で、MPS が発報した時点だけでなくその前後の傾向も見ることができようになっている。

Figure 2 は新フォーマットの PBLM データを表示するアプリケーションのスクリーンショットである。(A) は 85 台の PBLM のビームロスの和を時系列で表示したもので横軸は Beam-tag、縦軸は 85 台の PBLM 積分値の総和 (黒線 0-1ms、赤線 0-10ms、青線 0-20ms) で単位は Volt である。(B) は MR 行ビームの RCS 周回リングと入射・ダンプリン線のロスの分布で横軸が PBLM の番号、縦軸は積分値(V)である。(C) は同じく MLF 行のビームロスの積分値の分布である。なお、このデータは 2019 年 4 月 15 日のもので MR 行のビームは遅い取り出し 50kW の利用運転時、MLF 行のビームは 530kW の利用運転時である。(A) の時系列のグラフで 2 か所大きいところは、MR 行のビームである。

Figure 3 は BPM のデータを表示するアプリケーションで Figure 2 と同時帯のスクリーンショットである。(A) は横軸が Beam-tag、縦軸は 54 台の BPM の COD の RMS

の 1 サイクル(0~20ms)の平均値 (mm)である。青線が水平方向、赤線が垂直方向である。2 か所大きいところが MR 行のビームである。(B) は MLF 行の水平方向の COD で横軸が BPM の番号、縦軸が COD の大きさ(mm)で、1ms 毎に色分けをして重ねて表示している。入射時 0~1ms (赤線) の COD が大きいのは H-ビームを H+に

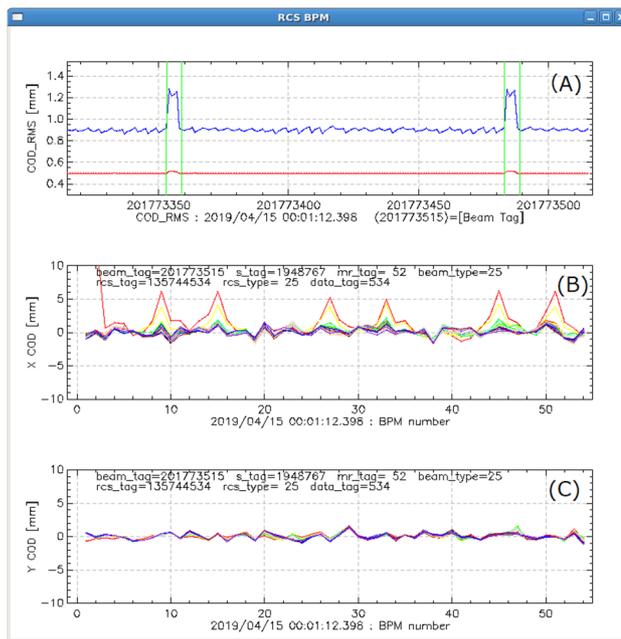


Figure 3: BPM Application for 25Hz data. (A) Time series of the average of COD_RMS (54 BPMs) with Beam-tag. (B) Horizontal COD for MLF Timing. (C) Vertical COD for MLF timing.

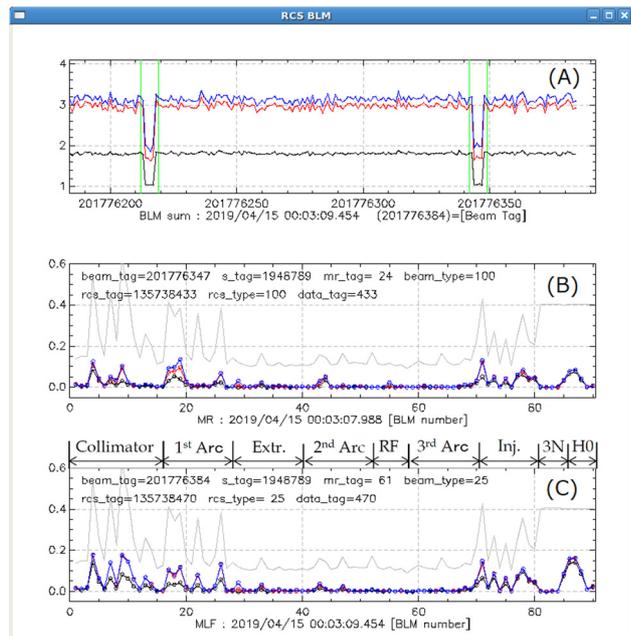


Figure 2: PBLM Application for 25Hz data. (A) Time series of the Sum of beam loss (85 PBLMs) with Beam-tag. (B) Beam loss distribution in RCS ring for MR timing. (C) Beam loss distribution in RCS ring for MLF timing.

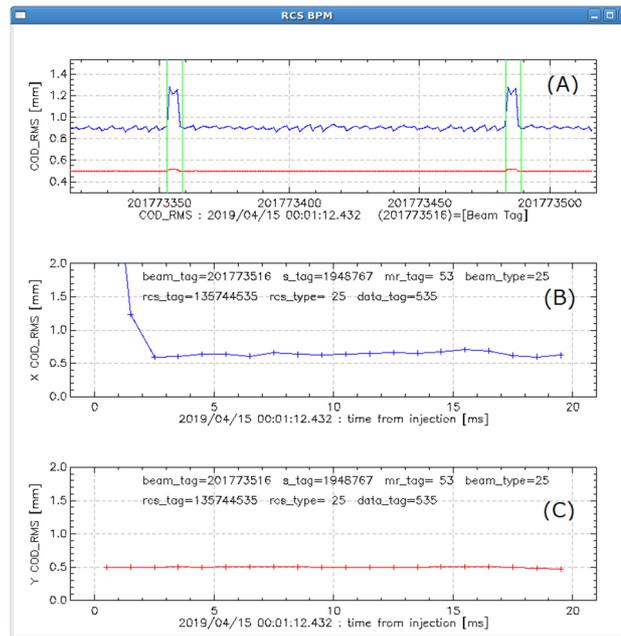


Figure 4: BPM Application showing RMS of COD. (A) Time series of the average of COD_RMS (54 BPMs) with Beam-tag. (B) Horizontal COD_RMS for MLF timing. (C) Vertical COD_RMS for MLF timing.

荷電変換するためバンブ軌道になっていること、縦方向ペインティングでRFの位相オフセットが入っていることが理由である。(C)は同じく垂直方向のCODで、入射から出射まではほぼ同じである。BPMの表示アプリケーションでは、(B)、(C)の表示を切り替えることで、横軸を入射から出射までの時間(0~20ms)、縦軸をCODのRMS(mm)にすることができる(Figure 4)。

Figure 5は、DCCT、SCTのデータを表示するアプリケーションでFigure 2と同時間帯のスクリーンショットである。(A)は横軸Beam-tag、縦軸がDCCTで測定した粒子数で、(B)は同じくSCTで測定した粒子数である。2か所粒子数の少ないところがMR行のビームである。

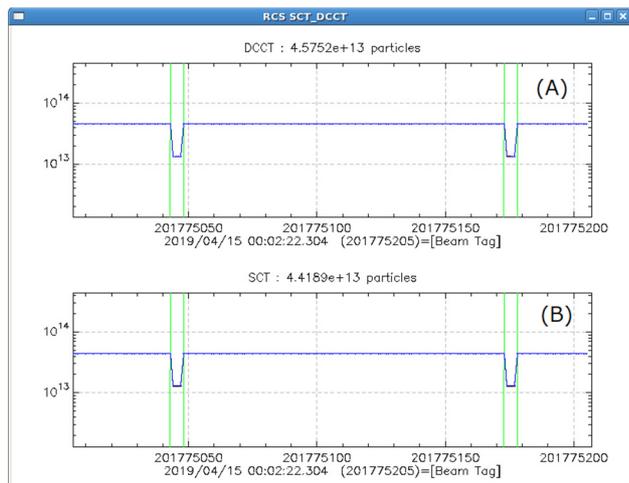


Figure 5: DCCT/SCT Application for 25Hz data. (A) Time series of the number of particles by DCCT. (B) Time series of the number of particles by SCT.

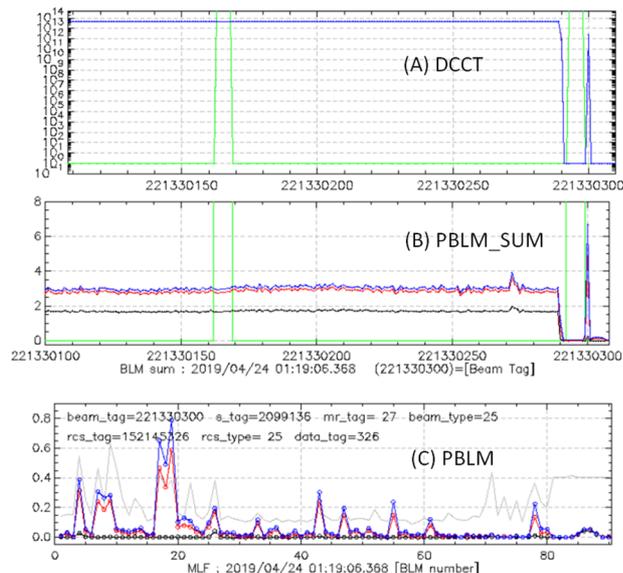


Figure 6: An example of the MPS event caused by the ion-source over voltage. (A) Time series of the number of particles by DCCT before MPS event. (B) Time series of the sum of beam loss before the MPS event. (C) Beam loss distribution at the MPS event.

3.5 活用例

RCSのPBLMのMPSの発報原因は、RCSの機器が原因で起こるものや、LINACからエネルギーのずれたビームが来て派生的に起こるものなど様々である[6,7]。

最近のMPSの発報例を二つ示す。一つめはLINAC最上流のイオン源引出電源の出力過電流が原因で、数パルス、負水素の供給がない状態になり、その後自動復帰して負水素の少なめのビームがRCSに来た時に発生したものである。RCSではビーム強度によって最適な機器のパラメータが異なり、想定よりも異なる強度のビームが来たときは、強度が弱い場合であってもビームロスが増大することがある。このときはMLF 530kW単独利用で 4.5×10^{13} の粒子数で運転していたが、イオン源自動復帰直後に 2.3×10^{12} の粒子数のビームが入射しRCSのPBLMのMPSが発報した。Figure 6は、その様子を示している。

もう一つの例は、RCSの偏向電磁石のフィードバックプログラムのエラーが原因で起こったものである。Figure 7の(A)はMPS発報時までのビームロスの和の時系列で、(B)はMPS発報時のビームロスの分布である。(C)はそのときの水平方向のCODの分布で、分散関数の大きい場所のCODが明らかに大きくなっている。このMPSイベントは当初、LINACからのエネルギーのずれ

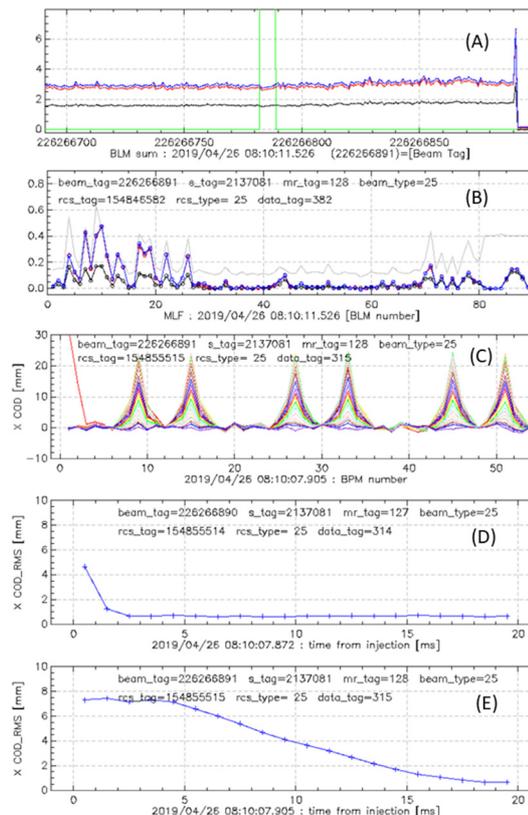


Figure 7: An example of the MPS event caused by the error of the RCS bending magnet control software. (A) Time series of the sum of beam loss before the MPS event. (B) Beam loss distribution at the MPS event. (C) COD distribution at the MPS event. (D) COD-RMS at the normal event. (E) COD-RMS at the MPS event.

が原因ではないかと思われていたが、COD-RMS の 1 サイクルの時間変化が正常なもの(D)と比較して、ゆっくりと小さくなっている(E)ことから RCS の主電磁石系が原因ではないかということで判明した。

4. まとめ

J-PARC RCS ではモニタデータにビームに同期したタイミングのタグ情報を付加して 25Hz で測定している。今回新データフォーマットの導入により MLF、MR のビームを区別できるようになり、操作性も向上したことで、MPS 発報時の原因特定ツールとして活用されている。

参考文献

- [1] F. Tamura, "タイミングシステムの概念と実装", 高エネルギー加速器セミナー OHO'18, September 4-7, 2018, Tsukuba Japan.
- [2] H. Takahashi *et al.*, "J-PARC 3GeV RCS CONTROL SYSTEM", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, August 2-4, 2006, Sendai Japan.
- [3] S. Lee *et al.*, "THE BEAM MONITOR SYSTEM OF J-PARC RCS", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, August 2-4, 2006, Sendai Japan.
- [4] <https://epics.anl.gov/>
- [5] <http://pilot.sourceforge.net/>
- [6] N. Hayashi *et al.*, "ANALYSIS OF INTERLOCKED EVENTS BASED ON BEAM INSTRUMENTATION DATA AT J-PARC LINAC AND RCS", International Beam Instrumentation Conference Sep. 9-13 2018, Shanghai, China.
- [7] N. Hayashi *et al.*, "BEAM MONITOR DATA ANALYSIS OF INTERLOCKED EVENTS AT J-PARC RCS", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.