

## J-PARC MR における EPICS を用いた Soft-MPS の実装と運用

### DEVELOPMENT AND OPERATION OF THE EPICS-BASED SOFT-MPS IN J-PARC MR

佐藤健一<sup>#,A)</sup>, 木村琢郎<sup>A)</sup>, 山田秀衛<sup>A)</sup>, 上窪田紀彦<sup>A)</sup>, 山本昇<sup>A)</sup>, 吉田奨<sup>B)</sup>

Kenichi Sato<sup>#,A)</sup>, Takuro Kimura<sup>A)</sup>, Shuei Yamada<sup>A)</sup>, Norihiko Kamikubota<sup>A)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>A)</sup>, Susumu Yoshida<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center / KEK (Tokai campus)

<sup>B)</sup> Kanto Information Service (KIS)

#### Abstract

In J-PARC MR, there is an MPS system to stop the beam operation automatically. Ordinary MPS accepts interlock signals by hard-wire. But, “Soft-MPS” can replace some wirings by monitoring several EPICS records as to interlock signals. In the Soft-MPS, one PLC monitors the status of multiple EPICS records via Ethernet, and outputs the generated (not software) signals to the MPS unit as one of the interlock signals. There are two main reasons for introduction Soft-MPS. (1) For quick integration into MPS. In this case, it is regarded as a temporary signal and switched to the hard wire as soon as the equipment is ready. (2) To use accelerator parameters that cannot be provided by hard-wire. For example, MR operation mode and beam bunch information. Soft-MPS started operation in the spring of 2018, and now nine Soft-MPS are in operation. It is expected that many Soft-MPS signals will be requested in the future, but it is necessary to discuss the policies for install a new Soft-MPS.

#### 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、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 の加速器を安全に運転する仕組みとして MPS(Machine Protection System)がある[4]。MPS は加速器を構成する機器が出すインターロック信号を集約し、運転モードなどに応じて加速中のビームをアボートし、加速器の運転を停止させる。このシステムによって、残っているビームが他の加速機器に与えるダメージを最小限に抑えることができ、加速機器が揃っていない状態での加速器運転ができないようにすることができる。この MPS はインターロック信号をハードワイヤで集めているが、2018年2月より EPICS を用いた Software による MPS (Soft-MPS)が導入された[5]。本報告では Soft-MPS の実装と運用を取り扱う。

#### 2. SoftMPS の実装について

Soft-MPS の実装に関しては J-PARC MR で標準的に使われている Linux CPU モジュール「F3RP61-2L」を用いて[6,7]、EPICS 環境を用いて制御 Network 内で通信を行う[8]。MPS ユニットへの出力として「F3YC08-0C」の出力モジュールを1つ使う。Figure 1 に示すのは、Soft-MPS に用いた PLC-IOC と MPS ユニットの写真である。

本システムは制御 Network を通して EPICS レコード(Process Variables)を監視することで、信号入力のためとする。一般的には EPICS レコードを用いた信号監視には信頼性がないと考えられる。それはハードワイヤに比



Figure 1: PLC-IOC and MPS unit photos.

べて間に入る機器の数が増える上に、Network の状態(機器やサービス)によっては一時的に通信断になる可能性があるためである。監視が行えていない可能性があるのは安全系としては好ましくない。それを少しでも克服するために、本システムでは以下の2つの仕組みを導入した。

- 通信断を検知して、MPS 発報させる仕組み
- 発報状態をラッチして保持する仕組み

Soft-MPS のプログラムは Fig. 2 に示すように、「入力」「CPU 処理」「出力」の順序で進む。この順番に従って、上記2つの仕組みを踏まえて説明する。

##### 2.1 入力

このシステムには装置としての入力モジュールは無い。CPU モジュールで監視する EPICS レコードの数だけ入力点数が増える。発報状態は Soft-MPS を必要とする機器側で EPICS レコードまで用意するのが基本だが、急を要する場合には生の値を Soft-MPS の PLC が受け取り、アナログ値の閾値判定などを行うことも考えられる。

# kenichi.sato@j-parc.jp

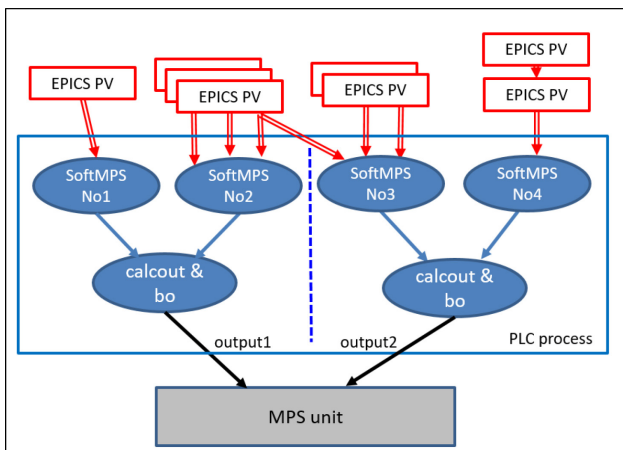


Figure 2: Soft-MPS flow image.

Soft-MPS を構成する仕組みの 1 つである通信断を検知する仕組みは EPICS レコードの Severity フィールドと alarm 状態を組み合わせたものを使う。EPICS レコードに設定できるアラーム情報は「NO\_ALARM」「MINOR」「MAJOR」「INVALID」の 4 種類があり、それぞれの値は順に 0~3 に対応している。「MINOR」「MAJOR」は EPICS レコードに設定できるパラメータであり、「INVALID」は通信断になった時の状態である。

したがって、Soft-MPS の対象となる EPICS レコードの Severity に「MAJOR」を設定すれば、「NO\_ALARM」とそれ以外に分類することができ、通信断の状態を含めることができる。このように Soft-MPS では EPICS レコードの Severity を入力にすることで、通信断の状態を含めて監視する。

## 2.2 CPU の処理

CPU モジュールは EPICS レコードを入力として Soft-MPS の出力を作る。基本的に、Soft-MPS ごとに独立に処理をして、それぞれの発報状態が分かる代表レコードを作って出力部で合わせる流れとなる。

しかし、通常の EPICS レコードは値の変化を検知することはできるが、値を保持しない。リアルタイムの値を知ることができるが、例えば一瞬変化するようなものだと人が見たときに値が戻ってしまう可能性がある。正しく言えば履歴はアーカイブに残っている上に、MPS ユニットの側ではインターロック信号をラッチする仕組みおよびそれを解除するための Reset 命令が内包されているため、加速

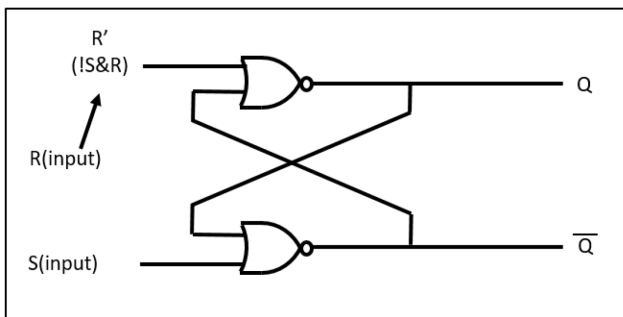


Figure 3: A general RS-FF circuit with R'.

```
## RS flip-flop
# 1st NOR circuit (reset side)
record(calc,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)_RESET_N"){
  field(INPA,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):OPE:$(name)_RESET_raw CP")
  field(INPB,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)_SET_N CP")
  field(CALC,"A||B")
}
# 2nd NOR circuit (set side)
record(calc,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)_SET_N"){
  field(INPA,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):OPE:$(name)_SET CP")
  field(INPB,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)_RESET_N CP")
  field(CALC,"A||B")
}
# Latched output using RS-FF status
record(calc,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)"){
  field(INPA,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):CALC:$(name)_SET_N CP")
  field(CALC,"A")
}
# Internal reset input for avoidance forbidden state
record(calc,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):OPE:$(name)_RESET_raw"){
  field(DESC,"Process only internal")
  field(INPA,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):OPE:$(name)_SET CP")
  field(INPB,"$(unit):SOFTMPS_$(cont):OPE:$(name)_RESET CP")
  field(CALC,"!A&&B")
}
```

Figure 4: The RS-FF programs in EPICS databases.

器の運転に支障はない。しかしながらこのアンバランスを解消するため、各 Soft-MPS の代表レコードを表示上保持するための EPICS レコードをラッチする仕組みを導入した。それが Fig. 3 で示す Reset-Set Flip-Flop (RS-FF)回路である。

RS-FF 回路は 2 つの NOR 回路で構成されており、前の入力値に応じて出力が変わる回路である。この回路における真理値表は Table 1 のようになる。Set の入力があれば、状態は「1」になり、Reset の入力があれば状態は「0」になる。RS-FF 回路は入力がない状態は値の保持に当たるため、Reset 入力があるまで状態を保持することができる。そこで個別の Soft-MPS の Reset を MRMPS の全体一括リセットボタンのシーケンスに組み込むことで、Reset のタイミングを MPS ユニットのリセットにそろえることができる。

ただし、RS-FF 回路は 2 入力ともに「1」にするとフリップフロップの機能を維持することができなくなる。これを防ぐため、Reset の入力を工夫することで 2 入力と同時に「1」にならないようにする。この時の RS-FF 回路に入力する Reset' (R')は Fig. 3 に示す通り、Set 入力の否定と Reset 入力の AND を取ったものとする。

Table 1: Truth Table of RS-FF Circuit with R'

S	R	R'	Q(state)
0	0	0	保持
0	1	1	0 (リセット)
1	0	0	1 (セット)
1	1	0	禁止

Figure 4 は RS-FF 回路を模倣した EPICS データベースのプログラムである。2 つの NOR 回路と、RS-FF の状態(Q)、および R' を calcout レコードで定義している。これらのレコードは 1 つの Soft-MPS 表示ごとに作成する必要がある。

### 2.3 出力

PLC の F3YC08-0C モジュールから MPS ユニットまでは 2 種類の出力を実現するために 2 本のハードワイヤで接続している。この 2 本は Fig. 1 で示す通り、PLC 出力モジュールの端子台から MPS ユニット側の 2 つの赤丸までがそれぞれ配線されている。

1 本目は「連続運転のみ」で発報するものである。基本的に Study でのみ使うものを想定しており、連続運転に必要なものが入りっぱなしになっていることを防ぐことが目的である。こちらは「SoftMPS-C (Continuous)」と名付けている。

2 本目は「シングルショット」で発報するものである。たとえシングルショットでも致命的になりうる、機器保護のためのビーム運転停止が求められているもので使用する。こちらは「SoftMPS-S (Single)」と名付けている。

Soft-MPS には、運転をさせない「Beam permission」という目的と運転を停止させる「Beam Stop」という目的が存在しているが、これらの目的を加味して 2 つの出力に落とし込んでいる。

これら用意した 2 本の出力に、CPU で処理したレコードを SoftMPS ごとに論理和を取ること追加していく。

## 3. Soft-MPS の運用

本章では J-PARC MR において Soft-MPS を実際の運転に用いた結果を示す。参考のため、Fig. 5 に MR のビーム運転に組み込んだ Soft-MPS の代表レコードのリストを示す。

EPICS PV list in Soft-MPS	
<SoftMPS-C>	
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:3DS_HOUT	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:3DS_VUP	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:3DS_HIN	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:INJMRPM	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:XXMRPM_082	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:XXMRPM_083	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:STAT:EXTM	bi
MRMPS:SOFTMPS_C:CALC:BMONTGT	calcout
MRMPS:SOFTMPS_C:ILK:BMONTGT	bo (Beam permission)
=> MRMPS:SOFTMPS_C:ILK:OUTPUT	bo => MPS unit
<SoftMPS-S>	
MRMPS:SOFTMPS_S:CALC:INJMRPM	calcout
MRMPS:SOFTMPS_S:ILK:INJMRPM	bo (Beam permission)
MRMPS:SOFTMPS_S:CALC:B15D_VOLT	calcout
MRMPS:SOFTMPS_S:ILK:B15D_VOLT	bo (Beam stop)
=> MRMPS:SOFTMPS_S:ILK:OUTPUT	bo => MPS unit

Figure 5: Soft-MPS EPICS PV list.

### 3.1 直線導入器系の挿入ターゲット

J-PARC MR のビームモニタ機器の中にはビーム軌道に直線導入器を操作してターゲットを挿入するタイプの機器がある。以下に挙げるのは、Soft-MPS で監視しているモニタ機器である。

- 3D Scatterer : 1 台 3 軸
- MRPM (Multi Ribbon Profile Monitor) :  
INJ 1 台, SX 2 台
- Extinction monitor : 1 台

これらはビームスタディでのみ使用し、連続運転には用いない。しかしながら、スタディで使用した後に直線導入器を抜くのを忘れて連続運転に突入することがしばしば

起こった。これは望ましくないので何らかのチェック機能が必要だという意見に至った。しかし、これらの機器にはインターロック信号の外部出力がない。

本来であれば、インターロック信号を出せるように改造し、ハードワイヤをトンネル内から電源棟 LCR まで延伸工事するのが正しい手順であるが、急ぎ導入するために Soft-MPS で構築することになった。改造と工事が終わ次第、通常の MPS インターロック信号に切り替える予定である。

2018 年 2 月に挿入ターゲットの Soft-MPS を実装した。連続運転のみで発報させるという目的から「Beam permission」に該当するとし、SoftMPS-C の出力に組み込んだ。Figure 5 の SoftMPS-C の 7 個の bi レコードは全て挿入ターゲットであり、calcout レコードでこれらの論理和を取ることでもれか一つでも挿入されていれば MPS 発報となる。Figure 6 の青の領域が SoftMPS-C に当たり、青矢印の順番で上位に伝達される。

### 3.2 MR INJ-MRPM

挿入ターゲットの内 INJ-MRPM に関しては、ビームの 1 shot 当たりの強度・ターン数に制限がある。INJ-MRPM が軌道上になれば問題なくビーム運転をすることができる。問題は軌道上にある時で、ビームの強度とターン数によってはシングルショットでリボンが破損してしまう。それを考慮し今後のスタディで使う条件として、関係者と協議のもと以下の条件を作成した。

許可する条件は以下の通り。

- INJ-MRPM が抜かれている状態  
または
- INJ-MRPM が挿入されている状態
- K3 入射のみ
- K3 からのターン数が 1turn 以上 100turn 以下の全てを満たす

ここで K3 入射などのパンチ情報やターン数などの加速器運転パラメータは、EPICS レコードでは用意されているがハードワイヤでは提供できない情報である。したがって、Soft-MPS で構築するのが適していると判断した。

このような条件のため、INJ-MRPM に関しては SoftMPS-C に組み込むと同時に SoftMPS-S の出力に組み込んでいる。目的は「Beam permission」に該当し、設定した段階でシングルショットでのビーム運転もできないようにする。

Figure 6 はビーム運転をしていない時に MPS 発報

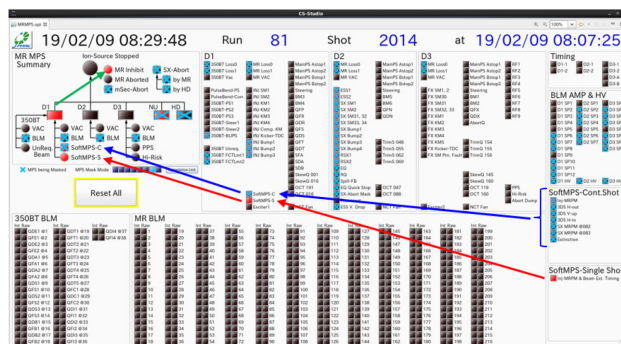


Figure 6: MR MPS status with Soft-MPS.

験をした時の MRMPS 画面のスクリーンショットである。この試験では INJ-MRPM を挿入した状態で、K1~K4 の 8 バンチ入射に変更したとき、ターン数を 0 や 101 以上の数に設定変更をしたときに、Soft-MPS 発報の信号が赤矢印で示す通り、上位の MPS まで伝達され、「MR inhibit」が出ていることを確認した。

### 3.3 B15D コイル層間電圧

2019 年 3 月 18 日に B15D 電磁石に不具合が発生して運転が停止した後、B15D 電磁石の健全性を監視するためにコイル層間電圧を監視した[9]。正常時とは違い、異常時には電圧に変化が見えるため、不具合の生じた B15D 電磁石をビーム運転に使う条件として、コイル層間電圧を Soft-MPS に組み込むことになった。

コイル層間電圧の EPICS レコードは別途構築してしたため、それに電圧の閾値を設定して Soft-MPS では電圧レコードの Severity だけを使用した。SoftMPS-S の出力に組み込んだが、発報したら速やかにビーム運転を停止してほしいため「Beam Stop」に該当する。

Figure 7 の上側は B15D 電磁石に応急処置を施して追加されたレコードである冷却水温度とコイル層間電圧を、現在値とグラフで表示している。4 月 24 日午前 1 時にコイル層間電圧の ch2 および ch3 が閾値(正常域:13.35V~13.80V)を超えたときに、Fig. 7 下側の MRMPS 画面の SoftMPS-S の B15D 電磁石の項が発報していることが分かる。

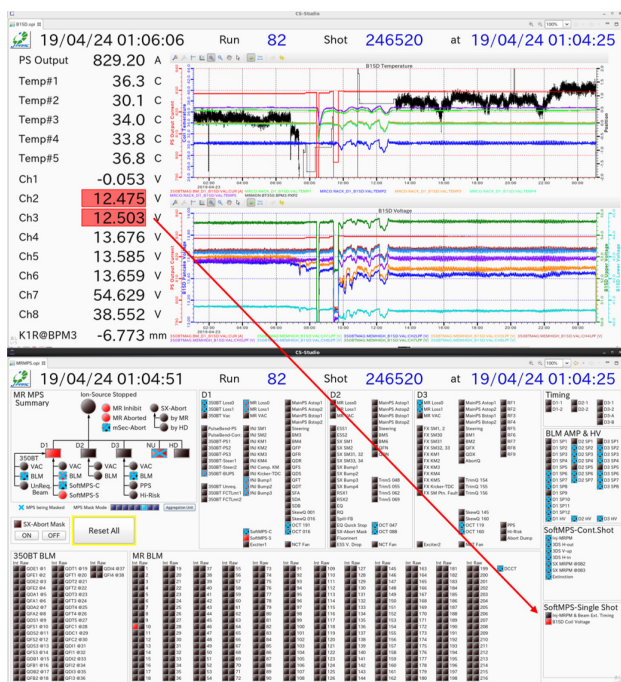


Figure 7: B15D status and MR MPS status.

## 4. 今後の展開

今後の Soft-MPS はこのままでは際限なく数が増える恐れがある。一方で安全系としての不安もあるので、数が増えることは実は望ましくない。そこで、「緊急性を要

するもの」を「期間限定」に受け付けることにし、最終的に機器側で必要ならば速やかにインターロック信号を用意してもらう方針とする。例えば今回の B15D 電磁石の Soft-MPS に関しては改修が済み次第不要の物になるため、いつまでも残しておかないように心がける。

その一方でいつまでも残る可能性の高い Soft-MPS に関しては、代替案を模索し、安全性を高める方法があれば導入を検討し、安全性に抜けが無いようにしたい。

## 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] T. Kimura *et al.*, “Operation Status of J-PARC MR Machine Protection System and Future Plan”, Proceedings of ICALEPCS in Barcelona, Spain, Oct. 8-13, 2017, pp. 341-343.
- [5] T. Kimura *et al.*, “J-PARC MR-MPS における Soft-MPS 導入と背景”, Proceedings of 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, THPH003, to be published (2019).
- [6] EPICS ホームページ; <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [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] N. Kamikubota *et al.*, “Network System Operation for J-PARC Accelerators”, Proceedings of ICALEPCS in Barcelona, Spain, Oct. 8-13, 2017, pp. 1470-1473.
- [9] M. Shirakata *et al.*, “J-PARC 3-50BT B15D 電磁石の層間短絡”, Proceedings of 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan in Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, THOH06, to be published (2019).