

J-PARC Linac および RCS における MPS モジュールの更新(2)

UPDATE OF MPS MODULES FOR J-PARC LINAC AND RCS (2)

高橋博樹^{#, A)}, 鈴木隆洋^{B)}, 石山達也^{B)}, 伊藤雄一^{C)}

Hiroki Takahashi^{#, A)}, Takahiro Suzuki^{B)}, Tatsuya Ishiyama^{B)}, Yuichi Ito^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

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

^{C)} Total Support Systems Corp.

Abstract

In the event of an abnormal situation, a machine protection system (MPS) that immediately inhibits the beam is indispensable to minimize the damage and the radioactivation by beam loss. The existing MPS was developed during the construction period, and there are many MPS modules that have been used from the beginning of J-PARC operation. Therefore, as a measure against aging, we started designing, manufacturing and updating the new MPS module in 2018. In this paper, the specifications and the results of performance test about the newly designed and manufactured the MPS signal aggregation module and the E/O converter module will be described.

1. はじめに

J-PARC Linac および RCS は大強度の加速器である。そのため加速器を構成する機器に異常が発生した場合、通常の軌道から外れた大強度ビームの機器への衝突や大きなビームロスが発生する。よって、異常発生における加速器本体へのダメージや放射化を最小限にすることが重要である。そのために、異常が発生した際に高速にビームを停止させ、ビームによる影響を最小限にする機器保護システム(Machine Protection System: MPS)が構築されている [1-3]。一方で、MPS を構成する既存 MPS モジュールは 10 年以上使用されていることから、その経年化対策として MPS モジュールの計画的な更新(交換)が必要となっている。

そこで 2018 年より、既存 MPS モジュールの基本機能を有し、且つ、既存 MPS インターフェースとの互換性を有する新たな MPS モジュールの設計・開発を行い、2019 年より MPS 標準モジュールの更新を進めている。さらに MPS 信号を集約する等の機能を有する特殊 MPS モジュールの設計・開発を行い、実環境での動作確認を進めている。

本件では、特殊 MPS モジュールの開発状況と Linac および RCS における MPS の更新状況について報告する。

2. 機器保護システム

2.1 既存システム構成

Linac および RCS の機器保護システム(MPS)は(1)標準モジュール、(2)ロスモニタモジュール(BLM モジュール)、(3)集約モジュール、(4)E/O モジュール、及び、これらのモジュールが挿入される(5)MPS シャーシ(電源を含む)で構成される。MPS の構成概略を Fig. 1 に、2018 年時点で使用されていたモジュール等の数量を Table 1 に示す。

既存の MPS は、適切なシステム設計と構成により標準モジュールまたは BLM モジュールが機器から信号を受信してから数 μ 秒程度でのビーム停止を実現している。この MPS のビーム停止性能により、Linac と RCS において、異常発生時(機器が異常を検知した場合)に、機器等にビームによる損傷が生じることは、稼働当初から一度も起こっていない。しかしながら、MPS モジュールの大部分は J-PARC 稼働初期から使用されているため、経年化対策が必要不可欠となっている。そこで、2018 年度から再設計を含めた MPS モジュールの更新を進めることとなった。

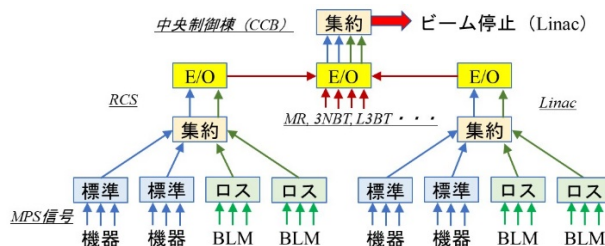


Figure 1: Outline of MPS configuration.

Table 1: Number of MPS Modules as of 2018

Kinds	Units
Standard module	236
Beam loss monitor module	88
E/O signal convert module	16
Aggregation & mask module	5
MPS chassis (Power supply unit)	90

2.2 新標準モジュールおよび新 MPS シャーシ

Linac および RCS では多くの MPS モジュールが使用されていることから、MPS の更新は複数年かけて進めな

[#] takahashi.hiroki@jaca.go.jp

なければならない。よって、新 MPS モジュールと既存 MPS モジュールが混在する MPS 構成を可能とすることが必要不可欠である。そこで、「MPS シャーシ単位での互換性を確保する」ことを基本方針として、まず、(1)標準モジュールと(5)MPS シャーシの設計を行った。そして、既存 MPS との互換性を有し、且つ、既存モジュールの課題を解決する機能を有する新標準モジュールおよび新 MPS シャーシを開発した[4]。そして 2019 年度より、RCS の MPS に新 MPS モジュールの実装を開始した。2020 年 3 月時点で、新標準モジュール 28 台(約 12%)、新 MPS シャーシ 9 台(10%)が更新済みである。また、更新した新 MPS モジュールは、現在まで不具合なく動作している。

そこで、次に(3)集約モジュール、及び、(4)E/O モジュールの設計・開発を進めることとした。これらのモジュールは、新標準モジュールと同じ設計方針とし、新 MPS シャーシに挿入することを前提として設計を行った。

3. 特殊 MPS モジュール

特殊 MPS モジュールは、機器との信号取合いがなく、MPS を加速器運転に適した動作とするために使用される。Linac および RCS における特殊 MPS モジュールには、集約モジュール、及び、E/O モジュールがある。

集約モジュールは、複数の MPS 信号を系統毎(機器毎、施設毎)の MPS 信号に集約する。さらに、集約した MPS 信号について、不要な信号は無効にする(必要な信号のみ有効にする)マスク処理を行う。この集約モジュールの機能は、加速器の運転状況に応じて、必要な MPS のみ有効にすることを目的としたものである。これにより、例えば「Linac のみのビーム運転時は、RCS からの MPS 信号でビームを停止しない」というような、ビーム行き先に応じたビーム停止機能の構築を可能とする。

E/O モジュールは、電気信号を光信号に変換し、MPS 信号を長距離伝送する。これにより、J-PARC の各施設の MPS 信号を一体的に管理し、利用することを可能とする。

3.1 既存モジュールにおける課題

既存 MPS においては、

(i) 特殊 MPS モジュールは MPS シャーシの 5 スロット目のみ挿入可(1 シャーシで 1 台だけ使用可)という設計上の制限がある。一方、MPS における各施設(Linac, RCS 等)の上位部分においては、Fig. 1 から分かる通り多数の MPS 信号を処理する必要がある。そのため、既存 MPS の構築開始後に、設置場所の制限などから 1 台の MPS シャーシに複数台の特殊 MPS モジュールを挿入して使用する必要性が明らかとなった(既存システムにおいては 3~4 台の使用が必要)。そこで、複数台の特殊 MPS モジュールの使用を可能とした、専用の MPS シャーシを設計し、これを必要数だけ製作して対応することとした。その結果、現在、この専用 MPS シャーシの予備品がなく、経年化等による故障時の対応が困難となっている。

また、既存集約モジュールにおいては、信号のマスク(有効/無効)設定およびマスク状態の取得に必要な信号インターフェース(DI/DO)が、集約モジュールが扱う

信号数よりも少ない。そのため、

(ii) 集約モジュールの設定および情報取得が複雑となっている。この複雑な設定監視動作を VME IOC 上の EPICS ドライバに組み込むことで対応している。そのために、マスク設定の変更時において不具合が生じることが、J-PARC 加速器の運用開始後に明らかとなった。現在は、マスク設定変更時において、変更操作を行うソフトウェアが「現設定 Reset→マスク設定」という動作をすることで、不具合の発生を回避している。しかしながら、これは安全系の動作としては好ましくない状態であると考えられる。

さらに、集約モジュールの入力が 6 信号(実運用上)×5 系統と固定されていることから、

(iii) MPS 系統毎のマスク設定について拡張性がない。しかしながら、実際には信号数が 7~8 点の系統があり、既存モジュールでは対応が困難である。そこで、余剰信号を別系統に接続し、MPS 監視操作ソフトウェア上では同じ系統として表示・操作可能とすることで、現状は対処している。これも安全系として望ましくない状態である。

3.2 新特殊 MPS モジュールの開発

新特殊 MPS モジュールは新標準モジュールと同様の

- ・ 既存 MPS の基本機能は維持し、一部機能を改良(追加)

- ・ モジュールの信号遅延時間を 1 μs 以内

という設計方針の下、3.1 の課題(i)を解消するため、

- ・ 新 MPS シャーシに複数枚挿入して使用可

とする設計を行い、開発を進めた。開発した新集約モジュールおよび新 E/O モジュールの設置例を Fig. 2 に示す。Figure 2 より、開発した新集約モジュールおよび新 E/O モジュールが 2 台ずつ、計 4 台、新標準モジュールと同じシャーシに挿入されており、特殊 MPS モジュールを複数台挿入して使用可能となっていることが分かる。

また、新特殊 MPS モジュールについて、モジュールの遅延時間の計測を行った。まず、新集約モジュールの遅延時間は、Fig. 3 より 0.068 μs となっており、設計方針の 1 μs 以内を十分満足していることが分かる。

次に、新 E/O モジュールの遅延時間計測結果を Fig. 4 に示す。新 E/O モジュールの光信号においては、MPS 信号の状態を FM 変調している。Figure 4 において、MPS 入力(RS485)が正常→異常と変化したのを検知し、光信号の波形(幅)が変化していることが分かる。そして、

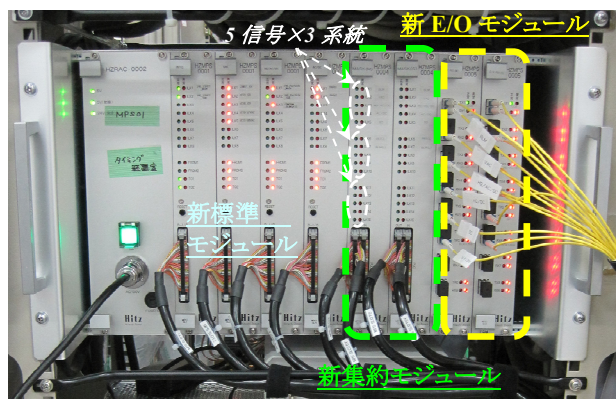


Figure 2: Installation of new MPS modules.

光信号が正常時の波形ではないことを検知し、MPS 出力が正常→異常と変化している。光信号における FM 変調の処理があるため、モジュール遅延時間は $0.118 \mu\text{s}$ となっているが、設計方針の $1 \mu\text{s}$ 以内を十分満足していることが分かる。

加えて、新集約モジュールについては、3.1 に示した課題(ii)、(iii)を解消する設計として、

- ・モジュールの設定および情報取得の簡易化
- ・MPS 系統グループ化機能の実装

を行った。

新 MPS では各モジュールの監視操作は PLC (Programmable Logic Controller) を介して行うため、新集約モジュールについて、PLC と取り合う最大信号数を考慮した設計を行った。そして、モジュール 1 台当たりが扱う信号を、5 信号×3 系統(計 15 信号)とした(Fig. 2 参照)。これにより、複雑な操作を必要とせず、モジュールの設定および情報取得を可能とした。さらに、5 信号

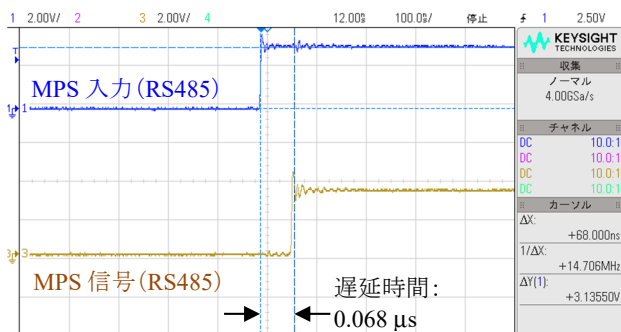


Figure 3: Delay time of new aggregation & mask module.

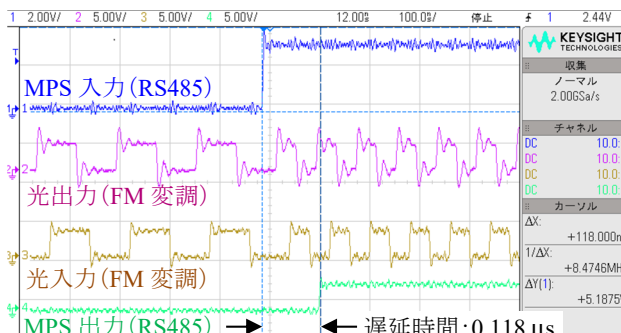


Figure 4: Delay time of new E/O module.

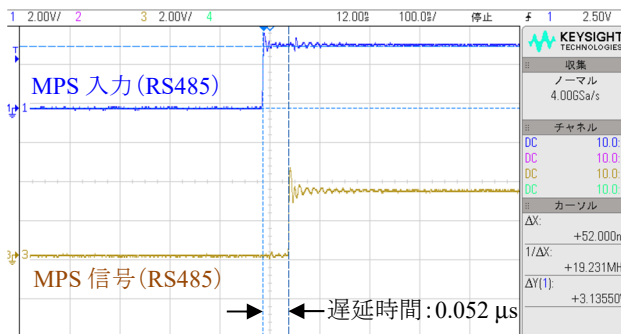


Figure 5: Delay time of new aggregation & mask module (15 signals as one group).

×3 系統をグループ化し、「2 系統:10 信号と 5 信号」「1 系統:15 信号」を選択して使用可能とすることで、マスク設定の拡張性を実現した。1 系統:15 信号にグループ化した場合の遅延時間を Fig. 5 に示す。これより、グループ化設定での使用時においても、設計方針の $1 \mu\text{s}$ 以内を十分満足していることが分かる。

一方で、新集約モジュール 1 台が扱える信号数は、既存集約モジュールより少ない設計となっている。しかしながら、新 MPS シャーシは既存シャーシより挿入できるモジュール台数が多い(新 MPS シャーシ:8 台、既存シャーシ:5 台、Fig. 2 参照)ことから、使用する新集約モジュールの台数を増すことにより、既存 MPS で扱っている信号数に対応することが可能である。以上より、既存特殊 MPS モジュール部分について、新モジュールを用いた更新が問題なくできると考えている。

3.3 新特殊 MPS モジュール長期動作確認

Linac および RCS の MPS の構成(Fig.1)より特殊 MPS モジュールは、MPS 信号の集約や伝送を担う MPS 基幹部に使用される。そのため、これらの不具合が、加速器の効率的な運転および安全性に与える影響は大きい。従って、ノイズ等による誤動作(不具合)が長期間生じないことを確認することが重要である。そこで、既存 MPS と平行した新 MPS を構成し、双方に同じ信号を入力し、それぞれの状態 (Status) を監視し比較することで、不具合発生の有無を確認することとした。長期動作確認試験の構成概略を Fig. 6 に示す。長期動作確認は、RCS-中央制御棟 (CCB) 間の MPS 信号について実施した。図に示されている通り、RCS の既存 MPS 集約モジュールに入力されている MPS 信号 (RS485) をハード的に分岐し、新 MPS に全く同じ MPS 信号を入力することとした。

まず、J-PARC 加速器の運転時のマスク設定は、Fig. 6 において RCS 既存 MPS の IOC-R1 の EPICS レコード

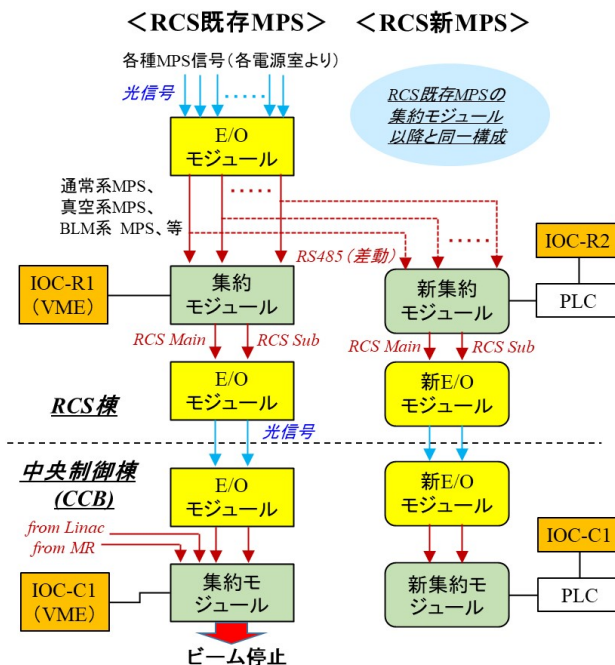


Figure 6: Outline of long-time signals (status) check test.

を介して設定される。そこで、EPICSレコードのリンク機能を用い、IOC-R1 の設定を、新 MPS の IOC-R2 のレコードに反映させることとした。これにより、RCS の既存および新 MPS、両方の集約モジュールに同じマスク設定がされることとなる。

次に、RCSとCCBについて、それぞれの既存 MPS および新 MPS の集約モジュールの状態を、EPICS レコードにより監視する。そして、既存および新 MPS の対応する EPICS レコードを比較し、新 MPS において誤作動の有無(対応する EPICS レコードに差異の有無)を確認した。

長期動作確認結果の一部を Fig. 7 に示す。まず、RCS 棟・集約モジュール設定の比較 (Fig. 7 左側) において、既存モジュールでは 3.1 (ii) に記載した通り、不具合回避のための Reset 操作(塗りつぶし部分)が行われている。一方、新モジュールにおいては操作不要で設定が正確に保持されている。そして、Reset 操作部分を除く部分の比較から、マスク設定が新集約モジュールに適切に反映されていることが分かる。

次に、CCB・集約モジュール状態 (Fig. 7 右側) を比較する。ここで、既存モジュールと新モジュールの EPICS レコードにおいては、発報状態を示す値 (0/1) が反転している。これは新集約モジュールにおいては、信号状態と EPICS での状態を合致させることとしたためである。この反転状態を考慮して状態を比較すると、既存と新モジュールの入力信号は同一となっている。これより、集約モジュールのマスク設定・状態、及び、E/O モジュールの信号伝送が、ノイズ等の影響を受けることなく正確に行われていることが分かる。

この様な長期動作確認を 2010 年 10 月から 2011 年 7 月まで行った結果、期間中、ノイズの影響等による不具合はなく、新 MPS が正確に動作することが確認できた。これにより、新特殊 MPS モジュールを、実機 MPS として使用する目処が得られた。

RCS棟・集約モジュール設定(マスク設定時:1)			CCB・集約モジュール状態(入力信号)		
Time	既存モジュール設定(bit)	新モジュール設定(bit)	Time	既存モジュール状態(発報:1)	新モジュール状態(発報:0)
2021/6/30 05:30:55	0000000	1111111	2021/6/30 05:30:55	0	1
2021/6/30 05:30:57	1111111	1111111	2021/6/30 05:30:56	0	1
2021/6/30 12:52:33	0000000	1111111	2021/6/30 12:52:33	1	0
2021/6/30 12:52:35	1111111	1111111	2021/6/30 12:52:35	0	1
2021/6/30 13:19:29	0000000	1111111	2021/6/30 13:19:28	1	0
2021/6/30 13:19:31	1111111	1111111	2021/6/30 13:19:30	0	1
2021/6/30 13:57:06	0000000	1111111	2021/6/30 13:57:06	1	0
2021/6/30 13:57:08	1111111	1111111	2021/6/30 13:57:08	0	1
2021/6/30 14:04:48	0000000	1111111	2021/6/30 14:04:49	1	0
2021/6/30 14:04:50	1010000	1010000	2021/6/30 14:04:50	0	1
2021/6/30 14:10:19	1010001	1010001			
2021/6/30 16:36:00	0000000	1010000	2021/6/30 16:36:00	1	0
2021/6/30 16:36:02	1010000	1010001	2021/6/30 16:37:31	0	1
2021/6/30 16:52:45	1010001	1010001	2021/6/30 17:22:51	1	0
2021/6/30 17:10:59	1010000	1010000	2021/6/30 17:23:05	0	1
2021/6/30 17:23:17	1010001	1010001	2021/6/30 17:28:46	1	0
2021/6/30 17:27:38	1010000	1010000			

変更動作不具合回避のための Reset 既存と新モジュールでは 1/0 が反転

Figure 7: Results of long-time signals (status) check test.

4. まとめ

J-PARC の機器保護システム(MPS)においては、経年化対策として MPS モジュールの更新が必要不可欠であり、2018 年より MPS モジュールの更新を進めている。本件は、特殊 MPS モジュールとして、各施設の MPS 信号を集約し、且つ、加速器運転状態(ビーム行先)に応じて MPS 信号をマスク(無効化)する機能を有する集約モジュール、及び、施設間の MPS 信号伝送のための E/O

モジュールの開発状況について報告した。

開発した新特殊 MPS モジュールについて、モジュールの信号遅延時間などにおいて十分な性能を有すること、及び、既存モジュールの課題を解決する機能を有することを確認した。さらに、新特殊 MPS モジュールは加速器の運転および安全性に大きく影響することから、長期間の動作確認試験を実施し、約 1 年間に渡って不具合がないこと確認した。この結果から、2021 年 11 月より RCS-中央制御棟間において、新特殊 MPS モジュールの実使用を開始する計画である。今後は、各種 MPS モジュールの更新をさらに進めるとともに、新ロスモニタ (BLM)モジュールについて、モニタ Gr.と協力して検討を進める予定である。

参考文献

- [1] H. Sakaki *et al.*, "THE CONTROL SYSTEM FOR J-PARC", Proceedings of APAC 2004, 2004, Gyeongju, Korea, pp. 622-624.
- [2] H. Yoshikawa *et al.*, "CURRENT STATUS OF THE CONTROL SYSTEM FOR J-PARC ACCELERATOR COMPLEX", Proceedings of ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA, 2007, pp. 62-64.
- [3] H. Sakaki *et al.*, "J-PARC LINAC 用高速インターロックシステムの設計", Proceedings of Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, Tokai, Japan, TP-56.
- [4] H. Takahashi *et al.*, "J-PARC Linac および RCS の MPS モジュールの更", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, 2019, pp. 271-274.