

J-PARC Linac および RCS の MPS モジュールの更新 UPDATE OF MPS MODULES FOR J-PARC LINAC AND RCS

高橋博樹^{#, A)}, 林直樹^{A)}, 西山幸一^{B)}, 鈴木隆洋^{C)}, 石山達也^{C)}

Hiroki Takahashi^{#, A)}, Naoki Hayashi^{A)}, Koichi Nishiyama^{B)}, Takahiro Suzuki^{C)}, Tatsuya Ishiyama^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} Shinsei Electronics Co., Ltd.

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

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 of the J-PARC. Then, the system has been working stably for more than ten years. On the other hand, since there are many MPS modules that have been used from the beginning of J-PARC operation, it is important to systematically proceed with updating (replacement) of modules as a measure against aging of MPS. However, the main components of the existing MPS module have been discontinued. Therefore, it is indispensable to redesign the MPS modules in consideration of improvement such as the compatibility with existing modules and the miniaturization. In this paper, the development status of the new module and the update plan of MPS for Linac and RCS are detailed.

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多大な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 J-PARC 稼働初期から使用されており、その経年化による動作不具合の発生が懸念されている。よって加速器の安定した運転を維持するためには、MPS モジュールの計画的な更新(交換)を行うことが重要である。しかしながら既存モジュールの再製作においては、主要部品の生産中止に伴う部品変更が必要不可欠となっているた

め再設計が必要である。そこで、既存 MPS モジュールの基本機能を有し、且つ、既存 MPS のインターフェースとの互換性を有する新 MPS モジュールを開発し、MPS の更新を進めることとした。

本件では、Linac および RCS における MPS モジュールの更新状況及び計画について報告する。

2. 既存機器保護システム

Linac および RCS の機器保護システム(MPS)を構成する既存 MPS モジュールを Fig. 1 に、MPS の構成概略を Fig. 2 にそれぞれ示す。これらに示す通り、(1)標準モジュールと(2)ロスモニタモジュール(BLM モジュール)は加速器構成機器とのインターフェースとなる主要なモジュールである。まず、(1)標準モジュールは機器から Interlock 信号を受信すると MPS 信号送信する。また、(2)BLM モジュールはロスモニタよりアナログ信号(ビームロス値)を受信し、その値が閾値を超えた場合に MPS 信号を送信する。それぞれシリーズ(直列)接続し前方

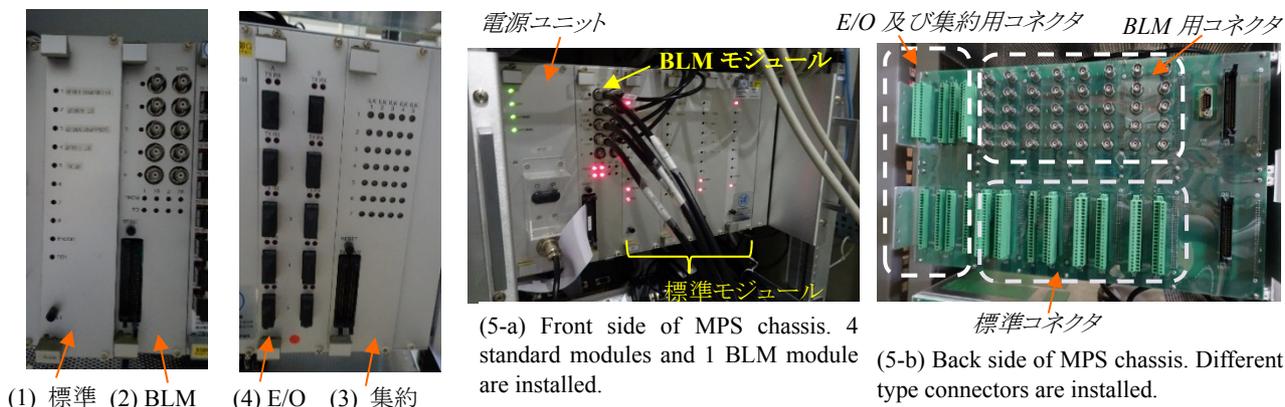


Figure 1: Existing MPS modules.

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



Figure 2: Outline of MPS configuration.

(加速器上流)に MPS 信号を伝送することが可能である (Fig. 2) [4]。さらに (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 MPS は構成される。(3)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。これにより、例えば「Linac のみのビーム運転時は RCS から 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て適切にビームを停止機能の構築が可能としている。次に(4)E/O モジュールにより電気信号を光信号に変換し、加速器間(施設間)という MPS 信号の長距離伝送を可能としている。

各 MPS モジュール等の仕様概略と J-PARC Linac および RCS における使用台数を Table 1 に示す。

Table 1: Specifications and Number of MPS modules

	Number of signals	Signal specifications	Units
Standard module	Input: 8 ch	Non-voltage contact or 5V・8mA	236
Beam loss monitor module	Input: 5 ch	Analogue (±10V)	88
E/O signal convert module	Input: 10 ch Output: 10 ch	RS485 (Differential)	16
Aggregation & mask module	Input: 35 ch Output: 35 ch (7 x 5 line)	RS485 (Differential)	5
MPS chassis (Power supply unit)	Input: 5 line Output: 5 line	RS485 (Differential)	90

Linac および RCS の MPS は Table 1 に示す通り非常に多くのモジュールを使用しているが、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 においては、異常発生時(機器が異常を検知した場合)にビームによる損傷が生じることは稼働当初からなかった。

一方、これら大部分のモジュールが J-PARC 稼働初期から使用されているため経年化対策が必須となっている。しかしながら、既存 MPS モジュールは J-PARC 稼働前に設計されたものであるため、現在、使用されている部品の調達が困難である。そのため、再設計を含めた MPS モジュールの更新を進めることとした。

3. 新 MPS モジュール

3.1 設計方針

Table 1 より標準モジュール及び BLM モジュールで約 320 のモジュールが使用されているため、これら全てを J-PARC の夏期メンテナンス期間 3ヶ月 (実作業期間は 2ヶ月程度)で更新することは時間的な制限から非常に困難である。さらにコスト的な面を考慮する必要もあり、更新は複数年かけて進めなければならない。よって更新を進めるに当たっては、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、

a) MPS シャーシ単位での互換性を確保する設計とし、新 MPS シャーシ間の信号伝送インターフェースを既存 MPS と同じ差動伝送 (RS485) とした。Figure 2 は、Linac における代表的な既存 MPS の構成 (BLM モジュール 1 台、標準モジュール 4 台) である。このように、MPS モジュールは MPS シャーシに挿入されている。そして MPS シャーシ単位でシリーズ (直列) 接続し、MPS 信号を高速に上流に伝送する構成となっている。よって a) の設計により、シャーシ単位で既存 MPS モジュールを新 MPS モジュールに変更する (更新する) ことが可能となる。これにより、既存 MPS モジュールの仕様による制限を受けることなく、新 MPS モジュールの設計を進めることができ、機能改良・追加が可能となる。

次に新 MPS 開発において、BLM モジュールはアナログ信号を取合いとしているなど要求される性能が高いこと、並びに、モニタ Gr. の開発要素が多いことから、標準モジュール完成後の方が効率的に開発できると考えられる。また、集約モジュール、E/O 変換モジュールは、使用台数が少ないことから開発の緊急性が他モジュールよりも高くない。以上より、

b) MPS シャーシ、標準モジュールを最初に開発することとした。

3.1.1 MPS シャーシおよび標準モジュールの開発

Figure 1 より、前面および背面の両方において BLM モジュールと標準モジュールの入力点数、信号コネクタが異なることになっていることが分かる。また MPS シャーシの背面においては、集約モジュールおよび E/O 変換モジュール用のインターフェース部分が異なっていることも分かる。

このように、インターフェースが異なるモジュールを同一シャーシに搭載可能としたことで、既存 MPS シャーシにおいてはその信号経路が非常に複雑になっている。この経路の複雑さが、モジュールの改良において信号数が増やせない等の障害になることが検討を進める過程で明らかとなった。そこで、新 MPS シャーシにおいては、

c) 新 MPS シャーシ: 信号経路の単純化とインターフェースを最適化する

設計方針とした。

次に既存の標準モジュールについては、加速器の運転開始から 10 年以上が経っており、現在の加速器運転に十分に対応するためには一部機能の改良が必要であることが明らかとなっている。例えば、既存標準モジュールのノイズフィルタ機能の改良が必要である。Figure 3 は Linac のある電磁石電源がパルス運転した際に、他の電源の Interlock 信号経路のノイズを計測したものである。ここでは約 45 μsec のノイズが生じている。既存モジュールは約 1 μsec 以内のノイズを除去する性能であるため、このようなノイズにより MPS モジュールは発報状態となる。そのため現在はこの信号経路に電子素子(コンデンサ)を入れることで、この様なノイズを除去し運用している状況である。これ以外の改良点も考慮し

d) 新 MPS 標準モジュール: 既存 MPS の基本機能は維持し、一部機能を改良(追加)するという方針の下、開発を進めることとした。

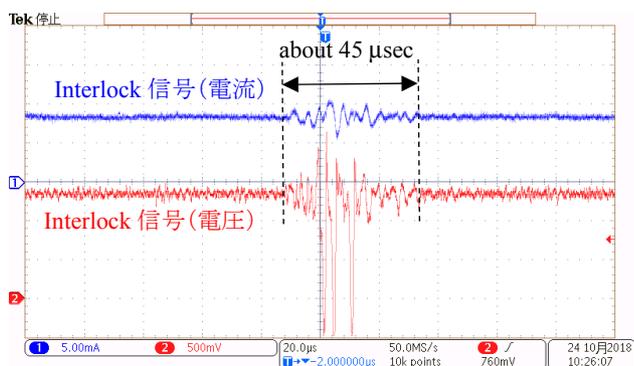


Figure 3: Noise on interlock signal by pulse operation of other power supply.

3.2 新 MPS モジュール

開発した新 MPS シャーシおよび標準モジュールを Fig. 4 に示す。また、本設計において改良・追加した主な機能(性能)を以下に示す。

「新標準モジュール」

- (i) 小型化 [スロット幅: 既存の 2/3]
- (ii) マスク状態と正常 [未発報] 状態の表示の区別
正常時: 緑、異常時: 赤、マスク時: 消灯
- (iii) ノイズフィルタ性能の向上 [不感時間: 0, 1, 8, 64 μsec から選択]
- (iv) Interlock 信号として差動 [RS485] 信号の受信可能
- (v) MPS 信号伝送経路のラッチ機能
- (vi) 監視制御を VME から PLC に変更
PLC との取合いを前面に集約

「新 MPS シャーシ」

- (vii) 各スロットの取合いを共通化
背面には機器とのインターフェースを集約
- (viii) 抜けにくく接続が容易なコネクタを採用

Figure 4 (a)は既存 MPS と新 MPS の標準モジュールの大きさを比較したものである。(i) 小型化の改良によりスロット幅が既存モジュールの 2/3 になっていることが分かる。これにより、MPS シャーシ 1 カ所において 8 台(既

存: 5 台)のモジュール実装が可能となった。また Fig. 4 (b)に示す通り「正常時: 緑、異常時: 赤、(マスク時: 消灯次)」と状態表示が明確になったことが分かる。次に(vii)の改良により各スロットの取合いの共通化を行った。Figure 4 (c)に示す通り、機器との信号取合い部分である MPS シャーシ背面において、信号接続先のコネクタおよび配置が全スロットにおいて共通となっている。

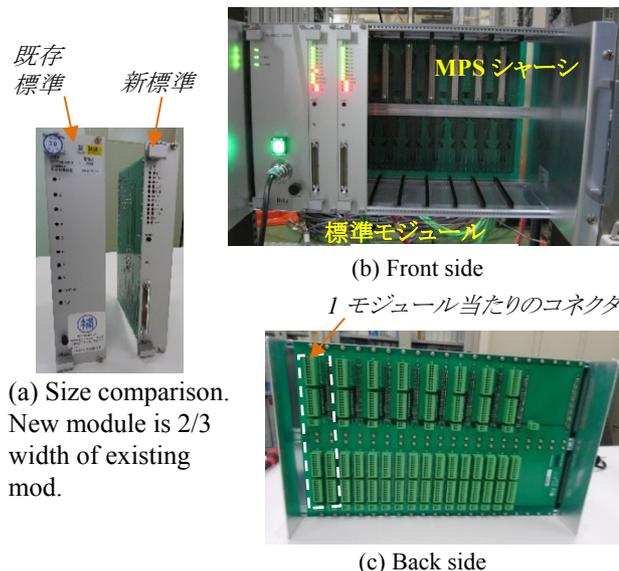


Figure 4: New MPS modules.

3.3 性能試験

新 MPS 標準モジュールの応答速度について計測した結果を Fig. 5~7 に示す。それぞれノイズ不感時間を 0 μsec 、1 μsec 、64 μsec とした場合の応答速度を計測したものである。これらの図は、外部(機器側)からの Interlock 信号(MPS 入力)、外部からの Interlock 信号から生成される標準モジュール内における Interlock 信号(FPGA 入力)、モジュールから出力される MPS 信号(MPS 出力)を計測したものである。何れの信号も正常時 ON(High)、異常時 OFF(Low)となっている。

まず Fig. 5 において、外部からの Interlock 信号入力後約 140 nsec 後に、モジュールが信号 OFF を検知している。この遅延時間は、外部信号が High レベルから Low レベルになるまでの時間と新モジュールの FPGA に

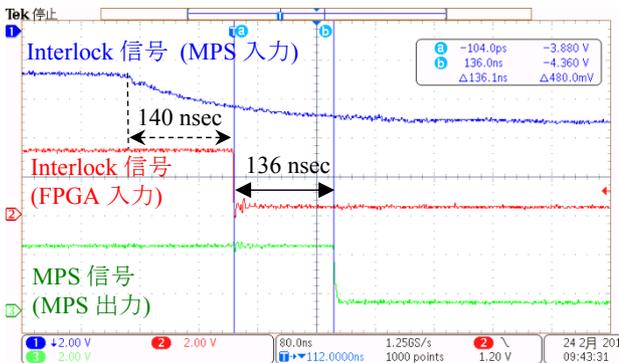


Figure 5: Response time of new module (Filter: 0 μsec).

おける信号処理時間である。ただし、FPGA の動作速度 (数十 MHz) および既存モジュールにおいても同程度の時間が実測できていることから、この遅延時間のほとんどは信号経路等によって決まる信号が Low レベルになるまでの時間と考えられる。よって本稿では、インターロック信号 (FPGA 入力) と MPS 信号により新モジュールの性能を評価する。

Figure 5 はノイズフィルタ性能の不感時間を $0 \mu\text{sec}$ に設定している場合の結果である。これより、Interlock 信号 (Interlock 信号 Low 状態) を検出後、 136 nsec 後に MPS 信号を出力していることが分かる。この応答時間は、FPGA の処理速度と素子によるものと考えられ、既存モジュールと同等であった。

次にフィルタ性能を $1 \mu\text{sec}$ 設定した場合の結果を Fig. 6 に示す。ここで Interlock 信号の Low 状態が $1.138 \mu\text{sec}$ 継続した後に MPS 信号が出力されたことが分かる。これは $0 \mu\text{sec}$ 設定時に得られたモジュール自体の遅延時間 (136 nsec) とフィルタによる不感時間 ($1 \mu\text{sec}$) によるものである。この結果より、既存モジュール同様のノイズフィルタ性能を有することが確認できた。

最後にフィルタ性能を $64 \mu\text{sec}$ 設定とした際の結果が Fig. 7 である。Figure 6 と同様に Interlock 信号検出後モジュール自体の遅延時間と設定した不感時間を足し合わせた $64.1 \mu\text{sec}$ 後に MPS 信号を出力している。これより、開発した新モジュールは、既存モジュールでは除去できなかった大きなノイズ (Fig. 3) の除去が可能であると言える。以上の結果より、既存モジュールの基本性能および改良・追加した機能を有する、新 MPS モジュールの

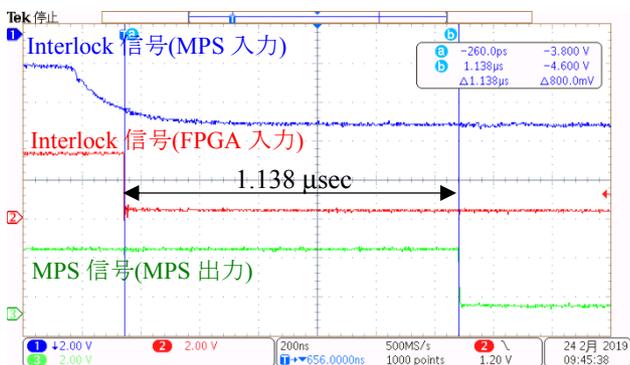


Figure 6: Response time of new module (Filter: $1 \mu\text{sec}$).

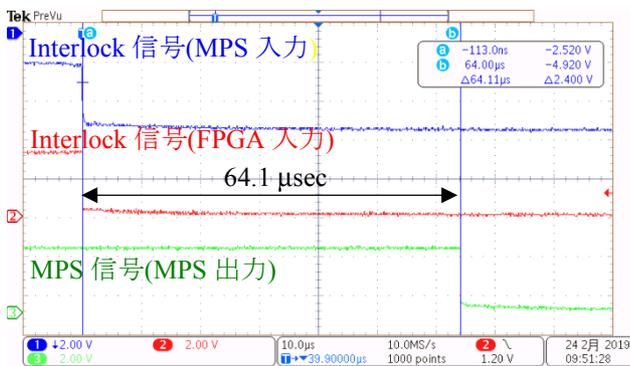


Figure 7: Response time of new module (Filter: $64 \mu\text{sec}$).

開発に成功した。

3.4 今後の予定

新 MPS シャーシおよび標準モジュールは、実機環境において長期 (1 週間以上) 設置した状態でノイズ等による誤動作が生じないことが確認できている。このようなノイズ環境での動作確認をさらに進めるとともに、 $64 \mu\text{sec}$ のノイズ除去性能については、実機と接続した性能確認を行う予定である。

次のステップとして、2019 年度は集約モジュールと E/O 変換モジュールの設計を進める予定である。一方、BLM モジュールについては、現在、モニタ Gr. によって設計が進められているデジタイザに、既存 BLM モジュールの一部機能を実装することが検討されており、デジタイザと新標準モジュールを組み合わせたロスモニタ用 MPS 系統の構築の検討も行っている。これに対しては、新標準モジュールが機器との取合い信号としてノイズに強い差動信号 (RS485) を入力できることから、新たな構成にも十分対応できると考えている。

また、2019 年度の夏期メンテナンス期間中には RCS の標準モジュールを新モジュールに更新する予定である。2020 年度以降については、集約モジュール、E/O モジュールおよび BLM モジュール開発の進捗に合わせて、順次これらの MPS モジュールの更新も進める予定である。

4. まとめ

J-PARC の機器保護システムは、J-PARC 稼働初期から 10 年以上の長期にわたり安定に動作してきた。これにより、J-PARC Linac および RCS ではビームによる損傷が生じることなく、安定なビーム運転を実現してきた。しかしながら既存 MPS モジュールで使用されている素子の多くは、今後入手が困難になることが明らかであることから、MPS モジュールの更新が必要不可欠である。

そこで、既存 MPS モジュールとシャーシ単位で混在可能な設計とした新 MPS モジュールの開発を開始した。そして開発した新モジュールが応答速度などにおいて既存モジュールと同等の性能を有すること、及び、追加・改良した機能を有することを確認した。特に既存モジュールでは対応不可であった大きなノイズの除去機能の実装に成功した。今回開発した新標準モジュールは 2019 年度より RCS MPS への実装を開始する。同時に、集約モジュール等の更新も進める予定である。

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] J. Chiba *et al.*, "PRESENT STATUS OF THE J-PARC CONTROL SYSTEM", Proceedings of ICALEPCS2003, Gyeongju, Korea, 2003, MO101.