

J-PARC Linac におけるビームロスモニター用 MPS モジュールの更新

UPDATE OF BLM MPS MODULE FOR J-PARC LINAC

高橋博樹^{#, A)}, 宮尾智章^{B)}, 加藤威^{A)}, 鈴木隆洋^{C)}

Hiroki Takahashi^{#, A)}, Tomoaki Miyao^{B)}, Takeru Kato^{A)}, Takahiro Suzuki^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

Machine Protection System (MPS) has been constructed to rapidly beam inhibit in abnormal events to minimize the damage by beam loss because J-PARC is a high-intensity accelerator. However, the existing MPS modules have been used since the beginning of J-PARC operation, and there is a risk that they may malfunction due to aging. Then, we started designing and developing the standard MPS module, the E/O conversion module and the signal integration module. And at present, some MPS modules for Linac and RCS have been updated with the new modules. On the other hand, existing MPS module for beam loss monitor (BLM MPS module) cannot be shared with standard MPS module because it has the comparator function. Therefore, it was developed as the comparator module, separating the comparator function from the MPS module. This comparator module will be combined with the standard MPS module to replace the existing BLM MPS module. This paper describes the development status of the comparator module at J-PARC Linac and the plan to update the BLM MPS module.

1. はじめに

J-PARC Linac は大強度の加速器であるため、異常が発生した際に高速にビームを停止させ、ビームロスによる影響を最小限にすることを目的とした機器保護システム (Machine Protection System: MPS) が構築されている [1-3]。

一方で、MPS を構成する既存の各種 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。そのため、MPS 標準モジュール、E/O 変換モジュールおよび信号集約モジュールの設計・開発を進め、現在では Linac および RCS の一部にて、新たな MPS モジュールの運用を開始している。既存のビームロスモニター (BLM) 用 MPS モジュールは、コンパレータ機能を有しており、入力された BLM の計測信号について、閾値 (外部入力電圧) より高い場合は MPS 発報する設計となっている。そのため、他の新 MPS モジュールとの共通化が難しい。

そこで、コンパレータ機能は MPS モジュールとは切り離してコンパレータモジュールとして開発し、これを新 MPS 標準モジュールと組み合わせることで、既存 BLM 用 MPS モジュールと同様の機能を実装することとした。本件では、Linac におけるコンパレータモジュールの開発状況と BLM 用 MPS モジュールの更新計画について報告する。

2. MPS モジュールの更新状況

既存の MPS モジュールは J-PARC 稼働開始時から使用されており、製造から 10 年以上が経っているため、経年化による不具合発生が懸念されている。また、主要部品の生産中止に伴う部品変更が必要不可欠な状況とな

っている。一方で、J-PARC Linac で使用されている MPS モジュールは約 200 台であるため、全体を一度に更新することは不可能である。そこで、既存 MPS モジュールとの混在が可能とすることを考慮した新 MPS モジュールの開発を 2019 年より開始した。現在、新 MPS 標準モジュール、新 E/O モジュール、新信号集約モジュール、新 MPS シャーシについて開発を終え、Linac、RCS および中央制御棟の一部について、新モジュールへの更新を完了している [4-5]。

一方で、BLM 用 MPS モジュールについては、開発を進めることを一時保留としていた。これは、BLM 用 MPS モジュールには、外部からの電圧 (閾値) と BLM 信号を比較し、閾値を超えた場合に MPS 信号を出力するコンパレータ機能が実装されており、アナログ信号の入出力があるため、他のモジュールとは大きくインターフェースが異なるためである。また同時期に、BLM の既存デジタル化においても経年化対策として更新が検討されていたため、コンパレータ機能が新デジタル化に実装される可能性があったことも一因であった。

3. コンパレータモジュールの開発

3.1 BLM 用 MPS モジュール更新の方針

上述した通り、標準モジュール等と BLM 用 MPS モジュールはインターフェース部分が異なるため、共存した場合は既存システムと同様に MPS シャーシのコネクタ等が複雑になってしまう。これは、長期的に維持管理を面倒にするものである。よって、「新 MPS モジュールにおいては、インターフェースの共通化を進めることとし、入出力はデジタル信号のみとする」こととした。

一方、BLM 用 MPS に必要不可欠なコンパレータ機能においては、「BLM 用デジタル化の開発状況に柔軟に対応可能とする」ことが求められる。また、J-PARC にお

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

ける今後の増強計画等を考慮して「コンパレータ機能の改良(機能追加)にも対応可能とする」ことも重要である。

以上を考慮し、BLM 用 MPS モジュールの更新について検討を行った結果、コンパレータ機能については、MPS モジュールから分離することとし、コンパレータモジュールを開発して機能を実装することとした。そして、開発したコンパレータモジュールと新 MPS 標準モジュールを組み合わせて、既存 BLM 用 MPS モジュールと同等の機能を実現することとした (Fig. 1)。

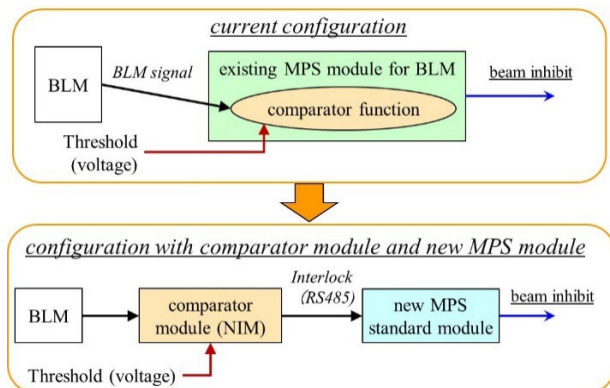


Figure 1: Direction to update the BLM MPS module.

3.2 コンパレータモジュール

コンパレータモジュールは、BLM からの信号 (BLM 信号) と外部からの電圧信号 (閾値) を比較し、閾値を超えた際に MPS 信号を新 MPS 標準モジュールに出力するコンパレータ機能を有する。BLM 信号はバッファアンプ (NIM) により分岐された信号が入力されることから、コンパレータモジュールはバッファアンプと同じ NIM モジュールで開発することとした。また、標準モジュールに出力される MPS 信号は、耐ノイズ性が高い差動信号 (RS485) とした。開発したコンパレータモジュールの仕様を Table 1 に、外観を Fig. 2 に示す。

次に、開発したコンパレータモジュールについて、MPS 信号出力までの遅延時間を測定した結果を Fig. 3 に示す。試験は、設定閾値を 1.0 V とし、BLM 模擬信号を 0.0 V から 2.0 V に変化させて行った。Figure 3 におい

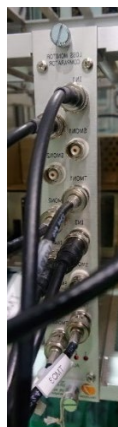
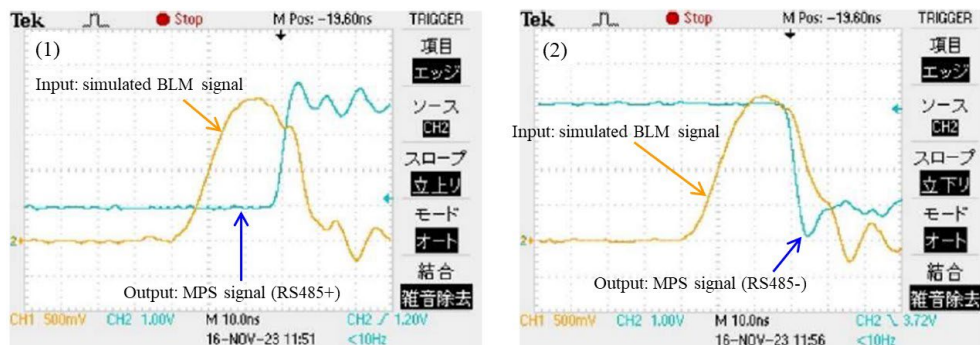


Figure 2: Appearance of comparator module.



Threshold setting	Simulated BLM signal	(1) Delay time of MPS signal (RS485+)	(2) Delay time of MPS signal (RS485-)
1.00 V	2.00 V	19.6 ns	19.6 ns

Figure 3: Delay time measurement of comparator module.

Table 1: Basic Specifications of Comparator Module

Dimensions	Single-width NIM module
Input	BLM signal: 4ch, Set signal for threshold: 4 Ch.
Output	Monitor of BLM signal: 4 Ch. Monitor of set signal for threshold: 4 Ch. MPS signal: 4 Ch. for each BLM signal Ch. (differential signal, RS485)
Connectors	Input: BNC 4 Ch. for BLM signal Push-in type 4 Ch. for threshold Output: BNC 4 Ch. x 2 = 8 Ch. for monitor Push-in type 4 Ch. for MPS signal
Function	Input BLM signal is compared with the threshold signal, and the MPS signal is output when the BLM signal exceeds the threshold signal. MPS signal is output within 30 ns after the threshold signal is exceeded. MPS signal is output for 1 ms when the irregularity is detected.

て、(1)は差動信号の+側の出力 (RS485+) を計測したものである。これより、BLM 模擬信号が閾値を超えてから RS485+ の信号が変化するまでの時間 (遅延時間) が 19.6 ns であることが分かる。同様に、(2)は差動信号の-側 (RS485-) を計測したものであり、遅延時間が 19.6 ns であることが分かる。この結果より、開発したコンパレータモジュールが、BLM 用 MPS に要求される高速なコンパレータ機能 (遅延時間: 30 ns 以内) を有していることが確認できた。

4. コンパレータモジュールと新 MPS 標準を組み合わせたシステム

4.1 動作確認試験

最後に、開発したコンパレータモジュールが実際の環境にて正常に動作することを確認した。

まず、開発したコンパレータモジュールと新 MPS 標準モジュールを組み合わせたシステムを、Linac 棟ギャラリの ACS09 ラック列に構築した (Fig. 4)。そして、コンパレータモジュールの BLM 信号入力 Ch.1~Ch.4 には、バッファアンプで分岐された BLM ACS09B の信号を入力した。

Figure 5 に、本試験におけるコンパレータモジュール及び新 MPS モジュールの監視操作画面を示す。ここで、Ch.3 および Ch.4 には、既存システムと同じ 1.5 V を閾値として設定している。一方、Ch.1 及び Ch.2 には、それより低い 1.0 V を閾値として設定している。これは、Ch.3 および Ch.4 の発報が、BLM 信号が閾値を超えたことによるものか、MPS 信号にノイズが入ったことによるものかを区別することを目的としている。Figure 4 から分かる通り、コンパレータモジュールとバッファアンプは同じ NIM クレーン内にあるため、BLM 信号入力の全 4Ch.の内、何れかの Ch.にだけノイズが入るとすることは考え難い。一方で、コンパレータモジュールと新 MPS 標準モジュール間は 10 m 程度離れているため、耐ノイズ性の高い差動信号ではあるが、MPS 信号にノイズが入る可能性は否定できない。ここで、BLM 信号が既存の閾値 (1.5 V) を超える場合は、Ch.3 および Ch.4 だけでなく、Ch.1 および Ch.2 も発報する。しかし、MPS 信号にノイズが入った場合は、Ch.3 または Ch.4 が発報した際に、Ch.1 および Ch.2 は発報しないと考えられる。この様に、Ch.1~Ch.4 の発報状態から、正常な発報か、ノイズによる発報かを、判断することが可能となる。

以上の構成、設定閾値としたシステムについて、既存 BLM 用 MPS モジュールの発報と比較することで、誤発報および未発報が無いことを確認する長期動作確認試験を、2024 年 3 月下旬~6 月下旬の約 3 ヶ月間行った。

Figure 6 は、動作確認試験中における、既存 BLM 用 MPS モジュール発報状態の一例と新 MPS 標準モジュール発報状態の一例を示したものである。前者は、サブシフトリーダーが記録する運転ログより BLM ACS09B の MPS 発報事象を抽出したものであり、後者は新 MPS 標準モジュールの発報状態を表す EPICS レコード (LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK) 値のログである。新 MPS 標準モジュールの発報状態は、正常時:各ビット=1、発報時(閾値を超えた時):各ビット=0 であるので、EPICS レコードの値は、正常時:255、既存システムと同じ閾値での発報時:240 となる。ここで、Fig. 6 において既存システムで ACS09B が発報となった日時と、新システムで EPICS レコード値が 240 になった日時を比較すると、数秒の差があることが分かる。これは、2 つのシステム間では情報伝達等に差異があることによるものである。よって、数秒の差については、同一時刻であると判断して良い。同様に、長期動作確認試験期間中における発報状態の比較を行い、ビーム運転中において、既存システムと新システムの発報日時は同じであることが確認できた。つまり、新システムにおいて、誤発報および未発報が発生していないことが確認できた。この結果より、開発したコンパレータモジュールと新 MPS 標準モジュールを組み合わせたシステムが、既存システムと同等の基本性能を有していることが確認でき、BLM 用 MPS モジュール更新の目処を得ることができた。

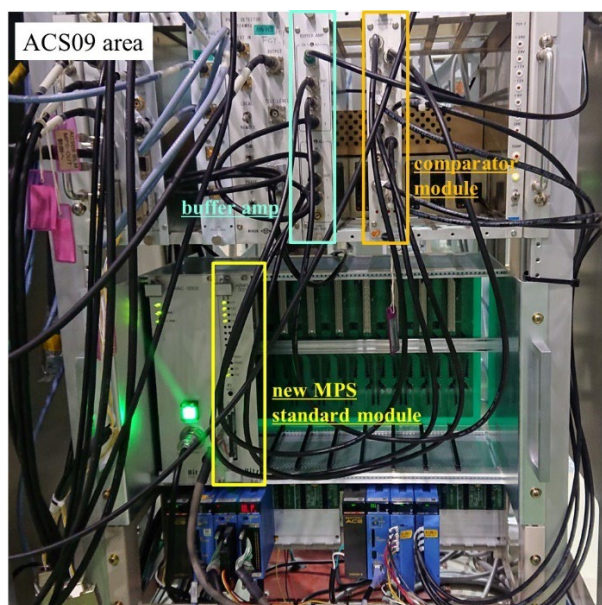


Figure 4: Configured system with a comparator module and a new MPS standard module.

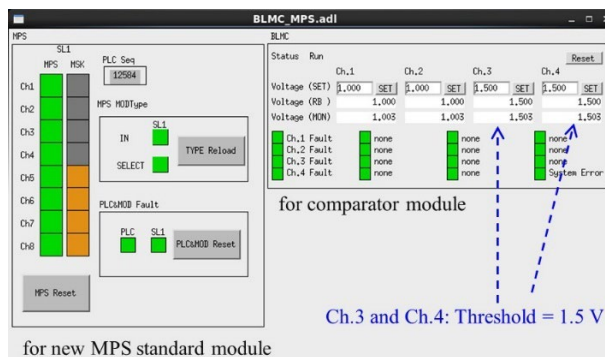


Figure 5: Operation interface for a comparator module and a new MPS standard module.

2024-05-20 05:29:14	LI:SDTL05 RF MPS発報 自動復帰 BLM MPS発報 リセット復帰 (ACS03B 02, ACS09B 02, ACS12B 02, ACS15B 02, ACS16B 02, ACS17B 02, ACS20B 02, L3BT 08, 18, 21) 計10箇所 MLF:利用運転停止
2024-05-25 19:26:15	LI:DTL3 RF MPS発報 自動復帰 BLM MPS発報 リセット復帰 (ACS07B 02, ACS09B 02, L3BT 04, 08) 計4箇所 MLF:利用運転停止
2024-05-27 16:23:55	LI:SDTL10 RF MPS発報 自動復帰 BLM MPS発報 リセット復帰 (SDTL09B 02, ACS09B 02, ACS15B 02, ACS16B 02, L3BT 18, 21, 23) 計7箇所 MLF:利用運転停止

Example of the alarming status of the existing MPS module for BLM (operation log)

LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-20 05:29:16.666834 240
LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-20 05:29:26.732212 255
LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-25 19:26:16.688156 240
LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-25 19:26:24.235649 255
LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-27 16:23:56.390814 240
LI_KLYG:MPS:STAT:SL1_ILK	2024-05-27 16:24:04.945997 255

Example of the alarming state of the new MPS module (EPICS record)

Figure 6: Operation interface for a comparator module and a new MPS standard module.

4.2 課題

新システムの動作確認試験中において、ビーム運転後の加速器停止操作中に、新 MPS 標準モジュールの「Ch.1 と Ch.2 発報 (EPICS レコード値=252)」または「全 Ch.発報 (EPICS レコード値=240)」を数回確認されている。これは、サブシフトが ACS09 付近の GV 閉操作を行った際に、何らかのノイズが発生し、それが BLM 信号に入ったことにより、コンパレータモジュールが MPS 信号出力したためと考えられる。

既存 BLM 用 MPS モジュールにおいては、コンパレータ機能に数 100 ns の不感時間が設定されており、BLM 信号が閾値を不感時間以上超えた時に発報するようになっている。一方、開発したコンパレータモジュールには不感時間の設定がないため、ノイズ等で一瞬でも閾値を超えた場合は MPS 信号出力となる。今回の動作確認試験においては、ビーム運転中の誤発報はなかった。しかしながら、コンパレータモジュールは安全系に係る重要な機器であることから、更なる安定動作に向けたノイズ対策が必要であろう。

4.3 開発計画

4.2 の課題を解決するために、コンパレータモジュールのノイズによる誤発報の可能性を無くすため、不感時間を設定可能とする改良を行う予定である。不感時間は、Dip SW 等により任意 (0 ns~2,550 ns、10 ns 刻み) に設定可能とする予定である。

一方、Linac のビームは、ビーム行先 (Material and Life Science Experimental Facility / Main Ring) によりビーム強度が異なる。そのため、BLM 信号の MPS 発報閾値を行先毎に変更可能とすることが、MPS の新たな機能として実現することが重要となっている。そこで、開発したコンパレータモジュールをベースに、1 つの BLM 信号に対して閾値を 2 種類設定可能とし、行先信号により閾値を切り換える機能をコンパレータに追加する予定である。

現在、以上の 2 機能を追加したコンパレータモジュールを 2025 年 2 月までに開発し、これを実機に実装して 2025 年夏まで動作確認を行う計画である。そして、2025

年秋から、改良したコンパレータモジュールと新 MPS 標準モジュールを組み合わせた構成により、既存 BLM 用 MPS モジュールの更新を順次進める計画である。

5. まとめ

既存 BLM 用 MPS モジュールについて、新 MPS モジュールのインターフェース共通化、並びに、デジタイザの開発等に柔軟に対応可能とすることを考慮し、コンパレータモジュール (NIM) と新 MPS 標準モジュールを組み合わせた構成として、更新を進めることとした。そして、開発したコンパレータモジュールが、応答速度などにおいて十分な性能を有することを確認した。また、長期動作確認の結果より、提案した構成による BLM 用 MPS モジュール更新の目処を得た。今後は、より高い耐ノイズ性を有し、且つ、ビーム行先により閾値切り換えが可能なコンパレータモジュールの開発を進め、BLM 用 MPS をより有用なシステムに更新する予定である。

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 モジュールの更新”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, 2019, pp. 271-274.
- [5] H. Takahashi *et al.*, “J-PARC Linac および RCS の MPS モジュールの更新 (2)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, 2021, pp. 914-917.