

J-PARC MR-MPS を用いた即時アボートシステムの開発 DEVELOPMENT OF A MS-ABORT SYSTEM VIA J-PARC MR-MPS

木村琢郎[#], 上窪田紀彦, 佐藤健一, 山田秀衛, 石井恒次, 芝田達伸, 杉本拓也

Takuro Kimura [#], Norihiko Kamikubota, Kenichi Sato Shuei Yamada

Koji Ishii Tatsunobu Shibata Takuya Sugimoto

KEK/J-PARC Center

Abstract

Machine Protection System (MR-MPS) is used to aggregate interlock (ILK) signals of each equipment in J-PARC Main Ring (MR), since the start of operation in 2008. When an abnormality occurs, the MPS signal is used to stop the beam operation and the beam is appropriately processed. It guarantees the safety of the accelerator and the experimental facility. In addition, the MR-MPS performs beam stop processing so that the availability of the accelerator can be maximized by using the two types of beam stop processing, ALL stop and MR inhibit, depending on the equipment that occurred the ILK. Furthermore, beam abort processing is performed so as not to extract inappropriate beams to the experimental facility. In this paper, we explain the immediate abort (ms-Abort) system with fast extraction (FX) which began operation in the fall of 2017. We explain the effect of introducing ms-Abort in the way of ILK signal processing in MR-MPS, upgrading FX-kicker which enabled ms-Abort, and beam operation.

1. はじめに

J-PARC は 400 MeV の線形加速器(Linac)、3 GeV の Rapid Cycling Synchrotron(RCS)、30 GeV の Main Ring (MR) の 3 つの加速器と RCS からのビームを利用して実験を行う物質・生命科学実験施設(MLF)、MR からビームを利用して実験を行うニュートリノ実験施設(NU)、ハドロン実験施設(HD)の 3 つの実験施設で構成される[1,2]。

MR ではビーム運転を開始した 2008 年から Machine Protection System (MR-MPS)を用いて機器保護・施設保護を行っている[3]。MR-MPS では MR 及びその実験施設の各機器のインターロック(ILK)信号を集約することで、ILK 発報時にビーム運転の停止とビームアボート処理を行っている。ビーム停止処理は J-PARC の全加速器の運転を停止する All-stop と MR のみの運転を停止する MR-inhibit の 2 種類の MPS 信号が存在する。2 種類の MPS 信号は ILK を発報した機器の影響範囲を考慮して適切に選択される。また、いずれかの機器が ILK を発報した際には、一部の例外の機器を除いてのビームアボート処理を行うための Abort 信号が出力される。これらの MPS 信号は ILK 発報時にリアルタイムに処理され出力される。しかし、MPS 信号を受けて、ビーム運転停止処理が即座に行われるのに対して、ビームアボート処理は Fig. 1 に示す MR の運転周期のどのタイミングで ILK が発報したとしても、必ず P3 (P4-1ms) タイミングまで待機してアボート処理を行っていた。スケジュールされたタイミングでのみでしかアボート処理が行えなかった理由は、アボート処理を行う速い取り出し電磁石(FX-kicker)電源の性能により限定されるものであった。MR が大強度化を目指しビーム強度が増強されていく中で ILK 発報時にスケジュールされたタイミングでのみでしかビームアボートが行えなかった現状はビームロスによる高放射化リスクや機器損傷などの可能性もあったため大きな懸念材料と

• FX Operation 2.48s

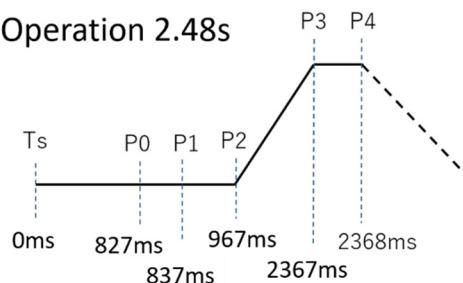


Figure 1: MR timing pattern for Fast Extraction.

なっていた。そのような中 2017 年の夏期メンテナンスにおいて FX-kicker 電源のアップグレードが行われ、リアルタイムでの即時アボートが可能となった[4]。

本稿では、FX-kicker 電源のアップグレードにより可能となった即時アボートシステム(以前 Fast-Abort と仮称していたが、ILK 発報から 1 ミリ秒以内でのアボート処理が可能ということから ms-Abort と呼称することとなった)について、FX-kicker 電源のアップグレード、MR-MPS 装置から FX-kicker 電源までの信号処理について説明を行い、実際のビーム運転での ms-Abort システム導入の効果、現在までの運用について示す。

2. FX-kicker 電源のアップグレード

FX-kicker 電磁石システムは Fig. 2 の模式図のように、集中定数型の kicker 電磁石とそれを励磁するパルス電源がそれぞれ 5 台ずつで構成されている。また、FX-kicker 電源ではニュートリノ側とアボートダンプ側の 2 つのサイラトロンが存在し、サイラトロンへのトリガ信号入力を制御することで速い取り出しとビームアボートの蹴り分けを行うことができる。この FX-kicker 電磁石システムは 2010 年から運用されているが、定格である 33kV まで 1.8 秒の時間を要していた。一方で、MR では大強度化を目指すにあたり、運転周期を 2.48 秒から将来的に 1.16 秒まで短

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

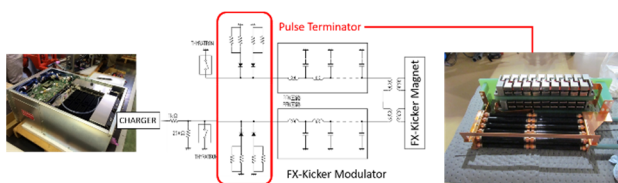


Figure 2: Pattern diagram of the FX kicker magnet system.

縮することも計画されている[5]。そのため FX-kicker 電磁石システムでも MR の高繰り返し運転に対応可能な高速充電器の導入を 2017 年の夏に行った。その結果、定格電圧までの充電時間を大幅に短縮することに成功した。高速充電器の導入前後での充電の繰り返し速度の比較を Fig. 3 に示す。この高速充電器の導入により、Fig. 4 に示すように以前は MR の加速パターンに FX-kicker の充電パターンを追従させることができず、スケジュールされた 30GeV で の 取 出 し タ イ ミ ン グ に 合 わ せ て 充 電 行 っ て いた の 対 して、MR の 加 速 パ タ ー ン に ほ ぼ 追 従 する FX-kicker の 充 電 パ タ ー ン を 作 成 する こ と が でき た。これにより MR の 各 機 器 が ILK を 発 報 し た 際 に MR-MPS より ms-Abort を リ ク エ ス ト す る ト リ ガ 信 号 を FX-kicker 電 磁 石 シ ス テ ム に 送 る こ と で、任 意 の タ イ ミ ン グ で ア ボ ー ト 処 理 を 行 う こ と が 可 能 と な っ た。

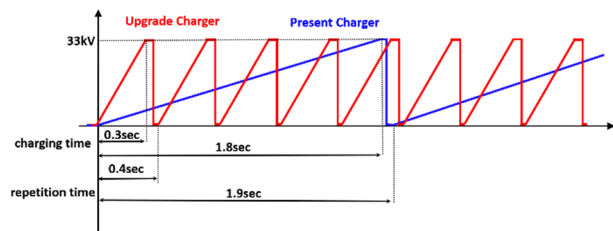


Figure 3: Comparison of charging speed of Upgrade Charger and Present Charger.

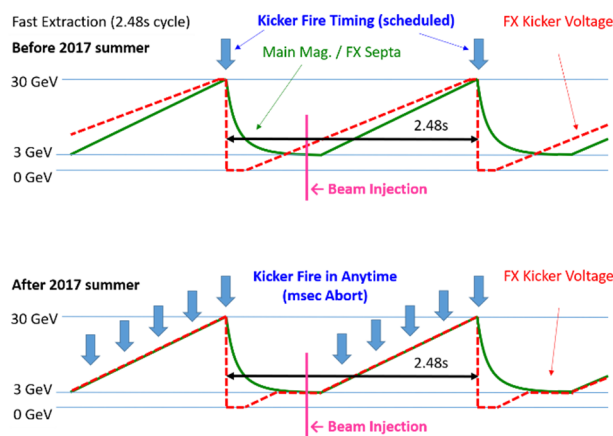


Figure 4: Comparison of charging pattern of Upgrade FX-kicker system and Present FX-kicker system.

3. MR-MPS による ms-Abort 信号処理

MR-MPS では MR の 運 転 状 態 に 応 じ て、ど の 機 器 の ILK 信 号 の 監 視 を 行 う か、監 視 状 態 の 機 器 が ILK を 発

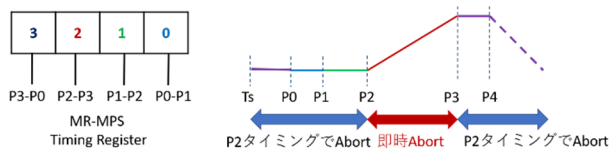


Figure 5: ms-Abort signal pressing timing.

報した際に、どの MPS 信号(MR-inhibit や Abort など)を出力するか、また MR の 運 転 パ タ ー ン の ど の タ イ ミ ン グ で MPS 信 号 を 出 力 す る か な ど 細 か く 設 定 が 可 能 で 有 る。ま ず ms-Abort シ ス テ ム の 導 入 に あ っ て ms-Abort と い う MPS 信 号 出 力 の 追 加 を 行 っ た。ms-Abort 信 号 の 出 力 条 件 は 以 下 の と お り で 有 る。速 い 取 出 し (FX) 運 転 時 の ビ ー ム 行 先 が NU の 状 態 で 有 る と き、ま た ILK 信 号 の 監 視 対 象 機 器 は、従 来 の Abort 処 理 を 必 要 と し て 有 る 全 て の 機 器 を 対 象 と し た。さ ら に ms-Abort 信 号 の 出 力 タ イ ミ ン グ に つ い て は Fig. 5 に 示 す よ う に、タ イ ミ ン グ マ ス ク と 呼 ば れ る 4 つ の レジスタ を 用 い て、MR へ の ビ ー ム 入 射 終 了 直 後 (P2) か ら 加 速 終 了 後 の ビ ー ム 取 出 し (P3) の 区 間 の み を リ ア ル タ イ ム に 信 号 出 力 を 行 い。P3 以 降 に ILK 発 報 が あ っ た 際 は 次 の 運 転 周 期 の P2 タ イ ミ ン グ ま で は 信 号 出 力 を 行 わ な い よ う に 設 定 し た。こ れ は FX-kicker 電 源 が MR の 運 転 1 周 期 に 対 し て 1 度 の 充 電 開 始 ト リ ガ に よ り 充 電 を 開 始 し、取 出 し ト リ ガ を 1 度 の み 受 け 付 け 取 出 し を 行 う 仕 様 に 起 因 す る も の で 有 る。仮 に MR の 運 転 周 期 の 全 区 間 で リ ア ル タ イ ム に 信 号 出 力 を 行 っ て し ま う と、ILK の 発 報 の タ イ ミ ン グ 次 第 で は MR へ の ビ ー ム 入 射 終 了 前 に ms-Abort 処 理 を 実 行 し て し ま い、そ の 後 ビ ー ム 取 出 し を 行 え な く な る 事 態 を 避 け る た め で 有 る。

こ の よ う に ms-Abort 信 号 が MR-MPS より 出 力 さ れ る よ う 設 定 を 行 っ た が、こ れ を FX-kicker 電 源 へ の 入 力 ト リ ガ と し て 変 換 し、実 際 に 運 用 を 行 う た め に Fig. 6 に 示 す 回 路 の 追 加 を 行 っ た。Fig. 6 の 上 部 の 枠 線 内 は 通 常 時 NU へ ビ ー ム 取 出 し を 行 う 際 の ト リ ガ 信 号 出 力 回 路 で 有 る。ま た、中 央 の 枠 線 内 は ILK 発 報 時 に NU 側 へ の 取 出 し を 抑 制 し、従 来 の (scheduled) Abort ト リ ガ 出 力 を 行 う 回 路 で 有 る。最 後 に 下 部 の 枠 線 内 が 2017 年 夏 期 メ ン テ ナ ン ス で 追 加 し た ms-Abort 信 号 出 力 回 路 で 有 る。MR-MPS の ms-Abort 信 号 が 正 常 状 態 か ら 発 報 状 態 へ 遷 移 す る 立 ち 下 り を 微 分 回 路 で 検 出 し ト リ ガ 信 号 に 変 換 し て

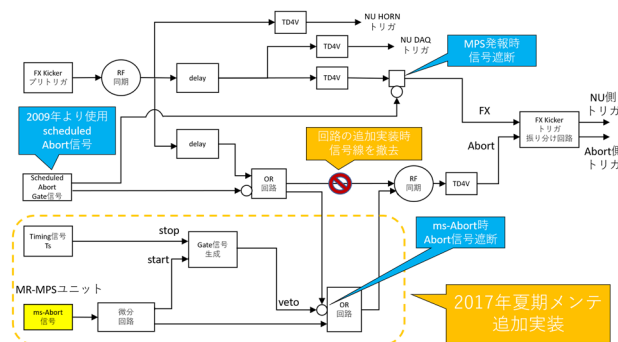


Figure 6: Circuit diagram of ms-Abort signal.

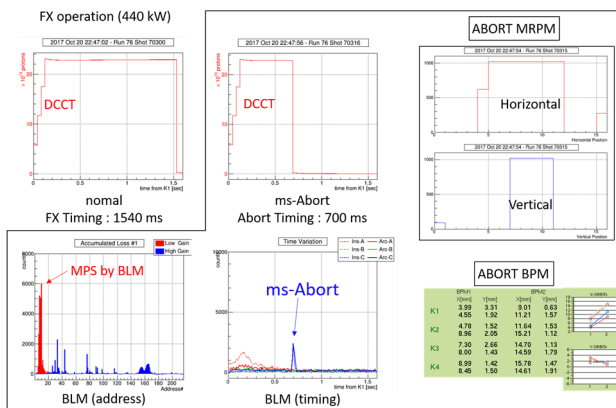


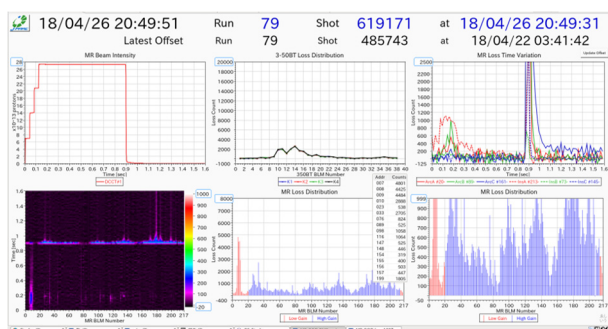
Figure 7: ms-Abort 1st event.

いる。また、Abort 信号と ms-Abort 信号の両方の出力信号を用いることで、ms-Abort 信号が正常に出力された場合は Abort 信号を抑制し、万が一 ms-Abort 信号が出力されなかった場合は、従来の Abort 信号を用いる安全面を考慮した 2 段構えとなっている。さらに、ここで生成された ms-Abort トリガ信号は、ms-Abort が正常に行われていることを確認するため、MR アポルトラインに設置されているビーム位置検出器(ABORT BPM)やビームプロファイルモニター(ABORT MRPM)などのモニター系のトリガ入力としても使用される[6,7]。

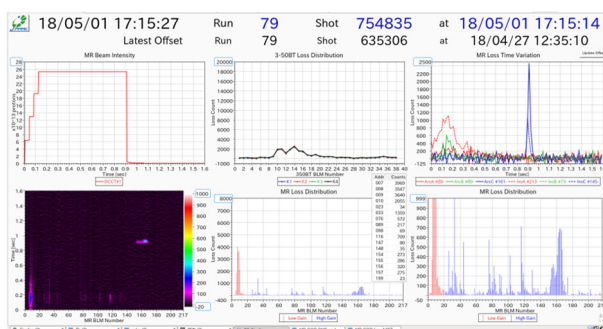
4. ms-Abort システムの運用状況

前述の通り ms-Abort システムは大きく分けて MR 機器と実験施設の ILK 信号を監視する MR-MPS とビーム取り出しを行う FX-kicker 電磁石システムで構成される。ms-Abort システムは 2017 年夏期メンテナンス時に導入され、それぞれのシステム及び全体システムのオフラインでの試験を繰り返し想定通りの動作を行うことを確認したうえで、2017 年 10 月の NU 利用運転から運用を開始した。ms-Abort が行われた最初の事象を Fig. 7 に示す。参考のため上段左に正常運転時の MR 周回ビームを DCCT でとらえたグラフを示すが、上段中央と比較すると正常時は 1540 ミリ秒の P3 タイミングで NU へのビーム取

り出しが行われているのに対して、ms-Abort が行われた際は 700 ミリ秒のところでビームアポルトが行われていることがわかる。下段左図のこの時の MR の 4 極電磁石全 216 台に設置されたビームロスモニター(BLM)で測定される 1 周期でのビームロスの積算値がコリメータエリアでの閾値に達したため、BLM にて ILK が発報し ms-Abort が行われた。下図中央は MR を大きく 3 つの曲線部と 3 つの直線部に分け、ビームロスの時間分布を示すものである。700 ミリ秒付近のビーム加速途中でインスタビリティが発生しビームロスが増大していることと、ms-Abort を行ったことでビームロスのさらなる増加を抑えられていることもわかる。また右図は ms-Abort を行った際、正常にビームアポルトが行われていることを ABORT BPM や ABORT MRPM でとらえることもできている。その後も何度となく ms-Abort を行う事象が発生しているが、すべて想定通りの動作を行いビームロスによる機器の高放射化や損傷のリスク低減に非常に有効なツールとなっていることが示されている。また ms-Abort システムを運用していく中で Fig.8 に示すような事象が発生した。左右のどちらも RF 電源の 1 台がトリップした際の DCCT とビームロスの様子を示したものである。Fig. 8 (a)は ms-Abort を導入していないビーム行先 Abort でビーム調整を行っていた時のもの。Fig. 8 (b)はビーム行先 NU で利用運転を行っていた時のものである。どちらもほぼ同時刻に RF 電源がトリップしているが ms-Abort が行われていない左図では MR 全域で非常に大きなビームロスが発生しているのに対して、右図では RF 電源の ILK 発報直後に ms-Abort が行われているため大幅にビームロスを低減できていることがわかる。ms-Abort の有効性を顕著に表した事象といえるが、MR のビーム調整中も大きなリスクがあることを再認識した。この事象をうけて、ms-Abort システムの導入から半年以上が経過しており安定した動作の実績も確認されたため、2018 年 5 月からは ms-Abort を NU 利用運転時のみならず、MR ビーム調整中のビーム行き先 Abort 時にも行うよう適用範囲を拡大し、さらなる安全性向上を行った。



(a) MPS by RF w/o ms-Abort (Beam destination Abort)



(b) MPS by RF ms-Abort (Beam destination NU)

Figure 8: Performance comparison of the using ms-Abort system.

5. おわりに

2017年夏期メンテナンスまでのFX-kicker電磁石システムのアップグレードによりMRでの即時アポートが可能となった。そのためMR-MPSとFX-kicker電磁石システムを含めたms-Abortシステムの導入を行い、2017年10月からNU利用運転でのms-Abortの運用を開始した。以降、様々なMR機器でのILK発報事象でms-Abortの有効性が示された。さらにはms-Abortの安定した運用実績とその効果から適応範囲を2018年5月からはMRのビーム調整運転にまで拡大させた。MRでの即時アポートはMRのビーム運転開始当初から待ち望まれてきたものであったが、ms-Abortシステムの導入によって、機器の放射化や損傷のリスクを大幅に低減させることに成功した。今後も安定したms-AbortシステムによるMR及び実験施設の安全性の担保が期待される。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “Performance and Status of the J-PARC Accelerators”, Proc. of IPAC 2017, Copenhagen, Denmark, May 14-19, 2017, pp. 2290-2293.
- [2] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator Based Neutrino Experiments T2K J-PARC”, Proc. of 13rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 14-18.
- [3] T. Kimura *et al.*, “Performance evaluation of MR-MPS and development plan of new MR-MPS for J-PARC”, Proc. of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, August 1-3, 2017, pp. 1148-1150.
- [4] T. Sugimoto *et al.*, “Upgrades of fast extraction kicker magnet system for J-PARC main ring”, Proc. of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, August 1-3, 2017, pp. 1061-1064.
- [5] S. Igarashi *et al.*, “Study on the beam intensity upgrade of J-PARC MR”, Proc. of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, these proceedings.
- [6] T. Toyama *et al.*, “Beam Diagnostics at the First Beam Commissioning of the J-PARC MR”, Proc of PAC09, Vancouver, BC, Canada, Nov. 2009, paper WE4GRC01, pp. 1964-1966.
- [7] T. Toyama *et al.*, “Operating experiences of the J-PARC MR BPMs”, Proc of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, pp. 250-252.