

DEVELOPMENT OF FAST BEAM-STOP SYSTEM USING RF CHOPPER

Nobuhiro Kikuzawa^{1,A)}, Takahiro Suzuki^{A)}, Yuichi Ito^{A)}, Akihiko Miura^{A)}, Shinpei Fukuta^{A)}, Masanori Ikegami^{B)}, Hiroyuki Sako^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A)}, Hiroyuki Suzuki^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}

^{A)} JAPAN Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

To avoid heat damage and radioactivation by beam loss of the J-PARC accelerator, Machine Protection System (MPS) has been developed. Actually, high responsibility and high reliability have been achieved in J-PARC. Beam-stop method in addition to a way of RFQ OFF has been requested in order to avoid damage to the RFQ. Therefore, we have been developing a fast beam-stop system by using a RF chopper. The fast beam-stop system, including beam test, is described in this paper.

RF チョッパーによる高速ビーム遮断システムの開発

1. はじめに

J-PARC では大強度陽子ビームを加速するため、そのビームが加速器構成機器にダメージを与えないよう、機器保護システム (Machine Protection System, MPS) が設置されている^{[1][2][3]}。MPS は加速器構成機器の表面における熱衝撃を避けるために高速応答性が要求されており、高速かつ確実にビームを停止させる方法として RFQ 部の RF を OFF している。しかし、MPS 発報時に RFQ の停止/復帰を繰り返すことによって RFQ にダメージを与えることが考えられるため、RF チョッパーを利用した高速ビーム遮断システムの開発を行った。

RF チョッパーは RCS でのビーム損失を低減することを目的として、RCS への入射に合わせたチョップビームを生成するために RFQ 直後の Linac の低エネルギー部 (MEBT: 3 MeV RFQ と DTL の間のビーム輸送系) に設置されている。RF チョッパーはビームを横方向に蹴り出す電場を発生する高周波偏向空洞 (チョッパー空洞) と高周波偏向空洞で蹴り出されたビームを取り除くスクレーパから構成される。この RF チョッパーを用いて、マクロバンチを構成するマイクロバンチのうち約 46% をエネルギーが低いうちに間引いておくことによって、RCS 入射のための中間バンチ構造を形成する。このチョップビームの立ち上がり立ち下がり時間は 10 ns と高速であり、チョップパルス列は自在にコントロール出来る^[4]。

この RF チョッパーを MPS 発報により駆動し、全ビームをチョップする (全チョップ) ことによってビームを高速に遮断するための MPS サブシステムを開発した。このサブシステムは RF チョッパーが

正常に動作していることを判断し、正常に動作可能な場合には RF チョッパーによるビーム遮断を行い、RF チョッパーが異常の場合には従来の RFQ を OFF することによってビーム停止を行う。本報告では、開発した MPS サブシステムおよび MPS 全チョップによるビーム遮断実験を行った結果について述べる。

2. MPS システム

機器保護を考慮した MPS の設計は以下の方針で行ってきた。

- MPS では、ビーム挙動異常が検知されると、高速にビームを停止させる動作を行う。
- ビーム停止後の運転再開は待ち時間が短く、再開後のビーム特性の再現性を高くする。
- 誤動作が少ない信頼性の高いシステムにする。
- 長期的な保守性、汎用性が高いシステムにする。

MPS 発報時は RFQ 部の RF を遮断することにより異常検知時の高速ビーム停止を実現している。さらに、共用施設としてのビーム運転を考慮した場合、MPS にはビームを高速停止するだけでなく、施設の稼働率を向上させること、および、ビームの安定供給を実現するビーム停止・復帰機能が要求される。しかし、加速電力を遮断し続けると RFQ 空洞内の温度が急激に低下してしまう。この場合、RFQ は熱変化に弱くビーム停止前の安定状態に戻すまでには数十分程度の時間を要してしまうため、ビーム再開を短時間で行うことができない。また、運転再開時にビーム加速タイミング領域で RFQ を復帰させた場合、不安定なビームが加速される可能性がある。不安定なビームはビームロスに繋がるため、このような運転再開を避けるための復帰手順が必須である。これらの要求に対して、ハードウェアロジックによ

¹ E-mail: kikuzawa.nobuhiro@jaea.go.jp

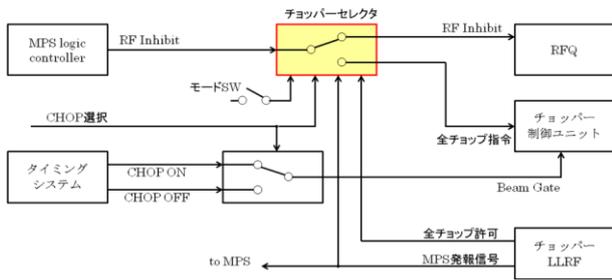


図 1 : システム構成。

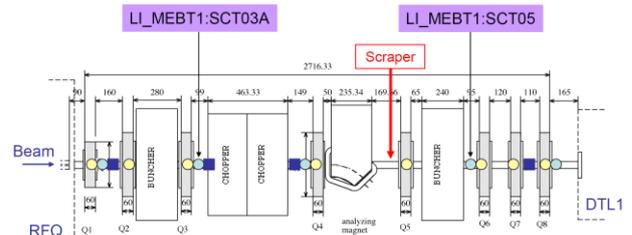


図 2 : MEBT 部のレイアウト。

る MPS および MPS サブシステムを構築してきた^[5]。現在のロジックは、MPS 発報により RFQ を OFF にしたのち、次のマクロパルスからはイオン源のゲートタイミングを加速タイミングからずらすことによりビームを停止し、RFQ の RF を ON にしている。しかし、この RFQ 立ち上げに失敗すると空洞が冷えてしまうという問題があった。

J-PARC が供用運転を開始し、施設の稼働時間が伸びるにつれて、MPS によるビーム停止から復帰までの時間の短縮化が必要となった。また、RFQ の停止/復帰を繰り返すことによって RFQ にダメージを与えることが考えられるため、RFQ の停止を伴わない高速ビーム遮断の手段が要求されるようになった。これらの要求を満たすために MPS サブシステムとしてチョッパーセレクタを開発した。図 1 に MPS サブシステムの構成を示す。

ビームロスを最小限にするためには、確実にビームを遮断することが求められる。このため、以下の項目をチェックし、安全に配慮している。

- ・モード SW が全チョップ許可モードに選択されていること。
- ・チョッパーLLRF が MPS を発報していないこと。
- ・チョッパーLLRF から全チョップ許可信号が出ていること。
- ・CHOP ON が選択されていること。

チョッパーセレクタは上に示したような動作状況を判断し、RFQ によるビーム停止か RF チョッパーによるビーム停止かの切り替えを行う。これらの判断はハードウェアロジックによって行われる。

3. RF チョッパーによるビーム遮断試験

3.1 信号試験

ビームによる動作試験を行う前に信号試験を行い、各条件での正常動作を確認した。MPS 発報はタイミングシステムから疑似 MPS 信号を作り、ビームの 200 μ s のマクロパルス幅の先頭から 100 μ s の位置で発報させた。動作条件によって RFQ または RF チョッパーが正しく選択されて駆動されることを確認した。この時、疑似 MPS 発報から RF チョッパーの駆動までの時間は約 2 μ s であった。

3.2 ビーム試験

ビーム試験については、MEBT 部に設置した RF

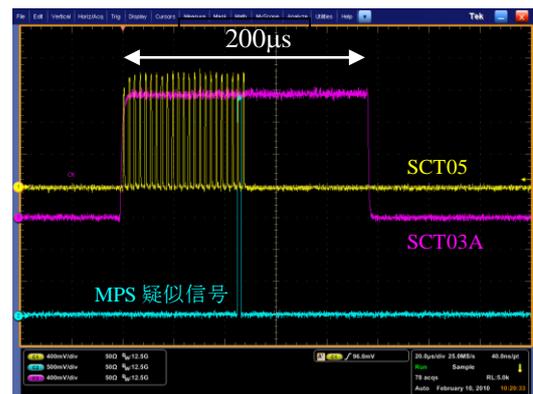


図 3 : 全チョップ時の電流波形。(20 μ s/div)

チョッパー前後の電流モニタを使用して行った。MEBT 部のレイアウトを図 2 に示す。MPS 信号についてはタイミングシステムから疑似発報信号を発生させて試験を行った。RF チョッパーの上流および下流に設置した電流モニタ (SCT03A および SCT05) でビーム電流の測定を行った。オシロスコープによる測定結果を図 3 に示す。MPS 発報以降、RF チョッパー前の SCT03A では電流が観測されているが、RF チョッパー下流の SCT05 では電流が遮断されていることがわかる。この時、MPS 発報から全チョップまでは約 3~4 μ s であった。

RF チョッパーの位相が正しく調整されている場合、RF チョッパーが働いている時間帯のビーム信号は MEBT 出口では測定限界以下である^[5]。これは、各 Run の冒頭に行われる RF チョッパーの位相スキャンによっても確認されている。位相スキャンの結果では、RF チョッパーの位相が +40° ~ -30° という広い範囲でビーム信号は測定限界以下であり、位相の誤差に対する許容度が高い。

4. 考察

RFQ および RF チョッパーによるビーム停止時のビーム立下りの比較を図 4 に示す。MPS 発報から RF チョッパーによるビームチョップまでは約 3~4 μ s、RFQ による停止の場合で 4~4.5 μ s であり、MPS 設計当初のビーム遮断までの時間が 5 μ s という要求を満たす結果であった。また下流の電流モニタでビームは観測されなかった。これは RF チョッパーを MPS 発報時のビーム遮断手段として利用可能であることを示している。

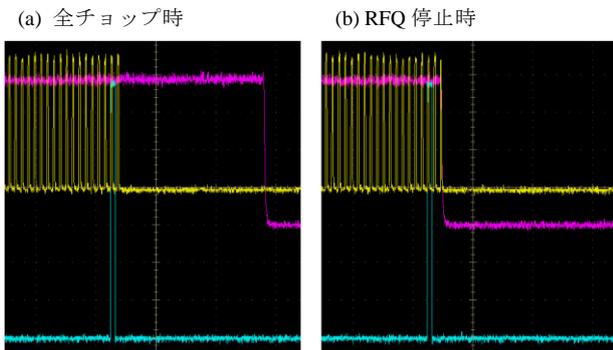


図4：ビーム立下りの様子。(a)全チョップ時、(b)RFQ 停止時。(20μs/div)

RF チョッパーによる停止と比べて RFQ による停止が 1~1.5 μs 遅い理由として、(1)チョッパーセレクトがチョッパー制御ユニットの近くに設置されているのに対して、RFQ へはケーブル長で 15 m 程度あること、(2)チョッパーセレクト内部で RF チョッパー行きの信号と RFQ 行きの信号とで回路構成が異なること、などが考えられる。

全チョップによるビーム遮断の問題として、大電流のビームをスクレーパに当たった場合に真空悪化により MPS が発報する可能性があることである。この場合、真空の回復に時間がかかるため、ビーム運転再開までに時間を要する。このため現在は全チョップ運転をすることが予定されている場合、あらかじめビームによりビームスクレーパの焼き出しを行っている。MPS 全チョップの本格運用を行う際には、この真空悪化が問題となると考えられる。全チョップを行った場合の真空悪化を避ける手段について、現在検討を進めている。

5. まとめと今後の予定

RF チョッパーによる高速ビーム遮断試験を行った結果、MPS 発報から約 4 μs でビーム停止できることが分かった。これは、これまでの RFQ OFF によるビーム停止とほぼ同等の時間であり、当初の仕様である 5 μs 以内でのビーム停止という条件を満たしている。また、ビーム測定の結果では、ほぼ完全にビームが遮断されていることが分かった。

J-PARC では、J-PARC 加速器からのビーム利用実験の効率を高めるための MPS の機能強化を進めている^[6]。J-PARC 加速器では MLF と MR 行のビームが混在しており、供用運転中に MR で MPS が発報した場合、MLF への供用運転を継続しつつ MR 行のビームのみを遮断する試みである。この MR 行のビームを高速に遮断する手段として、この全チョップを利用することを計画しており、そのための MPS システムの見直しを進めている。現在の MPS システムおよびチョッパーセレクトのシステムを基本としつつ、行き先別のビーム遮断機能および安全のためのチェック機能を強化する予定である。2010 年の夏期メンテナンス期間にロジックコントローラをはじめとする MPS サブシステムの改造を行い、

2010 年 10 月からの運転で動作試験を行う予定である。今後、さらにシステムの信頼性を向上させるよう、MPS システムの改良を進める予定である。

参考文献

- [1] 榊 泰直 他, “J-PARC リニアックの運転・管理用インターロックシステムの構築”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, August 2-4, 2006
- [2] 榊 泰直, “J-PARC LINAC 用高速インターロックシステムの設計”, JAERI-Tech 2004-021
- [3] 榊 泰直, “機器保護用高速インターロックユニット試作機の性能試験”, JAERI-Tech 2004-022
- [4] 加藤 隆夫 他, “J-PARC 陽子リニアックの RF チョッパーによるビームテスト”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30-August 1, 2003
- [5] 鈴木 隆洋 他, “J-PARC LINAC/RCS における MPS サブシステムシステムの開発”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima, August 6-8, 2008
- [6] 山本 昇 他, “J-PARC 加速器の可用性向上に向けた MPS 機能強化について”, in this proceedings.