

Current status of the Injection Bump System in J-PARC 3-GeV RCS

Tomoaki Ueno¹, Tomohiro Takayanagi, Tomohito Togashi, Michikazu Kinsho
Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

Abstract

The injection bump system of the 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) in J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) consists of the pulse bending magnets for the injection bump orbit, which are four horizontal bending magnets (shift bump), four horizontal painting magnets (h-paint bump) and two vertical painting magnets (v-paint bump). The power supplies of the magnets are composed of multiple-connections of the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) assemblies. They excite the current waveform of the trapezoid pattern with the flat top for 500 μ s and the flexible decay pattern. The exciting current and magnetic field were measured. The power supplies executed the good accuracy less than 1% deviation to programmed pattern. Furthermore, the continuous long-term with stable has been performed. In this paper, the current status of the operation of the injection bump system is described.

J-PARC 3-GeV RCS における入射バンプシステムの現状

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)^[1]の3-GeV RCSの入射バンプシステム^{[2]-[5]}は、入射部に設置してある4台の水平シフトバンプ電磁石と4台の水平ペイントバンプ電磁石、及び、2台の垂直ペイントバンプ電磁石で構成されている。水平シフトバンプ電磁石は、入射用バンプ軌道を生成し、リニアックからの入射ビーム(H⁻)とRCSの周回ビーム(H⁺)を合流させる機器である。水平・垂直ペイントバンプ電磁石は、大強度ビームを生成するペインティング入射^{[2][5]}に使用する機器である。

入射バンプシステムの電源は、IGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)アセンブリの多段多重の直並列回路で構成されており、台形パターンや減衰関数パターンを任意に出力することができる。水平シフトバンプ電磁石電源では、最大20kAの大電流を最速185 μ sでの高速立下げを行い、且つ600 μ sのフラットトップを偏差1%以下の高精度で制御して励磁することができる。また、長期間の連続的な安定運転を可能としている。

本論文では、入射バンプシステムの現在の運転状況について報告する。

2. 供用運転用のパターン波形

RCSでは、MR(50GeVシンクロトロン)用とMLF(物質・生命科学実験施設)用でそれぞれ異なるパラメータのビームを加速し、それらを各施設に25Hzで連続的に振り分ける供用運転を行っている。

入射バンプシステムは、リニアックからビームを入射する際に、各施設で要求されたパラメータのビームを生成することができる。図1と2に、MRとMLFに供給するそれぞれ異なるビームパラメータ

における入射バンプシステム電源の出力電流の測定結果を示す。

図1は、MRへマクロパルス幅500 μ s、水平方向に150 π mm-mradのペインティングエリアで入射したビームを供給し、MLFへマクロパルス幅200 μ s、水平方向、及び、垂直方向に150 π mm-mradのペインティングエリアで入射したビームを供給している場合である。また、2つのビームはマクロパルス幅が異なるが同じ出力パターンを使用しているため、マクロパルス幅200 μ sのビームの場合は、パターン出力タイミングを変更してペインティングエリアを確保している。さらに、MRでは、垂直方向のペインティングを必要としないため、MRのタイミングに限り、垂直ペイントバンプの出力タイミングを900 μ s変更して、垂直方向へのペインティングを実施しないようにしている。これにより、垂直ペイントバンプ電源は25Hzの運転を行いながら、垂直ペイントバンプの利用が有りとなしの場合を交互にした連続運転が可能となる。

図2は、水平方向のみへのペインティングを実施している場合である。MRへは150 π mm-mradのペインティングエリアで入射し、MLFへは100 π mm-mradのペインティングエリアで入射している。このペインティングエリアの切り替え運転では、水平ペイントバンプ電源の出力電流を25%変更して連続的に運転している。また、MRとMLFへ供給する切り替えのタイミングは、MLFへ6秒出力する毎に、MRは8パルス出力の繰り返しとなる。

このように、入射バンプシステムでは、MRとMLFへのビーム供用運転時に、出力パターン電流値や出力タイミングを25Hzで切り替える運転を連続的にやっている。

¹ E-mail: ueno.tomoaki@jaea.go.jp

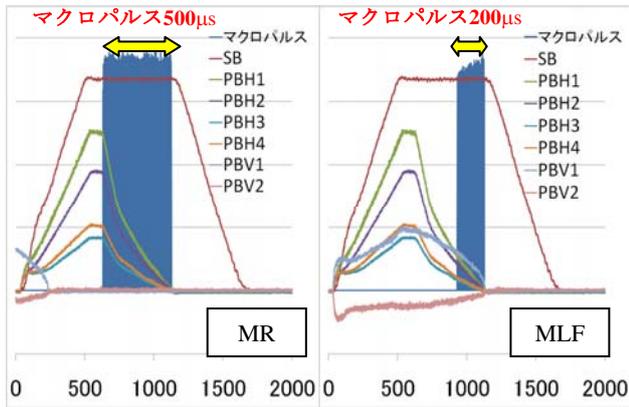


図1.MRとMLFの切り替え波形
(マクロパルス幅500µsと200µs入射)

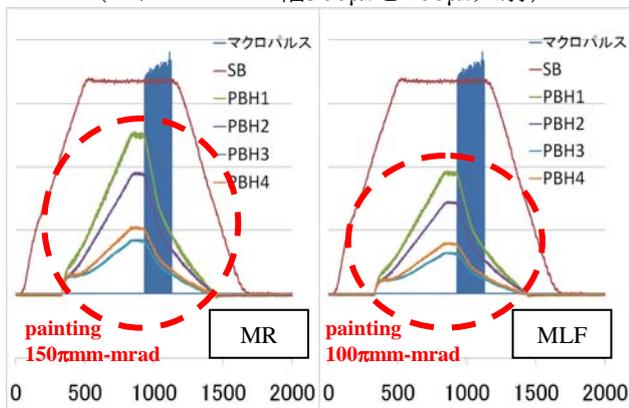


図2.MRとMLFの切り替え波形 (150πmm-mradと100πmm-mradのペインティング入射)

3. 抵抗器用風冷ファンの効果

水平シフトバンプ電源は、IGBTチョップの高周波のノイズカット用にフィルター回路を設けている。抵抗器はチョップ盤の外部にあり、ユニット毎に2列3段（計6個）を1組とした構成となっている（写真1参照）。チョップ盤は全部で14台あり、各チョップ盤にはユニットが上下に2台あるため、抵抗器の数は合計で168個になる。この抵抗器は、定常運転時（電流値13.4kA 運転周波数25Hz）で約200℃になる。この温度は、フィルター回路として抵抗器の性能上に問題は無いが、安全と機器の保全のため、風冷ファン（山洋電気 109S008 AC200V 最大風量2.35m³/2.7min）を設置した。風冷ファンはユニットの抵抗器の各段に1台ずつ設けた。

風冷ファンを使用した場合と使用しない場合の抵抗器の最高到達温度の違いを、サーモカメラで測定した。測定結果を写真2と3に示す。それぞれ定常運転を30分以上行った後の結果で、温度は飽和している。次に、抵抗器の温度を、運転開始から飽和するまで断続的に温度を測定した結果を図3～6に示す。測定は、2段3列で構成された抵抗器のうち、上、中、下段のそれぞれ手前の1箇所をP1、P2、P3として行った。また、Htはサーモカメラの画面上で最も高い温度を示しており、上記P1～P3の指定箇所を含めて、カメラの画面上で最も高い温度を示している。

この結果より、風冷ファンを使用した場合、最高到達温度が約110℃となり、約90℃減の効果を確認することができた。

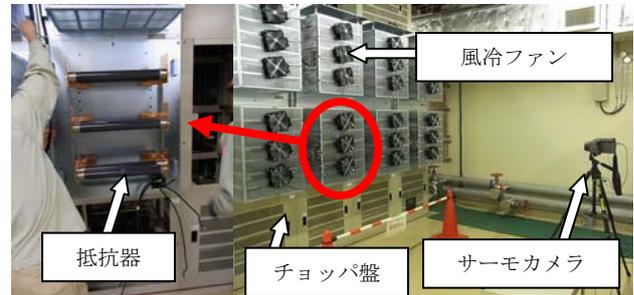
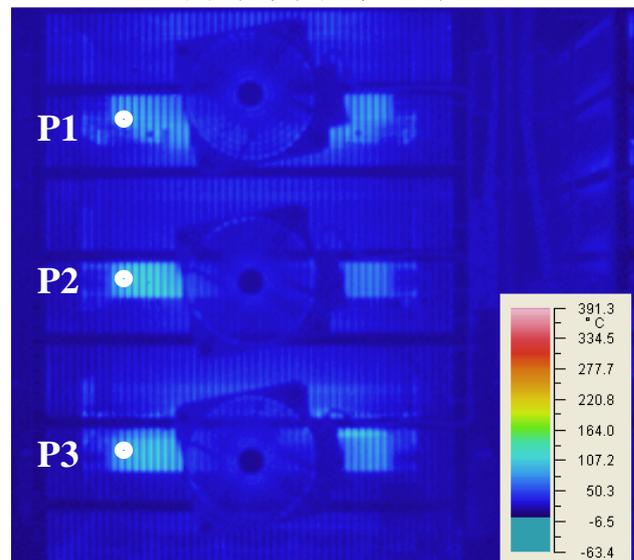
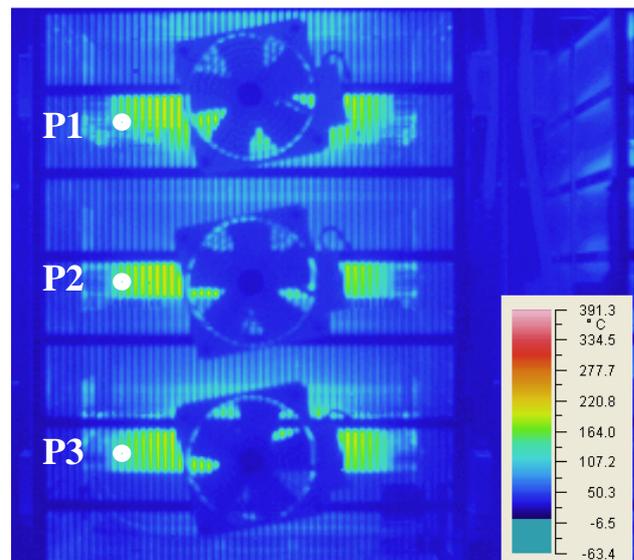


写真1.抵抗器風冷用ファン



ファン動作

写真2.サーモカメラでの風冷ファン有・無の比較



ファン停止

写真3.サーモカメラでの風冷ファン有・無の比較

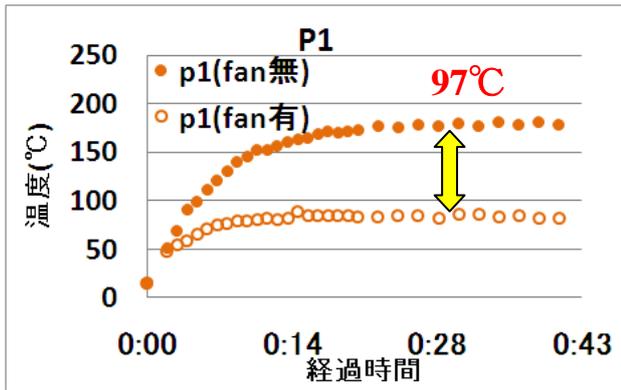


図3. 抵抗器の温度変化(P1)

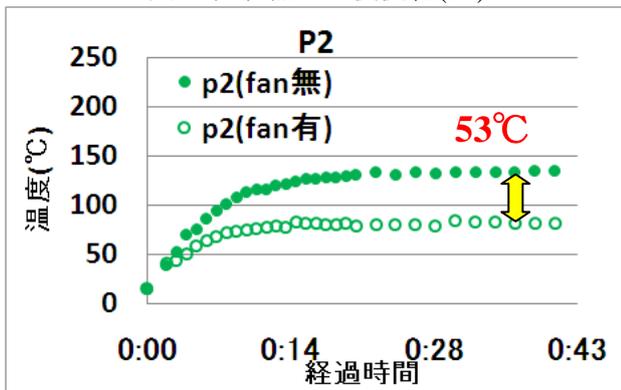


図4. 抵抗器の温度変化(P2)

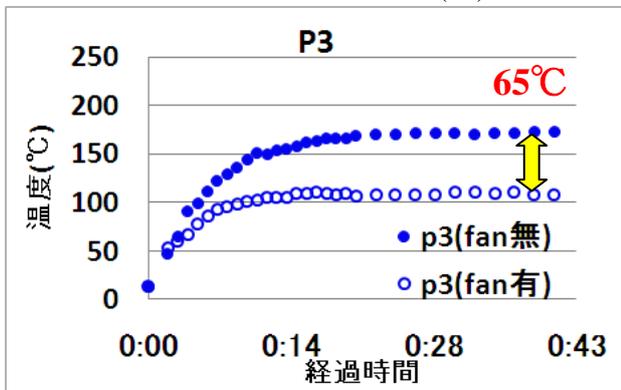


図5. 抵抗器の温度変化(P3)

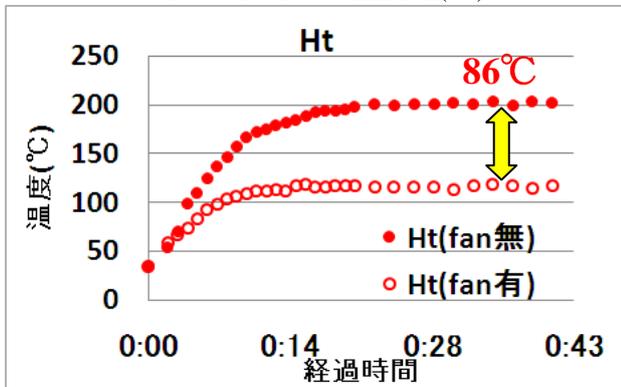


図6. 抵抗器の温度変化(Ht)

4. 入射ランプシステムの安定運転

4.1 長期安定運転

MRとMLFに、25Hz運転で連続的に安定したビームを供給するため、電磁石電源の機器は磁場の安定出力が求められる。そこで、水平シフトランプ電磁石のコア内に設置したサーチコイル（巻数10Turn 面積0.0024m²）を用いて、磁場出力時の時間的な安定度を測定した。サーチコイルからの出力データをWE7000（YOKOGAWA製）で取り込み、LabVIEW（National Instruments）にてデータの保存と解析を行った。磁場の絶対値は、取得したサーチコイルの電圧波形を積分して評価を行った（図7参照）。

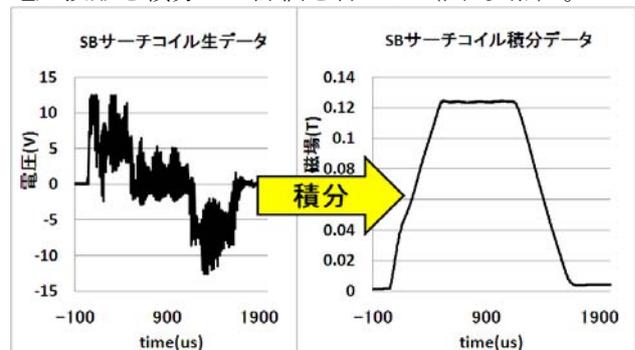
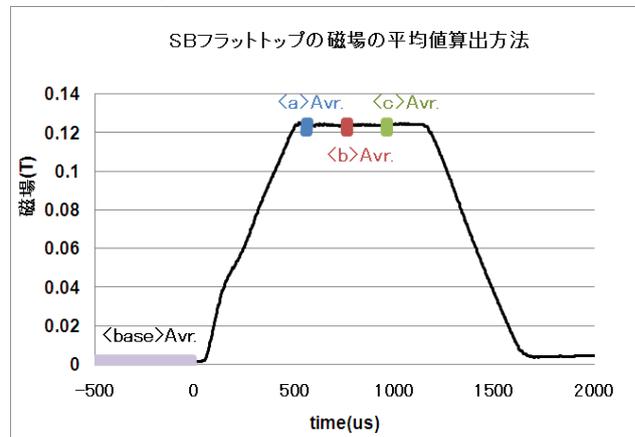


図7. サーチコイル磁場算出条件

フラットトップの変動を算出した磁場波形で確認するため、フラットトップの初め、中間、終わりの3箇所をそれぞれ<a>、、<c>として平均値を求めた。また、測定時のオフセット分をキャンセルするため、各測定点の前後25μsの平均値をそれぞれ<a>Avr.、Avr.、<c>Avr.として算出し、磁場出力前のゼロ部分の時間500μs分の平均値で求めた<base>Avr.の差分で、出力磁場の絶対値を評価した（図8参照）。



$$\begin{aligned} \langle a \rangle \text{平均磁場値(T)} &= \langle a \rangle \text{Avr. (T)} - \langle \text{base} \rangle \text{Avr. (T)} \\ \langle b \rangle \text{平均磁場値(T)} &= \langle b \rangle \text{Avr. (T)} - \langle \text{base} \rangle \text{Avr. (T)} \\ \langle c \rangle \text{平均磁場値(T)} &= \langle c \rangle \text{Avr. (T)} - \langle \text{base} \rangle \text{Avr. (T)} \end{aligned}$$

図8. 各フラットトップ平均磁場値の算出条件

上記の算出方法で求めたフラットトップの<a>、、<c>位置の平均磁場を14日間連続（測定間隔5分毎）でプロットした磁場の変動データを図9に示す。<a>の場所での磁場のフラツキ（磁場の時間的な変動量）は0.61%、の場所でのフラツキは0.70%、<c>の場所でのフラツキは0.66%となった。この結果より、フラットトップは全域で1%以内のフラツキに治まっており、安定したビームを供給していることを確認できた。

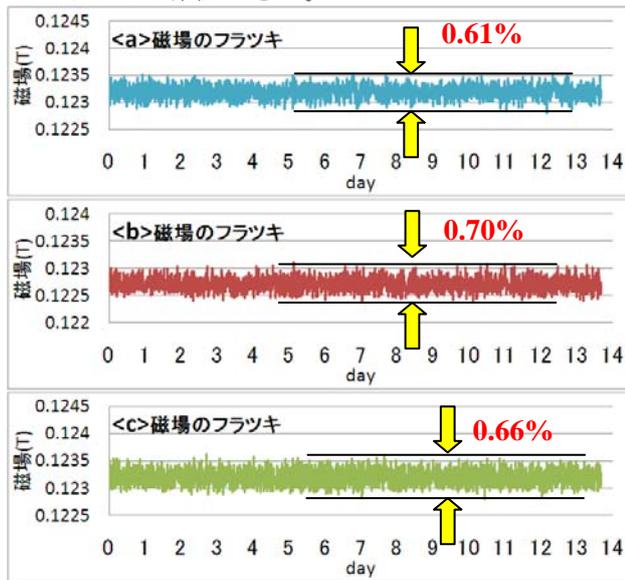


図9. SBサーチコイル磁場の変動

4.2 運転累積時間

J-PARCの加速器施設は、夏季には3カ月間のメンテナンスがあるが、その期間以外はほぼ運転をしている。したがって、ビーム供給運転、機器のコンディショニング、通電試験やビーム調整試験等で年間の約2/3は運転していることになる。図10に、2008年から2010年7月までの入射バンプシステムの運転の累積時間を示す。

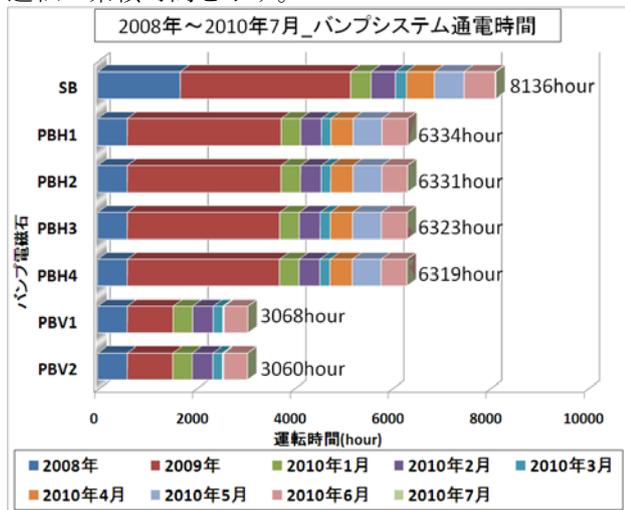


図10. 入射バンプシステム運転累積時間

入射バンプシステムは、長期間の連続運転の実績がある。特に、水平シフトバンプ電源は、加速器の運転がスタートしてから、累積8000時間を超えた。この間に、入射バンプシステムにおいては、ビーム運転を長期間停止するような大きなトラブルは発生しておらず、安定な運転を行っている。

5. まとめ

入射バンプシステムの電源は、設定精度及び安定度が1%以下の高精度な制御を実現している。また、MRとMLFへのビーム切り替え運転時に、出力パターンの電流値やタイミングの25Hz切り替えが伴う運転を連続的に行うことが可能である。さらに、機器の安全対策として、風冷ファンを用いて高温となる抵抗器の冷却を実施することで、構成機器の保全を考慮した安全な運転を行っている。

今後は、リニアックの400MeVビームの入射エネルギーに対応するため、入射バンプシステムでは、電源の増強が計画されている。そして、設定精度と安定度は、現在の性能以上が要求されている^[6]。また、出力電流と電圧が倍増することによる熱負荷対策、高電圧絶縁設計、高周波ノイズ対策などを含めた検討を実施する。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC,” JAERI Technical Report, 2003-044 and KEK Report 2002-13.
- [2] T.Takayanagi et al., “Design of the injection bump system of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16,No.2, June 2006, pp1358-1361
- [3] T.Takayanagi et al., “Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369
- [4] T.Takayanagi et al., “Improvement of the Shift Bump Magnetic Field for a Closed Bump Orbit of the 3-GeV RCS in J-PARC”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.18,No.2, June 2008, pp306-309
- [5] T.Takayanagi et al., “Measurement of the Paint Magnets for the Beam Painting Injection System in the J-PARC 3-GeV RCS”, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.18,No.2, June 2008, pp310-313
- [6] 高柳智弘 et al., “バンプシステムの性能向上計画”, 第7回日本加速器学会年会, WEPS085