

## PERFORMANCE OF THE PAINTING INJECTION OF THE 3-GEV RCS in J-PARC

Tomohiro Takayanagi<sup>1,A)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>, Tomoaki Ueno<sup>A)</sup>, Yoshiro Irie<sup>C)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>,  
Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Junichiro Kamiya<sup>A)</sup>, Masao Watanabe<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>C)</sup>

A) Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)/Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
2-4 Shirakata, Shirane, Toukai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

B) Hiroshima University

1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8526

C) Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The examination of the painting injection of the 3-GeV RCS in J-PARC (Japan Particle Accelerator Research Complex) has been performed. The gap of the shift bump magnet was adjusted by the insulator thin sheets that thickness was decided by the experimental results and the analysis results. The integrated magnetic field will be zero and the displacement of the beam orbit was less than 1mm, which was confirmed by the beam examination of the response characteristic. Furthermore, the balance adjustment of the exciting current level, which was each power supply of the four horizontal paint bump magnets, was performed. So the good performance of the beam control for the beam painting injection has been obtained.

## J-PARC 3-GeV RCS ペインティング入射試験

### 1. はじめに

J-PARC<sup>2</sup> (大強度陽子加速器施設) 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)<sup>[1][2]</sup>の入射バンブシステム<sup>[3]</sup>において、大強度陽子ビームを生成するペインティング入射試験を行った。その初期試験の結果について報告する。

RCSでは、4台の水平シフトバンブ電磁石を用いて入射用バンブ軌道を生成し、LinacからのH<sup>+</sup>ビームを荷電変換フォイルでH<sup>+</sup>へと変換して周回軌道へと入射する。また、水平シフトバンブ電磁石の上・下流に、それぞれ2台設けた水平ペイントバンブ電磁石(全4台)と、L3BTライン(Linacからの入射ライン)に設けた2台の垂直ペイント電磁石を用いて、水平と垂直の両方向のペインティングを行う。

ペインティング入射とは、Linacからのエミッタンスの小さいビームをRCSの大口径ビームに一樣に分布させ、空間電荷効果によるチューンシフトを抑えることで、ビーム損失を低減しながら大強度ビームを生成する方式である。そのため、電磁石の磁場分布を正確に測定し、バンブ電磁石によるビームの基本動作を確認することが必要である。

電磁石の磁場測定結果<sup>[3][4]</sup>から、直列に接続された4台の水平シフトバンブ電磁石のうち、2台目と3台目の上・下鉄心コアの合わせ面に0.3mmの絶縁スペーサーを入れて全体の積分調整を行った。その結

果、バンブ軌道の影響で生じた周回ビームと中心軌道の偏差量(COD: Closed Orbit Distortion)が1mm以下になることを確認した。また、4台の水平ペイントバンブ電磁石によるビームの応答性を測定し、励磁量のバランス調整を各電源で行った。これより、ペインティング入射に求められている精度の良いビーム制御が可能であることを確認した。

### 2. 水平シフトバンブ電磁石

#### 2.1 ギャップ調整とビームCOD

4台の水平シフトバンブ電磁石は直列に接続されているため、4台分を合計した全体の積分磁場を調整するためには、調整が必要である電磁石個々の上・下鉄心合わせ面に絶縁スペーサーを挿入し、電磁石のギャップを変化させて各々の励磁量を変更しなければならない。

磁場測定の結果より、2台目と3台目に厚さ0.3mmの絶縁スペーサーを挿入することにした。このギャップの調整により、電磁石1台分の積分磁場を約0.6%下げることができ<sup>[5][6]</sup>。そのため、1台目と4台目が、それぞれの上下流に設置されたQ電磁石との磁場干渉の影響で減少した分を補正することができる。4台全体の積分磁場が2358.0Gauss・cmから-71.6Gauss・cmとなり、解析の結果では、周回

ビームのCODは $\pm 0.5\text{mm}$ 以下となる<sup>[3][5]</sup>。

181MeV周回モード<sup>[2]</sup>で、BPM(Beam Positioning Monitor)を用いて周回ビームのCODを測定した結果を図1に示す。図中のdxは、バンブ軌道が立っている場合と立っていない場合の差である。測定の結果、CODは $\pm 0.5\text{mm}$ 以下となり、バンブ軌道の影響で生じる周回ビームのCODが小さいことが確認できた。また、解析結果と非常に良く一致した。これより、磁場測定の結果より算出した水平シフトバンブ電磁石のギャップ調整量が正しかったことを確認した。

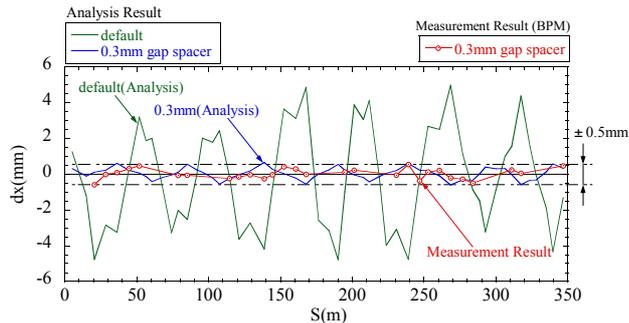


図1：水平シフトバンブ電磁石によるビームのCOD測定結果

## 2.2 ビーム変位量

4台並んだ水平シフトバンブ電磁石の中心位置に設置してあるMWPM4 (Multi-Wire Profile Monitor) を用いて、水平シフトバンブ電源の設定値に対する入射ビームの変位量を測定した。ビーム条件は、センター入射の1/3周モード<sup>[2]</sup>で、Peak電流が25mA、Choppingが112ns、入射時間が50 $\mu\text{s}$ で行った。

設定値に対する変位量を相対的に求めた結果、1mmの設定に対して約0.93mmの変位量となり、解析値より約7%小さくなった。また、この式を用いて、電源の設定値に対するビームシフト量の絶対値を算出した。各々の結果を図2に示す。実験の結果と解析より求めた電源の設定値と変位量の関係が、測定結果と一致しなかった。

## 2.3 センター入射

IPM (Residual Gas Ionization Profile Monitor)<sup>[7]</sup>を用いて、センター入射時のビームプロファイルを測定し、入射ビームと周回ビームの軌道中心が一致する場合の電源の設定値を確認した。入射後から30 $\mu\text{s}$ までのターン毎のビームプロファイルの測定結果を図3に示す。ビーム条件は、Peak電流が25mA、Choppingが560nsの1shot入射で行った。

電源の設定が93mmの場合、MWPM4の測定では、入射と周回のビーム軌道の中心は約17mm離れていた。そのため、ベータatron振動が大きくなっている(左図)。入射と周回のビームは同じ量だけ変位するので、図2の測定結果を用いて、半分の8.5mmの変位量(解析では9mmに相当)である102mmに設

定した。その結果、ベータatron振動が小さくなり、2つの中心軌道が一致したのがわかる(右図)。

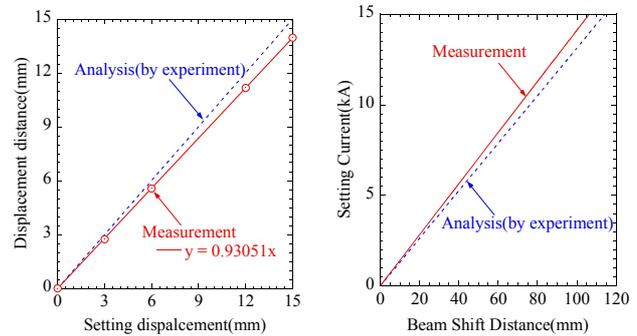


図2：変位量の測定結果(左)とビームシフト量の算出結果(右)

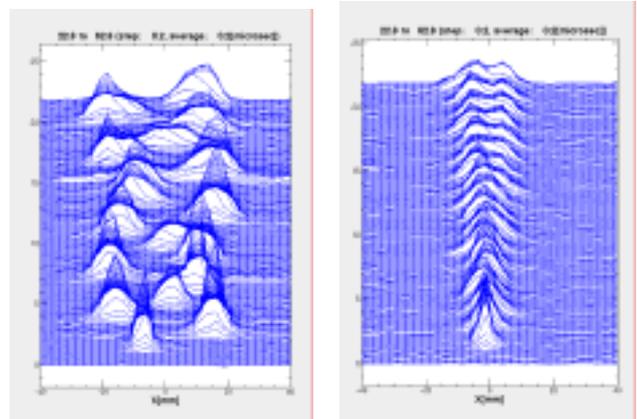


図3：IPMによるビームプロファイル測定結果(左)設定値93mm、(右)設定値102mm

## 3. 水平ペイントバンブ電源

### 3.1 4台のバランス調整

水平ペイントバンブ電磁石の励磁量のバランス調整を、CODの測定結果を確認しながら行った。水平ペイントバンブ電磁石の4台は、電磁石と電源(PBH1~4)が1対1で接続されているため、励磁量の調整を個々に電源で行うことができる。

フラットトップが400 $\mu\text{s}$ の台形の波形パターンを作成し、Peak電流が25mA、Choppingが112nsのビームを50 $\mu\text{s}$ 入射してビームのCODを測定した。電流値を $\pm 2\%$ 程度の範囲で調整し、CODが $\pm 1\text{mm}$ 以下になることを確認した。下記(1)に調整前後の各々の電流値を、図4に調整後の水平ペイントバンブ電源と、その試験時の水平シフトバンブ電源(SB)の励磁電流波形を示す。また、水平ペイントバンブ電源のバランス調整前後のCOD測定結果を図5に示す。

(1) 調整前	$\begin{cases} PBH1 : 8.08kA \\ PBH2 : 5.98kA \\ PBH3 : 1.99kA \\ PBH4 : 2.68kA \end{cases}$	調整後	$\begin{cases} PBH1 : 7.99kA \\ PBH2 : 6.09kA \\ PBH3 : 2.02kA \\ PBH4 : 2.66kA \end{cases}$
---------	--	-----	--

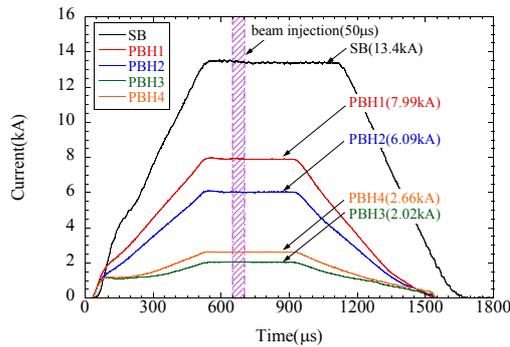


図4：水平ペイントバンク電源のバランス調整後の励磁電流波形

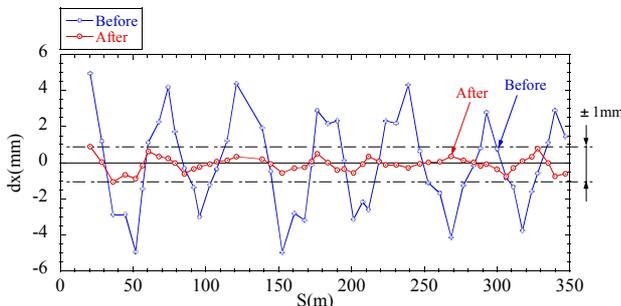


図5：水平ペイントバンク電源4台のバランス調整前後のビームCOD測定結果

### 3.2 位相空間座標の確認

台形波形のフラットトップの部分を用いてペインティング入射軌道を生成し、MWPM3と4で測定した入射軌道から入射点の位相空間座標を求めた(図6)。その結果、実験と解析より算出した、エミッタンスが $100 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ と $150 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビームに対応する電源設定値で測定したところ、目標値(図中：target) [8] よりも小さくなった。そこで、各々の110%値で再設定して測定したところ、目標値とほぼ一致した。

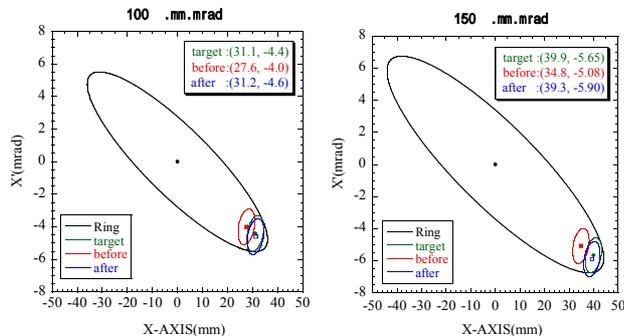


図6：位相空間座標の目標値と調整前後の測定結果 (左：100、右：150)

## 4. 最後に

水平シフトバンク電磁石のギャップ調整を行い、バンク軌道の影響による周回ビームのCODが

$\pm 0.5 \text{mm}$ 以下になることを確認した。また、水平ペイントバンク電磁石によるビームの応答測定から、各電源の励磁量のバランス調整を行い、ペインティング入射に必要な精度でビーム制御が可能であることを確認した。今後は、入射時間を $500 \mu\text{s}$ に延長し、垂直ペイント電磁石を含めた水平と垂直の両方向の同時ペインティング入射試験を行う。

図7に、 $100 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のcorrelate paintingとanti-correlate paintingの入射に設定した、バンクシステム全7台の励磁電流波形の測定結果を示す。水平・垂直のペイント電磁石用の電源はIGBTチョッパの多段多重の並列回路で構成されており、任意の波形パターンを $\pm 1\%$ 以下の精度で制御して出力することができる [3] [4]。

実験の結果と解析で求めた電源の設定値とビームの変位量の関係が、測定した結果と比較して約10%異なっていた。この原因については、磁場測定と解析の方法、サーチコイルの校正方法、及び、ビーム変位量の測定方法などを見直し、原因を究明することとする。

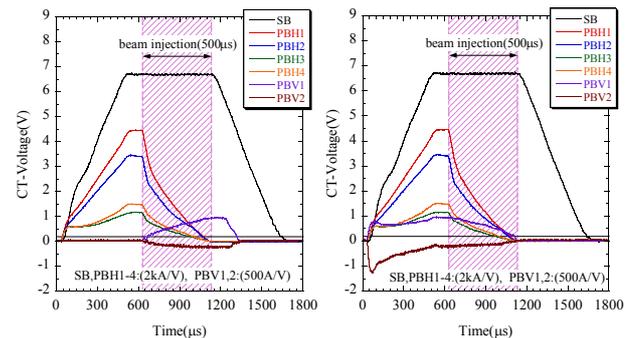


図7：Correlate Paintingの励磁電流波形(左)とAnti-correlate Painting励磁電流波形(右)

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki and M. Kinsho, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p.3557-3559
- [2] H. Hotchi, et al., "Proceedings of the 5<sup>th</sup>. Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan
- [3] T. Takayanagi, et al., IEEE Trans. Applied Supercond., vol.16, no.2, pp.1358-1361, June, 2006.
- [4] T. Takayanagi, et al., IEEE Trans. Applied Supercond., vol.18, no.2, pp.306-309, June, 2008.
- [5] T. Takayanagi, et al., "Proceedings of the 4th. Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan)
- [6] H. Harada, et al., "Proceedings of the 4th. Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan)
- [7] K. Sotou, et al., "Proceedings of the 5<sup>th</sup>. Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan
- [8] P.K.Saha has helped calculation.