

## THE PAINTING INJECTION AT J-PARC 3GeV RCS

Hiroyuki Harada<sup>1,A)</sup>, Yoshiro Irie<sup>B)</sup>, Saha Pranab<sup>C)</sup>, Hideaki Hotchi<sup>C)</sup>,  
Yoshihiro Shobuda<sup>C)</sup>, Tomihiro Takayanagi<sup>C)</sup>, Fumiaki Noda<sup>D)</sup>, Kenta Shigaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan, 739-8526

<sup>B)</sup> KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

<sup>C)</sup> JAEA/J-PARC, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, Japan, 310-1195

<sup>D)</sup> Energy and Environmental Systems Laboratory, Hitachi, Ltd, 7-2-1 Ohmika, Hitashi, Ibaraki, Japan, 319-1221

### Abstract

The J-PARC 3GeV RCS has been commissioned since Oct 2007. During such a short period, it achieved 50kW beam power ( $4 \times 10^{12}$  ppb) and presses on toward the increasing of the beam power. As the increasing of the beam power, the particle interaction is expected even more and the effect should be considerable from the view point of the beam loss. The painting injection is performed to suppress the effect. This paper is introduced the injection scheme at the RCS, is described the commissioning scheme and the results for the painting injection.

## J-PARC 3GeV RCSにおけるペインティング入射の研究

### 1. はじめに

J-PARC 3GeV RCS<sup>[1]</sup>では、2007年10月より初期ビーム調整を開始し、50kWのビーム出力を達成している<sup>[2]</sup>。今後、所期の目標である181MeVビーム入射での300kW出力に向け、ビーム調整を行っていく。大強度出力時に懸念される空間電荷効果等の粒子間相互作用を緩和するために、時間的に入射および周回軌道を変化させつつビーム入射を行い、実空間上にビームを広げさせるペインティング入射を用いる。精度の良いペインティング入射を議論するために、リングパラメータの把握・調整、入射点における位相空間座標の同定が必須となる。本研究では、J-PARC 3GeV RCSにおけるリングパラメータの把握および調整、時間的に変化する入射点における位相空間座標の同定を行い、大強度出力に向けて必須である横方向のペインティング入射の調整手法の確立を目指した。本報告では、入射部の概要と横方向ペインティング入射の調整手法を紹介し、ビーム調整での結果を示す。

### 2. RCSと横方向ペインティング入射

RCSは、3回対称のリングで、24台の偏向電磁石

(BM)、60台・7ファミリーの四極電磁石(QM)、水平・垂直方向それぞれ26台の軌道補正電磁石(STM)、18台・3ファミリーのchromatic補正用六極電磁石によって構成されている。ビームモニターとしては、周回軌道測定用の54台のBPM、水平・垂直のプロファイル測定用に1台ずつのIPM、チューン測定用の1台のBPM、その他に電流モニターとしてFCT、SCT・DCCT、運動量と軌道のマッチング用のBPMをリング内に設置している<sup>[3]</sup>。

次に入射部の概要を図1に示す。水平(x)方向には、入射ラインに2台のセプタム電磁石(ISEP1,2)、ダンプリンに2台のセプタム電磁石(DSEP1,2)、入射ビームを周回ビームに混ぜ合わせるための4台のソフトバンク電磁石(SB1~4)、SBの上下流に2台ずつ配置されたペインティング入射のためのペイントバンク電磁石(PB1~4)からなる。垂直(y)方向には、軌道補正用の補正電磁石(STMV1,2)とペインティング入射のためのペイントバンク電磁石(PB1,2)を入射ラインに配置している<sup>[4]</sup>。モニターとして、入射ラインに2台のBPM(K-BPM, I-BPM)、入射部全体に6台の破壊型のMulti-Wire Profile Monitor(MWPM2~7)を配置し、ビーム重心やプロファイルの測定を行っている。

LINACから入射されたH-ビームのほとんどは、

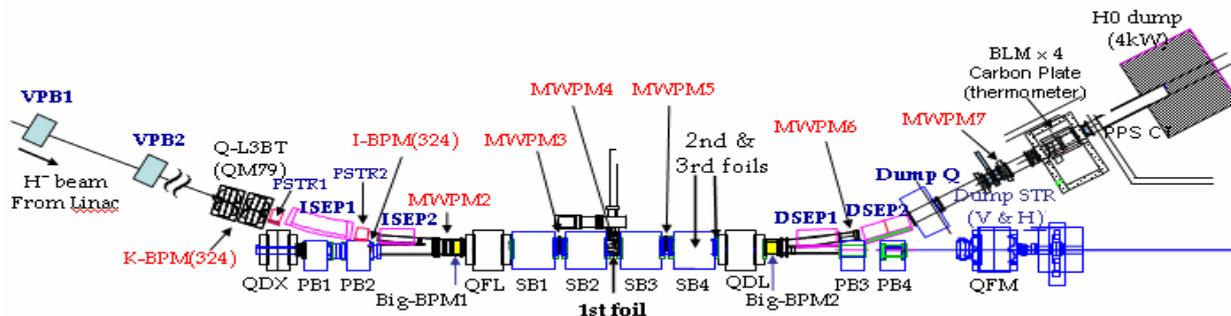


図1. J-PARC 3GeV RCSの入射部

<sup>1</sup> E-mail: [harada@hepl.hiroshima-u.ac.jp](mailto:harada@hepl.hiroshima-u.ac.jp)

1st foilで電子を剥ぎ取られ、H+としてRCSへと入射される。また残ったビーム(H-, H0)は、2ndと3rdのfoilでH+へと変換され、入射ダンプラインへと送られる。RCSのRFからの要求に応じて切り取られたLINACビーム(中間バンチ)が、多周回入射され(入射時間500 μ sec 約235パルス)、RCSにビームが積み込まれる。同じピーク電流の入射ビームでも入射時間によって、RCS内のビーム電流や中間バンチ数を調整可能である。また、周回軌道に入射ビームの軸を合わせた入射(中心入射と呼ぶ)で、リングの通常のビーム調整を行う。

ペインティング入射とは、入射時に入射軌道および周回軌道を変化させながらビーム入射を行うことで、大きなエミッタンスのビームを形成する入射である。水平方向はSBによるバンブ軌道の上に、PB1~4を用いてペイントバンブ軌道を作り、その軌道に入射ビームの軸を合わせる。その後、ペイントバンブ軌道を500 μ secの間に時間的に立ち下げることで、位相空間の長軸方向に軸中心から周辺部へビーム入射を行う。垂直方向はPBV1,2を用いて入射ビームの入射点での傾き $y'$ を変化させながら入射する。垂直方向は、軸中心から周辺部へ(correlated)、また周辺部から軸中心へ(uncorrelated)のビーム入射が可能である。

### 3. ペインティング入射調整

#### 3.1 リングパラメータ把握

リングに最適なビーム入射を行うには、リングのパラメータの把握および調整が必須となる。そこで、光学パラメータの測定および補正を行った。検出されたビームの横方向振動の周波数分解からベータトロン振動数(チューン)、STMの蹴り角に対する周回軌道(COD)の応答からベータ関数、中心運動量の変化に対するCODの応答から分散関数(dispersion)をリング1周に対してそれぞれ算出した。独立に測定された3つのパラメータを再構築するQMのパラメータをモデル計算で算出し、その値とQMの初期設定値との差を補正量(fudge factor)としてQMに再設定して補正した。補正後、再度パラメータ測定を行い、一回の補正で十分に補正できたことを確認した。

各QMの設定値や光学パラメータをモデル計算と合わせたことで、その加速器モデルを用いたPBの波形の作成が可能となった。まず、入射点での入射ラインとリングのTwissパラメータからあるエミッタンス領域にマッチする周辺部におけるビームの重心値を導出する。水平方向に関しては、そのビーム重心値を満たすペイントバンブ軌道を計算し、各PB4台の各々の設定値を計算した。垂直方向も同様にPBVの2台で設定値を計算した。波形は、台形波と減衰波の2パターンを作成する。

#### 3.2 入射軌道調整

入射点(1stフォイル)における入射ビームの位置と傾きを、水平方向はISEPの2台で、垂直方向は

ISTMVの2台で操作する。水平方向における位置を大きく変化させる場合は、SBでバンブ軌道を操作する。各ISEPに対する軌道の応答を測定し、その応答行列を用いて、入射軌道を操作する。入射軌道の測定は、MWPM3,4で行う。破壊型であるため、ビーム周回時の測定は避け、入射して1/3周回した時点でビーム取り出しを行う1/3周回モードでの使用に限定した。i番目のISEPの蹴り角 $\Delta\theta_i$ とj番目のMWPMでのビーム重心 $x_j$ は応答行列Aを用いて、

$$\Delta x_j = \sum A_{ij} \theta_i$$

と表され、実際の応答行列Aは

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_3}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial x_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_4}{\partial \theta_2} \end{pmatrix}$$

である。そこで、測定された応答行列の逆行列とMWPM3,4で操作したい $\Delta x_{3,4}$ からISEP1,2の蹴り角 $\Delta\theta_{1,2}$ を導出することができる。 $\Delta x_{3,4}$ は、1stフォイルとMWPM3,4の距離より、入射点での $(\Delta x, \Delta x')$ に直接変換可能となる。実際のビーム調整において、ある軌道のまわりで応答行列を測定し、その応答行列を用いて入射点での位置と傾きを直接操作できることをMWPM3,4で確認した。精度のよい入射点の調整は、次節で説明する入射点での位相空間座標の同定に必須である。

#### 3.3 ベータトロン振動の応答による位相空間座標の同定

ペインティング入射の過程を議論するためには、入射点における時間ごとの位相空間座標を同定する必要がある。そこで、本研究では独立した2つの手法を用いた。1つ目は、入射点での位置と傾きを独立に変化させ、その時のリング内のベータトロン振動の応答からその座標を見積もる<sup>[5]</sup>。これはモデル計算に依存しないが、位置と傾きを独立に精度よく制御できなければ、成立しない。2つ目は、リング内のドリフトに設置された2台のBPMでの周回ごとの位置とモデル計算に基づいたTransfer Matrixから入射点での座標を見積もる。これはモニタの精度に加えて、モデルの精度に大きく依存する。ここでは、前者の手法についてのみ述べる。

リング内のあるBPMでのnターン目のビーム重心値は、1ターン目の位置 $x_0$ と傾き $x_0'$ 、BPMでの $\alpha$ と $\beta$ 、ベータトロンチューン $\nu$ を用いて、

$$x(n) = x_0 \{ \cos(2\pi n \nu) + \alpha \sin(2\pi n \nu) \} + x_0' \{ \beta \sin(2\pi n \nu) \}$$

と表せる。この検出されたビーム振動をフーリエ変換すると、チューンのピークにおける実数部Reと虚数部Imは、ある応答行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} \text{Re}[X(\nu)] \\ \text{Im}[X(\nu)] \end{bmatrix} = R(\nu) \begin{bmatrix} x_0 \\ x_0' \end{bmatrix}$$

と表せる。入射点での位置と傾きを変化させながら、

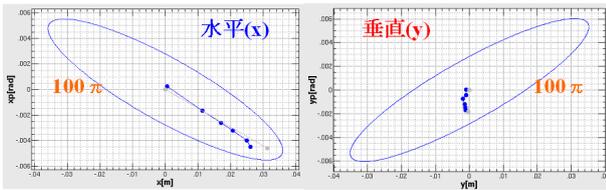


図2. ペインティング過程500 μ secにおける100 μ secごとの入射点での位相空間座標

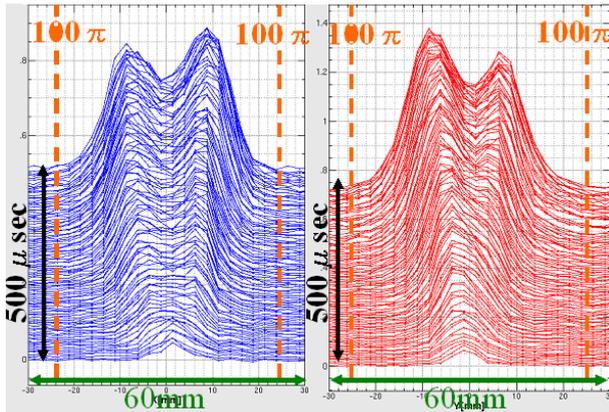


図3. ペインティング過程500 μ secにおける水平(左)・垂直方向(右)のビームプロファイル

BPMで検出したベータatron振動をフーリエ変換し、チューンピークでのReとImを取得することで応答行列Rを算出することができる。算出後、チューンピークでのReとImと応答行列の逆行列から、入射点での位置と傾きを導出することが可能となる。

本研究では、水平・垂直に関して入射点での位置と傾きを各々独立に変化させながら、チューン測定用BPMでの応答行列を測定した。水平・垂直のそれぞれに対して、初期設定値での入射エラーを導出し、入射軌道と周回軌道がマッチするように補正した。リング内に設置されているIPM<sup>[6]</sup>でのマウンテンプロットより、一度の補正で入射エラーによるビーム重心がベータatron振動していないことを確認し、位相空間座標の同定が十分機能していることがわかった。

### 3.4 ペイントバンブ軌道調整

周回軌道上にPB4台を用いてペイントバンブ軌道を立ち上げる。4台のバランスが崩れると、周回軌道にCODを生じる。PBの台形波を用いてビーム調整を行い、PBのオン/オフのCODを検出した。その結果、新たに±5mm程度CODを生じた。そこで、そのCODを加速器モデルに与え、各PBの補正量を導出し、バランス調整を行った。その結果、±1mm程度のCODに押さえ込めた。次に、そのバンブ軌道に入射軌道を合わせ、入射軌道をMWPM3,4で測定した。100 エミッタンスビーム作成のための入射点におけるバンブ軌道の設定値が $(\Delta x, \Delta x') = (31.1\text{mm}, -4.4\text{mrad})$ に対して、測定値が $(\Delta x, \Delta x') = (31.1\text{mm}, -4.6\text{mrad})$ であり、精度よいバンブ軌道を立ち上げた。これらの台形波を元に減衰波を作成した。

### 3.4 ペインティング入射過程での入射点

作成したPB減衰波形を用いて、ペインティング入射過程500 μ secにおいて100 μ secごとに単中間バンチ入射を行い、時間変動する入射点での位相空間座標を測定した。水平・垂直の結果を図2に示す。図のように時間ごとに位相空間座標が推移していることがわかる。水平方向は想定される100 エミッタンスの楕円の長軸上に、垂直方向は傾きが生じる方向に推移し、十分入射過程が機能していることがわかった。しかしながら、水平方向のバンブ軌道が立ち下がる終盤では、低い電流のためバランスが崩れ、長軸からずれてしまう。低電流における電流制御が今後の課題である。

また500 μ sec(約235中間バンチ)入射を行い、ビームプロファイルを測定した。その際、ペインティング入射によるビームの広がりを検出するために、中間バンチごとの粒子数を制限し空間電荷効果の影響を無視できるビーム電流にした。そのプロファイルを図3に示す。水平・垂直ともに、入射時間で徐々にビームサイズが大きくなる様子を確認した。

## 4. まとめ

J-PARC 3GeV RCSにおける大強度出力に向けて必須となる横方向のペインティング入射の研究を行った。2008年5月と6月に行われたビーム調整試験において、RCSにおけるリングパラメータの把握と調整、精度の良い入射軌道の調整、および時間的に変化する入射点における位相空間座標の同定を行い、大強度出力に向けて必須である横方向のペインティング入射の調整手法を確立した。

## 謝辞

昼夜を通して、共にビーム調整のために心力を費やしたRCSグループの皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki, eds, Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Hotchi and M. Kinsho, The Status of the J-PARC 3GeV Synchrotron, Proceedings of the 5th Accelerator Meeting in Japan, Higashi-Hiroshima, Aug. 6-8, 2008.
- [3] N. Hayashi et al., The Status of the J-PARC RCS Beam Monitor System, Proceedings of the 5th Accelerator Meeting in Japan, Higashi-Hiroshima, Aug. 6-8, 2008.
- [4] T. Takanayagi et al., Measurement of the injection bump magnets at J-PARC 3GeV RCS, Proceedings of the 4th Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007
- [5] N.S. Sereno, Feedback correction of injection errors using digital signal-processing techniques, Physical Review Special Topics – Accelerator and Beams, 10, 012803, 2007.
- [6] K. Satou, et al., Beam Profile Monitor of the J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron, Proceeding of the EPAC08, Cenova, Jun. 23-28, 2008, TUPC036, 1275.