

# MEASUREMENT OF ROTATION ERROR OF BPM AROUND BEAM AXIS IN J-PARC RCS

Shuichiro Hatakeyama\* †<sup>A)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Norio Tani<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195 Japan

## Abstract

The great deal of harm was received in J-PARC due to the East Japan earthquake of 11th March 2011. In RCS (Rapid Cycle Synchrotron), it is feared that the alignment of the monitor equipment has shifted due to the earthquake to some degree. Especially, because the rotation error of BPM around the beam axis causes x-y mixing in the beam position measurement, it is difficult to correct by BBA, so the influence is large. To investigate the problem, the rotation error variation before and after the earthquake is measured with the digital clinometer (accuracy 0.02mrad) though all BPMs in RCS ring. The result is that the average of variation of rotation errors is found to be -0.2mrad and RMS is 0.8mrad. In conclusion we decided it is not necessary to perform the realignment of BPMs.

## J-PARC RCS BPM のビーム軸方向の回転誤差の測定

### 1. はじめに

J-PARC では 3/11 の東日本大震災で甚大な被害を受けた。RCS (Rapid Cycle Synchrotron) では、屋外受電ヤードの地盤が広範囲で陥没し長期間外部電源が使用できない状態である。現在のところ一部小電力系の仮接続がなされ復旧作業を行っている。RCS のモニターグループでは各モニター機器の目視点検、ケーブルの導通・絶縁のチェック、模擬信号を用いた応答試験などを行った。幸いほぼ全てのモニター機器において不具合は見られなかった。モニター機器のアライメントに関しては、震災によってある程度ずれてしまったのではないかと懸念された。特に BPM のビーム軸方向の回転は、BBA で補正することは難しく、その影響は大きい。RCS の BPM はダクトの径や使用目的によって何種類かに分かれるが、それぞれに対して専用の測量治具をとりつけ、デジタル傾斜計 (精度 0.02mrad) を用いて回転誤差を測定した。

### 2. RCS BPM の回転誤差の定義

RCS のビームはリングを時計回りに回転するので座標は右手系を取っている。BPM の回転誤差は、図 1 に示すように、リング外半径方向を軸とする回転  $\Delta\theta_x$ 、垂直上方向を軸とする回転  $\Delta\theta_y$ 、ビーム方向を軸とする回転  $\Delta\theta_z$  の 3 つある。これらの 3 つの誤差角を用いて 3 次元の回転行列は以下のように定義される。

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} c_y c_z & c_y s_z & -s_y \\ c_z s_x s_y - c_x s_z & c_x c_z + s_x s_y s_z & c_y s_x \\ c_x c_z s_y + s_x s_z & c_x s_y s_z - c_z s_x & c_x c_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで  $c_i = \cos \Delta\theta_i$ ,  $s_i = \sin \Delta\theta_i$ , ( $i = x, y, z$ ) と省略して記述している。BPM の回転誤差による  $x, y$  の変位は、 $R_{xyz}$  の左上 2 行 2 列の行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_y c_z & c_y s_z \\ c_z s_x s_y - c_x s_z & c_x c_z + s_x s_y s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

と記述できる。実際の回転誤差は数 mrad と小さいので ( $\Delta\theta_i \ll 1$ ) 以下の近似式が適用できる。

$$\begin{aligned} s_i s_j &\simeq 0 & (i, j = x, y, z) \\ s_i &\simeq \Delta\theta_i & (i = x, y, z) \\ c_i &\simeq 1 & (i = x, y, z) \end{aligned} \quad (3)$$

よって、BPM の回転誤差による  $x, y$  の変位は、

$$\begin{bmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta_z \\ -\Delta\theta_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

と近似でき、ビーム軸の回転誤差角  $\Delta\theta_z$  のみを測定すれば良い。式 (4) より 1 mrad の回転誤差による変位は、 $\Delta x = y \times 10^{-3}$ 、 $\Delta y = -x \times 10^{-3}$  と見積もることができる。

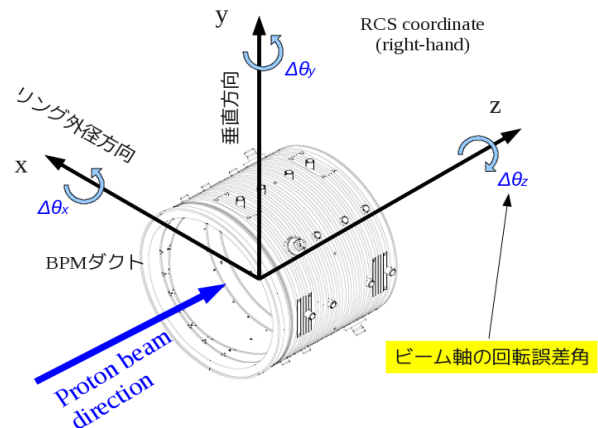


図 1: RCS BPM のダクトと回転誤差の定義

### 3. BPM ダクトの測量用治具、傾斜計

RCS のリング上には COD 測定用の対角線カット型の BPM が dispersion の大きさに合わせて内径 257, 297, 377mm の 3 種類がそれぞれ 33, 9, 10 台、入射の荷電変換装置付近の特大サイズ (BigBPM) 470x300mm, 504x212mm の 2 台、合計 54 台が設置されている。この

\* email : hatake@post.j-parc.jp

† 三菱電機システムサービスから出向

他に RF feedback 用の水平方向のみ電極を持った BPM が 3 台、チューン測定用の BPM が 1 台、324MHz の早い周波数のマイクロバンチを測定するための BPM が 2 台設置されている。COD 測定用の殆どの BPM はビーム軸方向のスペースが制限されたため補正電磁石の中に組み込まれ、渦電流効果を抑えるため薄厚のリブ構造である。また、四極電磁石のセラミックダクトと直接締結するため、チタン成形ベローズが溶接されている。図 2 は COD 測定用の BPM に測量用治具を取り付け傾斜測定をしている様子である。治具は Type1( $\phi 257$ ) 用, Type2,3( $\phi 297, \phi 377$ ) 用、RF feedback BPM 用、324BPM 用の 4 種類ある。BPM ダクトには図 3 のように取り付け加工がしてある。これらの治具は測量時以外は取り外される。BigBPM の 2 台に関してはダクトに治具取り付け加工がされておらずフランジの水平面にクランプ付で測量治具が付いている。この特殊な治具は永続的に取り付けられている。

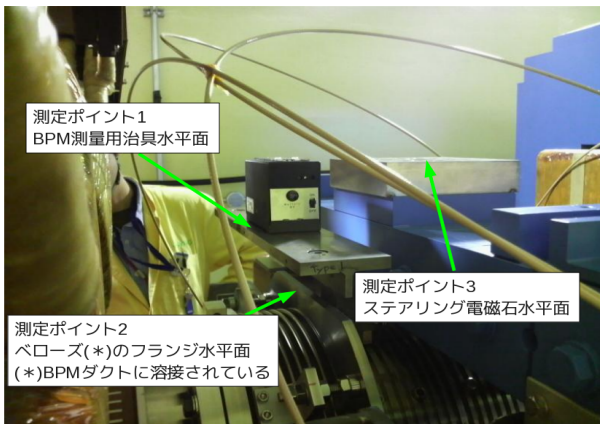


図 2: BPM に測量用治具を取り付け傾斜測定をしている様子

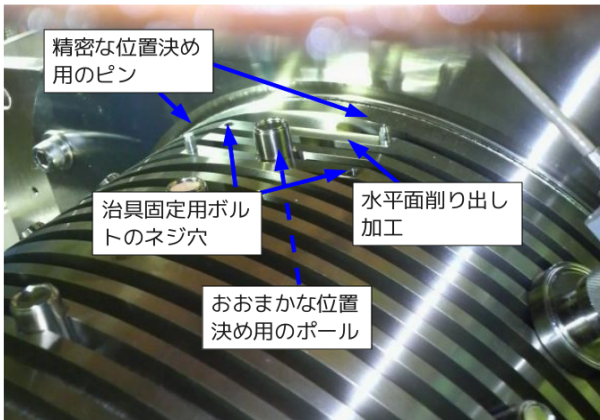


図 3: BPM ダクト上の治具取り付け加工部分

測定ポイントは、図 2 に示すように、治具の水平面だけでなく、ベローズのフランジ上面の水平面、補正電磁石の上の水平面でも測定した。測定に用いたデジタル傾斜計を図 4 に示す。測定には当初、新潟精機製のデジタル傾斜計を用いていたが、測定範囲が  $\pm 5 \text{ mrad}$  と狭く傾斜の大きな所では測定できなかったため、測定範囲が

$\pm \pi/4 \text{ rad}$  と大きい Taylor Hobson 製のものも併用した。両者とも最小読み値は  $0.01 \text{ mrad}$  で測定精度は  $0.02 \text{ mrad}$  である。測定方法は  $x$  軸 (図 1 参照) の方向に傾斜計を置き、一度ゼロリセットした後に  $180$  度反転させ、読み値の半分の値を傾斜値とした。



図 4: デジタル傾斜計 (左: 新潟精機、右: Taylor Hobson)

#### 4. 震災前のデータ (2007 年) と比較

測定結果を図 5 に示す。以下、震災後の全てのプロット点は 2 回測定した値の平均値である。震災前のデータは建設時の 2007 年のもので、ダクトに治具付で測定しており、黒丸のマーカでプロットしてある。震災後の 5 月、ダクトに治具付での測定は赤四角のマーカでプロットしてある。出射エリアの近くで  $-7 \sim 4 \text{ mrad}$  と大きくずれている場所がある。一方、フランジ上面での測定 (6 月、青三角マーカー) では大ききずれは見られず、おおよそ  $\pm 2 \text{ mrad}$  以内であった。また補正電磁石の上の測定 (6 月、緑三角マーカー) では傾斜は  $\pm 0.8 \text{ mrad}$  以内であった。

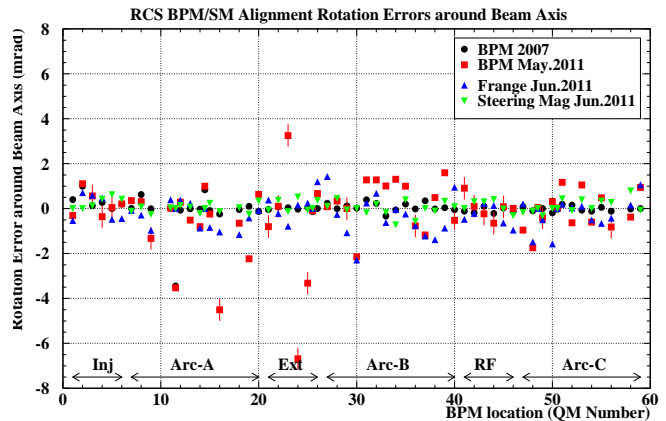


図 5: BPM のビーム軸の回転誤差 (傾斜角) の比較

フランジは BPM のダクトに溶接されているので本来なら治具付けの測定結果と一致するはずだが大きく異なっている場所がある。

図 6 は、震災前と後の BPM の傾斜角の差 (変位) をプロットしている。治具の測定では、Type2,3 で大きくずれている。フランジの測定では 324BPM の一つで  $4 \text{ mrad}$  近くずれている。

図 7 は、震災後の測定で BPM の傾斜角と補正電磁石の傾斜角の差をプロットしている。治具の測定では、Type2,3 と 324BPM の一つで大きくずれている。フランジの測定では RMS でほぼ  $0.7 \text{ mrad}$  以内にある。この結

果より、治具の取り付け精度が場所によって良くないのではないかと疑った。

わせたのピンが最後まで挿入できず何回もやり直すことがあった。おそらく場所により、ピンの工作精度があまりよくなかったのか、あるいは建設時からの経年変化により削り出しで薄くなった部分が若干歪んでしまったのではと推測される。結論として BPM の傾斜測定はフランジ上面を基準にすることとした。

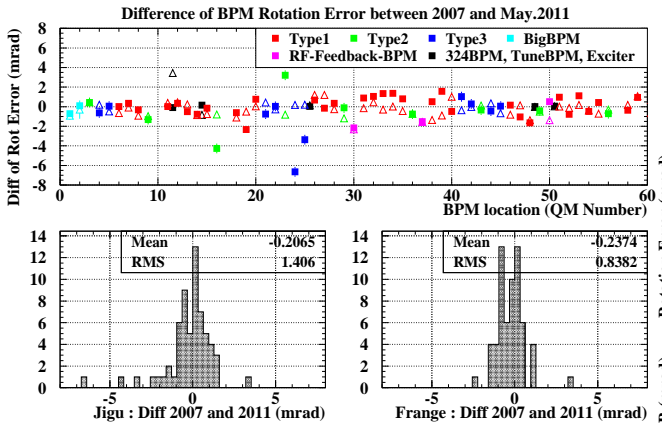


図 6: 震災前後の BPM の傾斜角の差 (■: 治具, △: フランジ) 色の違いは BPM の種類。ヒストグラムは差の分布 (左: 治具, 右: フランジ)

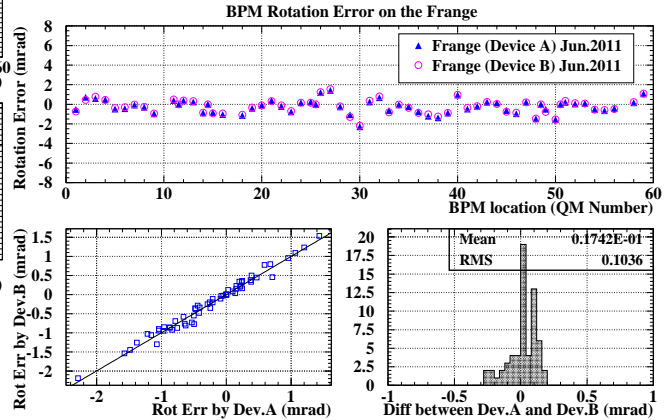


図 8: フランジ上面での 2 種類の傾斜計での比較

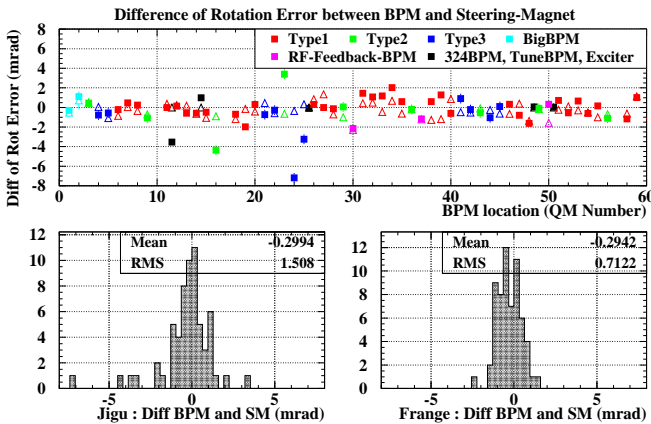


図 7: BPM と補正電磁石の傾斜角の差 (■: 治具, △: フランジ) 色の違いは BPM の種類。ヒストグラムは差の分布 (左: 治具, 右: フランジ)

## 5. 2 種類の傾斜計による比較

上記問題を解決するため、まずフランジの測定精度はどのくらいあるのか、また 2 種類の傾斜計で測定結果に違いはないかを調査することにした。図 8 は、震災後、ベローズフランジの上面での測定で、青三角マーカーが新潟精機の傾斜計 (Device A)、紫丸マーカーが Taylor Hobson の傾斜計 (Device B) で測定している。両者の測定結果は、測定者が異なっていたにも関わらず RMS で 0.1mrad 以内の精度でよく一致している。

## 6. 治具取り付けの再現性

次に、治具による測定精度がどれくらいあるかを調べるため、日を改めて再度測定した。全周分の再測定は時間の都合上できなかったため一部の場所で行った。

図 9 は、5 月の測定と 6 月の測定の比較である。2ヶ所はほぼ一致していたが、その他は明らかに大きな違いが見られた。実際、治具をダクトに接続するとき位置合

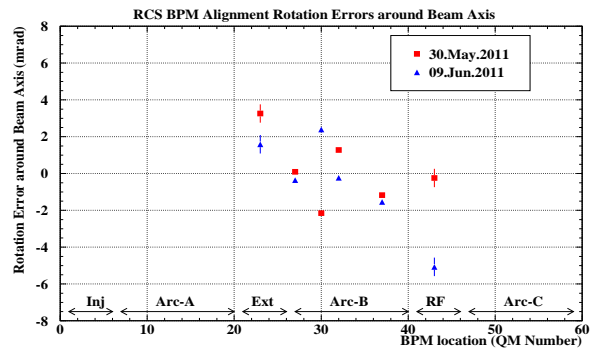


図 9: 治具の取り付けの再現性 (5 月と 6 月の測定の比較)

## 7. まとめ

震災による BPM のビーム軸の回転誤差の変化を見積もるため、治具、フランジ、補正電磁石の 3ヶ所で傾斜計を用いて測定した。結論としてフランジ上面の測定で平均値で -0.2mrad、RMS で 0.8mrad 程度のずれであり、BPM の再アライメントの必要はないと判断した。

## 8. 謝辞

本測定に協力して頂いた NAT の堀野さん、根本さん、三菱電機システムサービスの峯岸さん、大塚さんに感謝致します。

## 参考文献

[1] N.Hayashi, “ビーム位置モニター”, Text of OHO'10, Nov 2010(final update).