

## Operating experiences of the J-PARC MR BPMs

Takeshi Toyama<sup>1,A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Kotoku Hanamura<sup>B)</sup>, Shuichiro Hatakeyama<sup>B)</sup>, Naoki Hayashi<sup>C)</sup>,  
 Yoshinori Hashimoto<sup>A)</sup>, Shigenori Hiramatsu<sup>A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>, Seishu Lee<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>,  
 Junichi Odagiri<sup>A)</sup>, Kenichiro Sato<sup>A)</sup>, Junpei Takano<sup>A)</sup>, Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-0045

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

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

### Abstract

Experiences of operating BPMs at the J-PARC MR beam commissioning in 2008, 2009 are reported. The subjects are: (1) bug report, statistics and especially the effect of a beam duct step, (2) position resolution estimation, (3) test of beam based alignment.

## J-PARC MR BPMの運転経験

### 1. はじめに

J-PARC MR (Main Ring)は、2008年5月からビームコミッショニングを開始した。2009年6月までに30GeV加速、遅い取出し、速い取出しが実現している[1]。この間、BPM（ビーム位置モニター）はビーム軌道測定および関連するビームパラメータの決定に使用されてきた。ビームコミッショニング初期および設計ビーム・パラメータを表1にまとめる。表2には、3-50BT（RCSからMRへのトランスポートライン）、MR、入射ダンプ・ビームライン、アポートダンプ・ビームラインに設置されたBPMについてまとめる[2]。ここではコミッショニング初期の動作不良とその原因をまとめる。そのうちビームパイプ段差による電場の歪みで発生したと考えられるオフセット誤差については、原因の考察、応急対策、根本対策について述べる。次に現在のビームパラメータでの位置分解能の測定結果を示す。さらに、“Beam based alignment”の予備実験について述べる。

	FY 2008	Design	
Proton number	~4x10 <sup>11</sup>	4x10 <sup>13</sup>	p/bunch
Emittance (3 GeV)	~15	54	p mmmrad
Number of bunches	1	8	
Peak current	0.5 - 6	220	A
Ave. current	0.12 - 0.14	12-14	A
Bunch width	40 - 70		ns
$\beta$	0.9712 - 0.9998		
$f_{rev}$	186 - 191		kHz
Revolution period	5.38 - 5.24		ms
RF frequency	1.67 - 1.72		MHz

表1：ビームパラメータ

monitor	#	size
<b>3-50 BT</b>		
60-degree parallel cut	14	$\phi$ 200, $\phi$ 230
<b>MR</b>		
Diagonal cut	186	$\phi$ 130, $\phi$ 134, $\phi$ 165, $\phi$ 200, $\phi$ 257, 140x302
Stripline (loop coupler)	2	$\phi$ 134
Injection dump BT	2	$\phi$ 200, $\phi$ 320
Abort dump BT	2	$\phi$ 257

表2：3-50BTおよびMRのBPM

### 2. 初期エラー

運転初期に発生した主要なエラーについて述べる。

#### 2.1 統計

エラーの種類、件数と検出方法、対策を表3に列挙する。

エラーの内容	件数	検出方法	対策
ケーブル接続順	7	軌道解析結果の異常	接続順の修正
トリガ設定値	2	軌道解析結果の異常	設定値の修正
接触不良	12	信号波形異常	再接続、部品交換
異物混入	1	信号波形異常	真空容器内異物除去
ビームダクト段差	2	他BPMとの比較	他BPMとの比較

表3：初期動作不良

<sup>1</sup> E-mail: takeshi.toyama@kek.jp

ケーブル接続順のエラーは、入射エラーによるMRに沿った軌道の測定値と予想値との矛盾から判定した。トリガ設定値のエラーも、上記と同様の問題が発生したが、ケーブル接続修正によって解決できない事例では、これが原因だった。接触不良は、信号波形が正常ではなかった。これはケーブルの接続の増締め、部品交換で直った。BPM (3-50BT #12) については、真空容器を開いて目視検査した結果、異物 (金属小片) がch.4(Down)電極とビームダクト (GND) 間をまたいで挟まっていた。これを除去することにより直った。最後のビームパイプ段差による誤差については次節で述べる。

## 2.2 ビームパイプ段差による誤差

速い取出しセクションでは、狭い空間に機器を設置しなければならなかったため、大口径BPMと隣接する真空ダクトとの間に段差が生じてしまった (図1)。そのため系統的な誤差が発生した。

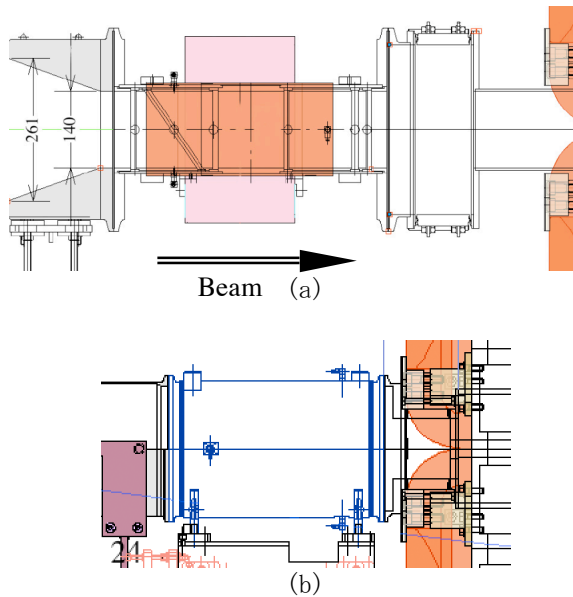


図1：速い取出しセクションのBPM。  
(a) 154番地 上流側はテーパ, 下流側は段差。  
(b) 155番地 上流側は同径, 下流側は段差。

まず、誤差発生の基本的原因を見るために、図2に示すように、ビームが円筒パイプの段差を通過して、中心軸に沿って走る場合について考察する。ビームは中心軸上なので、通常、対向する2つのBPM電極には同量の電荷が誘導される。しかし、ステップがあると、図3のようにダクト表面の電荷分布がz軸方向の依存性を持ってしまう。対角線分割電極はz軸方向に非対称なので、この電荷分布の影響を受けて系統誤差が発生することになる。図3は、Field matchingによって、 $a=60\text{mm}$ ,  $b=128.5\text{mm}$ の場合についてのパイプ表面の $E_r$  (電荷分布に比例) を求めたものである[3]。

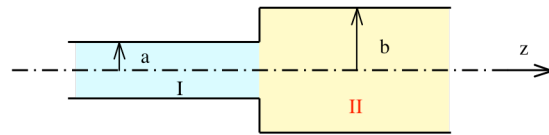


図2：円筒同軸パイプの段差。

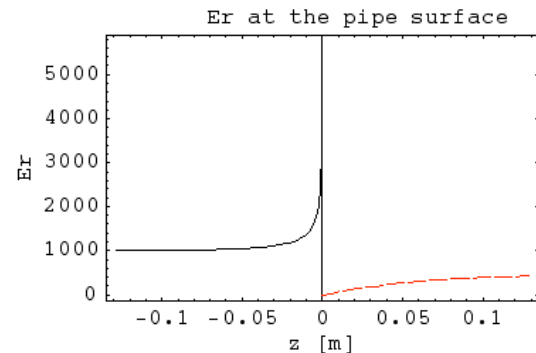


図3：z軸に沿ってプロットしたパイプ表面電荷。

補正のために、閉軌道を変化させ、隣接するBPMの測定データと比較した結果、以下の補正値が得られた：

BPM#	オフセット	感度係数
#154	6.05 mm	0.977
#155	-8.83 mm	1.080

今後の対策は以下の通りである。#154については、段差を解消すべく、ベローズ部内側にBPM内壁と同じ寸法で金属薄板を挿入する。#155はそのようなスペースが無いので、ビームベース校正により精度を上げたオフライン補正のままで済みます。

## 3. 位置分解能

現在はバンチ当たりビーム強度が設計値の1%程度で、かつほとんど1バンチ加速であり、信号が小さいため、データ1点 (約 $50\mu\text{s}$ —リング周回数にして約10ターン相当) の位置分解能は数 $100\mu\text{m}$ である。分解能向上のために平均操作を行なっている。

まず、データのバラツキにより分解能を推定する。入射フラットボトムにて、ビーム強度 約 $4 \times 10^{11}$  protons/pulse, 1バンチのビームを蓄積し、各BPMで1秒間1000点のデータを取った。そのバラツキをプロットしたものが図4である。Horizontalデータのバラツキが一部で大きくなっているが、このバラツキは約350Hzでピークを持ちシンクロトロン振動由来と考えられる。1000点を平均したデータのバラツキは、BPMの場所に大きくならず、 $\sigma=30\mu\text{m}$ 以内であった。

3 BPM相関法[4]による方法では、79, 80, 81番地で $\sigma=450\mu\text{m}$ となった。やや大きめになっている理由は調査中である。

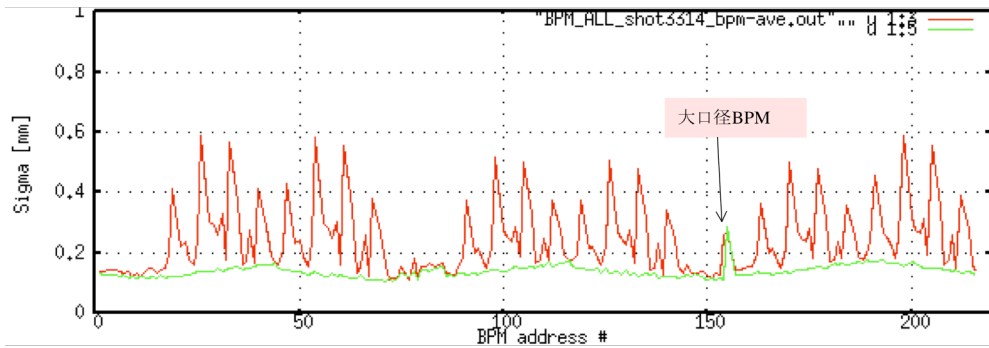


図4：BPMのバラツキ。入射フラットボトム1秒間（1000点）。Horizontal:赤線, vertical:緑線。

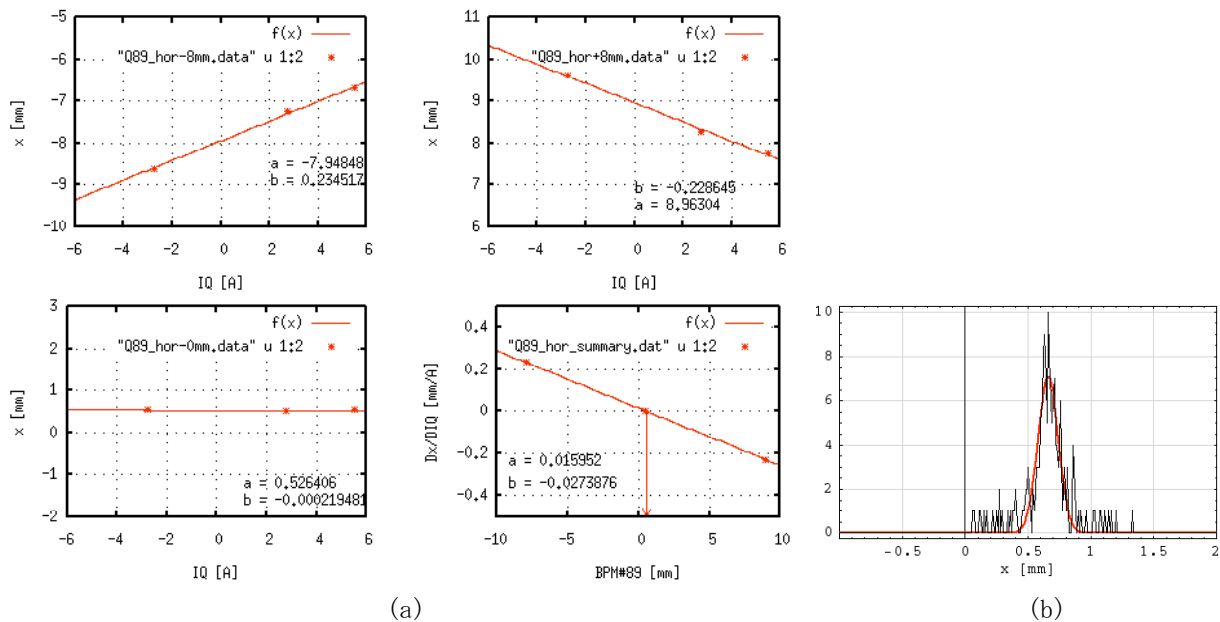


図5：Beam Based Alignment 89番地のBPMのhorizontal面の校正結果。  
(a)BPM89のみによる、(b)全周のBPMによる解析結果。

#### 4. ビームベース校正

予備実験としてビームベース校正 (beam based alignment) を1台のBPM(BPM89)の水平方向について行なった[5]。3GeV入射フラットボトムで約2秒間ビームを保持、隣接する4極電磁石QFN89の補助巻線に電流IQ=0, ±2.75, ±5.5A (主電流の0, ±1.47, ±2.93%)を流し、各4極電磁石の電流設定で0, ±8 mmのバンパ軌道を作った。ビームは1バンチ、約 $4 \times 10^{11}$ pppとした。解析には入射系電磁石の変動が落ち着く後半1sに1ms間隔で記録した全周BPMデータを使用した。1000点の平均値 (前節,  $\sigma < 30 \mu\text{m}$ ) を使った。各バンパ軌道でIQを変えたことによるBPM89での位置測定値の変化を図5 (a)に示す。BPM89での位置測定値と $\partial x_{89} / \partial I_Q$ のプロットから、BPM89のオフセットを得る。一方 $\Delta \theta_{89} = x_{89} \times \Delta K_{Q89}$ によるCODは全周にわたって発生する。従って、 $\Delta \theta_{89}$ にたいするn番地のBPMでのCOD応答によっても同様の処理ができる。結果は、図5 (b)に示したように、 $\Delta x = 660 \pm 80 \mu\text{m}$ となった。

#### 5. まとめ

MR BPM (3-50BT, Injection dump, Abort dumpを含む)の初期エラーの集計およびビームパイプの段差による系統誤差について報告した。また、MR BPMの位置分解能は、1バンチ、約 $4 \times 10^{11}$ ppp、データ1点 (約50  $\mu\text{s}$ —リング周回数にして約10ターン相当)の測定で $\sigma = 100 \sim 600 \mu\text{m}$ であった。平均操作により $\sigma < 30 \mu\text{m}$ が得られ、ビームベース校正ではこのデータを使った。ビームベース校正の予備試験でBPM89のhorizontalのオフセットは $660 \pm 80 \mu\text{m}$ であった。今後、全周のビームベース校正を行なう。

#### 参考文献

- [1] T. Koseki, in these proceedings.
- [2] T. Toyama et al., Proc. of the 5th Annual Meeting of Part. Acc. Soc. of Japan, (2008) 300 (Japanese).
- [3] H. Tsutsui, CERN-SL-2000-003 AP.
- [4] M. Arinaga, S. Hiramatsu et al., NIM A499 (2003) 100.
- [5] M. Masuzawa, Proc. of EPAC2000, (2000) 1780.