

J-PARC350BT 光学パラメータ詳細測定のための高放射場用 BPM の開発

THE NEW BPMS FOR THE J-PARC 350BT OPTICS MEASUREMENTS AT HIGH RADIATION FIELDS

佐藤 健一郎^{#A)}, 手島 昌己^{A)}, 外山 毅^{A)}, 花村 幸篤^{B)}, 河内 敏彦^{B)}

Kenichirou Satou^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Kakeshi Toyama^{A)}, Kotoku Hanamura^{B)}, Toshihiko Kawachi^{B)}

^{A)} J-PARC/KEK

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

Abstract

In order to investigate the optics parameters of the 3 GeV RCS to 50 GeV MR Beam Transport (350BT) in detail, we have installed 3 Beam Position Monitors (BPMs) additionally in the gap of the quadrupole magnets QFS1, QFS2, QFS3 in the collimator area of the 350BT. The old BPMs are the electro-static type BPM, however, as for the new BPMs, the magnetic loop coupling type BPM were adopted to diminish pseud signals from the induced charge on the signal pick-up electrodes; some of the scattered primary and generated secondly charged particles from the collimators can go directly into electrodes and generate charges. The details of the new BPMs are described in this paper with the estimated position resolutions using the 3-BPM method.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の加速器群は 400 MeV まで加速する Linac、25 Hz 運転の 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)、さらに 30 GeV まで加速する Main Ring synchrotron (MR) で構成されている^[1]。RCS の定格出力 1 MW の大部分は物質生命科学研究施設 (MLF) へ送られるが、2.48 ~ 6 s 毎に MR へ入射し 30 GeV まで加速する。

ビーム強度は定格で 1 バンチあたり 4E13 個であり、2 バンチ (1 バッチ) をひとまとめに 40 ms 毎 4 回入射する。MR では受け取った 8 バンチビームを 30 GeV まで加速する。定格は 750 kW である。3 GeV RCS to 50 GeV MR Beam Transport (350BT) は RCS から MR へのビーム輸送路である。

MR のビームロスの大部分はバンチ入射から加速の初期段階で発生している。入射ビームの設計エミッタンスは 54π であるが MR のアパーチャーに十分な余裕がないためであり、入射時のビーム振動を極力抑えることが重要である。また、350BT のコリメータエリアでビーム外縁部 (ハロー、テール) 部を取り去り、MR での無用なビームロスを低減化することも必要である。

当初 350BT では軌道測定のために静電誘導型 BPM が 14 台設置されたが、コリメータ部には BPM が設置されなかった。このためコリメータ内部のビーム軌道を正確に捉えることができず、コリメータ調整に影響をきたしていた^[2]。また、光学補正上も重要であることが指摘されたため、昨年 12 月に新たにコリメータ内の 4 極電磁石 (QM) QFS1、QFS2、QFS3 に BPM を設置し、本年 5 月からの光学パラメータ補正に利用している^[3]。

本稿ではあらたに設置した BPM (ここでは QFS1-BPM、QFS2-BPM、QFS3-BPM と記す) の構造、インストール設置誤差、ワイヤ法^[4]の校正結果、3BPM 法^[5]で導出した誤差分布について報告する。

2. 磁場カップル型 BPM

350BT では主に静電誘導型 BPM が使用されているが、コリメータエリアでの使用を考えると、コリメータで散乱された荷電粒子が直接電極に入射することによる影響が無視できない。この効果を避けるために電極面積を小さくできるループアンテナを利用した磁場カップル型 BPM を採用した。図 1 にループアンテナ、ビーム、磁場の関係を模式的に示している。ループアンテナとチャンバー壁とで囲まれた領域を交差する磁束の時間変化により電場が発生する。

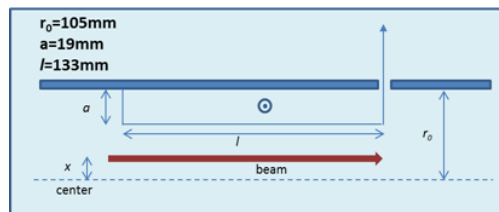


Figure 1: Schematic drawing of the loop antenna of the BPM and beam.

ビームサイズを無視できるペンシルビームの場合の Sensitivity(S)は以下のように計算できる^[6]。

$$U(x, t) = -\frac{\mu_0 l}{2\pi} [E(x) - F(x)] \frac{dl(t)}{dt}$$

$$\frac{dl(t)}{dt} = -N_B e_0 \frac{1}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} t e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

$$E(x) = \ln\left(\frac{x - r_0 + a}{x - r_0}\right)$$

$$F(x) = \ln\left(\frac{r_0^2 - r_0 x + ax}{r_0^2 - r_0 x}\right)$$

$$U_1 = U(x, \sigma)$$

$$U_2 = U(-x, \sigma)$$

$$Q = \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}$$

$$S = \left| \frac{dQ(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

上記式で評価した結果を図 2 示す。実線は応答関数 $Q(x)$ の計算結果を示し、データ点はワイヤ法の測定結果である。 $x=0$ mm 位置の微分係数から $s=0.0192$ %/mm であった。

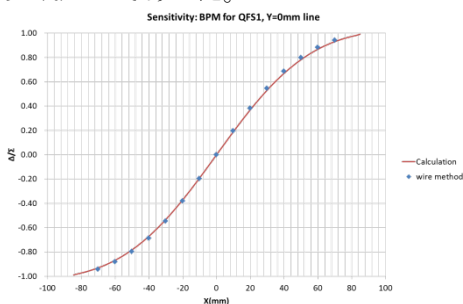


Figure 2: A calculated response function (solid line) and measured data (solid point) by the wire method.

図 2 からわかるように応答関数は非直線性を示している。このためにビームサイズが無視できない場合は誤差が生じることになる。設計エミッタンス 54π (3σ を仮定) の場合、QFS1、QFS2、QFS3、では $\sigma=10$ mm 程度である。この誤差を以下のように評価した。

横方向ビームプロファイルを以下のようにガウス分布と仮定し、ペンシルビームの場合の応答関数 $Q(x)$ に対してビーム分布を畳み込み積分をした結果 $\hat{Q}(x_0)$ がビームプロファイルを考慮した応答関数であるとする。

$$\rho(x, x_0) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$\hat{Q}(x_0) = \int \rho(x', x_0) Q(x') dx'$$

よってビーム位置の評価誤差は、

$$\delta x_0 = x'_0 - x_0 \cong \frac{1}{dQ(x)/dx} \delta Q = \frac{1}{dQ(x)/dx} (\hat{Q} - Q)$$

である。図 3 は計算結果である。

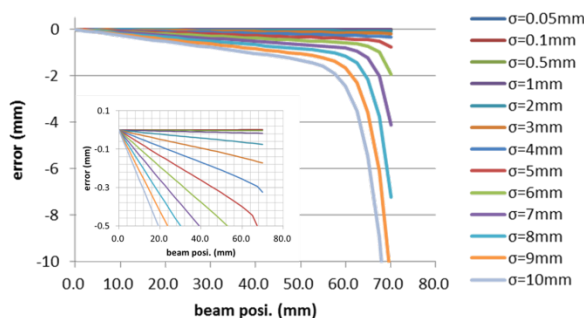


Figure 3: Nonlinearity of the response functions underestimate the beam position in case of real beams. Position shift for the beam having transverse Gaussian distribution.

計算の結果、ビーム位置が 50 mm 以内では変位は比例の関係になっており、 $\sigma=10$ mm の場合はビーム中心変位の-2.3%が誤差になる($x=10$ mm のとき変

位-230 μ m)。

3. 構造と設置誤差

図 4 は構造図、ループアンテナの寸法図、実物の写真である。BPM ヘッドに真空ダクトを接続した構造で、ダクトを QM 内部に挿入する。完成時の重量を減らし設置しやすくし、さらに放射化を抑えるためにチタン製とした。作業エリアがコリメータ遮蔽壁の内部にあることもあり、固定装置の大きさには制限がある。作業性を考慮し、本体 C 部の固定用タップアナに上下 2 式の固定治具を取り付け QM ヨーク側面にあるタップ穴に BPM ヘッドを固定する片持ち構造を採用した。ビーム通過後の無用な Wake 電場を避けるために A 部、C 部内部を円錐形に加工している。

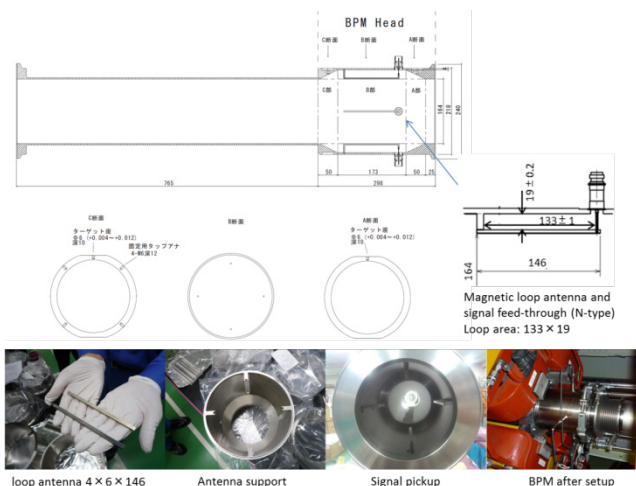


Figure 4: Schematic drawing and photos of the BPM.

ループ面積の精度が測定誤差に影響を与えるために、ループアンテナの設置精度が重要である。ループアンテナはビーム上流側を B 部にあるアンテナサポートでチャンバーに固定し、多端は N 型フィードスルーの端子に接続した。アンテナサポートは精度を確保するために B 部と一体構造の削り出しで製作し、ループアンテナを点溶接したのちアンテナの通し穴にフィードスルーの丸棒電極を挿入し点溶接した。実際のループ面積のばらつきはワイヤ法による校正で補正される。

設置後の測定は A 部と C 部の上部にあるターゲット座にレーザートラッカー・ターゲットを乗せ 3 次元測定を行った。BPM 固定後には C 部のターゲット座が固定治具と QM のコイルに隠れて使用できなくなるため以下の方法で測定した。

- 1) 設置前の QM 上流側、下流側のターゲット座を測定し、QM 中心ラインを求める
- 2) QM の上部を外し (半割)、下部固定治具で BPM を固定した後、BPM 上・下流部のターゲット座を測定する
- 3) QM 上部を戻し、上部固定治具で固定後、QM 上下流部と BM 下流部のターゲット座を測定し大きな変位がないことを確認する

得られた結果から、設置誤差の補正式は、

$$\begin{aligned} \text{QFS1 BPM: } x' &= 0.99998x + 0.00629y + 0.253 \\ & y' = -0.00628x + 0.99998y - 0.505 \\ \text{QFS2 BPM: } x' &= 0.99999x + 0.00410y + 0.026 \\ & y' = -0.00410x + 0.99999y - 0.600 \\ \text{QFS3 BPM: } x' &= 0.99998x - 0.00663y - 0.174 \\ & y' = 0.00663x + 0.99998y - 0.765 \end{aligned}$$

であった。ここで(x,y)が補正前の位置、(x',y')が補正後の位置を表し、第1、第2項が回転を、第3項がオフセットを表す。y方向のオフセットが大きいのはBPMの固定が片持ち構造であるため、設置時にBPMヘッドの自重で下方方向に変位したためである。

4. 応答関数校正

インストールに先立ちワイヤ法⁴⁾で校正データを取得した。測定範囲は-70 mm~70 mmである。-10~10 mmの範囲は1 mmピッチで、-20~20 mmの範囲を2 mmピッチで、-70 mm~70 mmの範囲を10 mmピッチで測定し、多項式近似した。応答関数は-20~20 mmの範囲は3次の多項式で近似し、-70~70 mmの範囲を5次の多項式で近似した。図5に多項式と測定値のズレを示す。

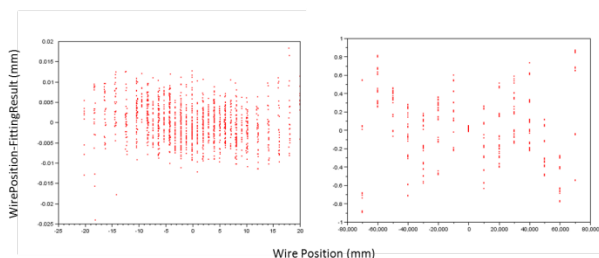


Figure 5: Fitting error of the response function. Right figure is response function for narrow area of -20~20 mm and the other is that for wide area of -70~70 mm

5次の多項式を6次で試したところ誤差に大きな変化はなかったため、ビーム位置が20 mmを超える場合には5次の多項式を使用する。

得られた応答関数により、-20~20 mmの範囲(small aperture)は±20 μmの誤差で、-70~70 mmの範囲(large aperture)は±1 mmの誤差で再現可能である。

5. 信号処理系

図6に信号処理系を示す。BPMからは4 mのポリエチレン充実絶縁体のセミリジットケーブルでコリメータ遮蔽壁の外に設置したRFトランスフォーマーまで伝送し、さらに3NBT棟にあるオシロスコープ(アジレント社製DSOX4034A: BW 350 MHz、Sampling 2.5G Sa/s)まで200 mの高発泡ポリエチレン同軸ケーブルで伝送する。オシロスコープで処理した波形信号はEPICSレコードに変換し信号処理する。

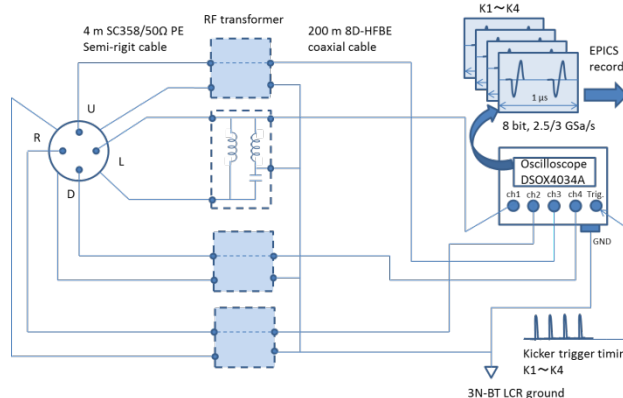


Figure 6: Data taking system.

350BTの機器はMRのD1電源棟に設置されているが、設置スペースの関係上オシロスコープは3NBT棟に設置した。グラウンドループおよび共通モードノイズを避けるために1次-2次間のグラウンドが絶縁されているR&K社のRFトランスフォーマーTR010-0B(50 Ω、BW: 0.1~200 MHz)を使用している。特性をそろえるために20個購入したもののうち、対向電極毎に特性がそろったもの12個を使用した。図7にQFS1-BPM用RFトランスフォーマーのS21特性を示す。3BPMの特性のばらつきは平均0.05%、最大0.15%である。このばらつきによるビーム位置誤差は平均13 μm、最大40 μm程度であり、実用上問題ないレベルである。

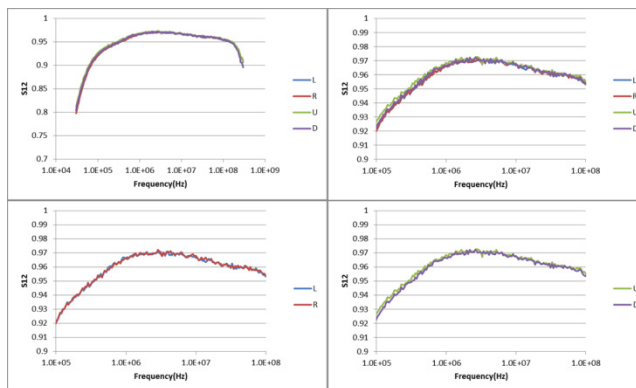


Figure 7: S21 parameter of the RF transformer for QFS1-BPM.

図8にオシロスコープの垂直レンジ、水平レンジを変えて測定した生波形を示す。ビーム強度はバンチあたり6.1E11個で、QFS1-BPMの信号ポートからのものである。右はK1タイミングの1バンチ入射したものを示している。中央は垂直レンジを拡大したものである。バンチ通過前のノイズレベルは高々2mV程度であるが、バンチ通過後に0.5-数GHzの高周波ノイズが観測されており、ノイズレベルは8 mVpp程度に悪化している。バンチが励起したWake波と、RFトランスフォーマー・BPMヘッド間の反射波が重畳したものと考えられるが原因は特定されていない。右は水平レンジを変更したものであ

り、4 mVpp 程度の 250 kHz ノイズと U、D ポートからは前バンチ通過後約 1 μ s に 10 mVpp の反射波が観測された。反射波はすべての BPM で観測されているが、他は高々 3 mV である。ノイズ成分と反射の原因は現在調査中である。

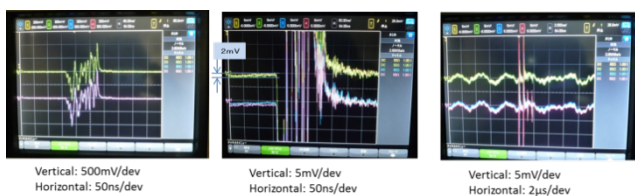


Figure 8: Raw signal of the output waveform from QFS1-BPM signal ports.

ビームバンチは 40 ms 毎 2 バンチが 4 回入射されるが、ビームが存在する時間はそれぞれ 1 μ s 程度である。このためデータ取得にはオシロスコープのセグメントメモリ機能を使用し効率的に波形を取得した^[7]。キックトリガタイミングに同期して 1 μ s 分のデータを 4 回取得する。しかしながら現状のシステムでは垂直精度が 8 bit に制限されてしまう。これはオシロスコープのファームウェアによるものではなく、EPICS レコードのデバイスサポートが原因である。現状ではこの精度がビーム位置精度を制限しているため、ソフトウェアの改良が必須である。

図 9 に得られた波形データを示す。ビームの強度はバンチあたり 1.4E13 であった。左がセグメントメモリで取得した生波形であり、解析では上記の無用なノイズ成分を削除するため、この波形を 1 次 BPF(370 kHz-4.34 MHz)の IIR フィルタで処理し(右の波形) 各々の波高値を計算する。得られた波高値から Q 値(Δ/Σ)を計算し、応答関数からビーム位置を算出し、さらに設置誤差を考慮して最終的なビーム位置を得る。

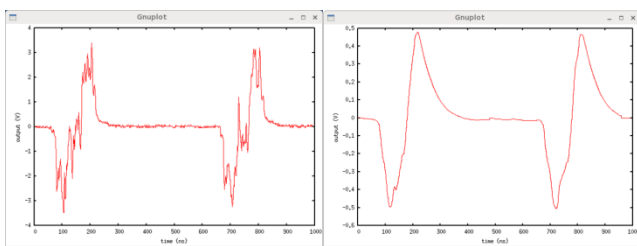


Figure 9: Waveform of the signal (left). Right figure shows the waveform after 1st order IIR BPF (370 kHz-4.34 MHz).

6. 3-BPM 法による測定精度確認

測定した位置の精度を確認するために 3-BPM 法^[8]を採用した。2014 年の 6 月 24、25 日の連続運転時に取得したデータを解析した。図 10 は設置した 3 台の BPM の水平位置の相関を示している。データは 3 次元平面上に分布することがわかっており、図中の平面は z 軸データと平面の誤差を最小二乗法で最小化したものである。

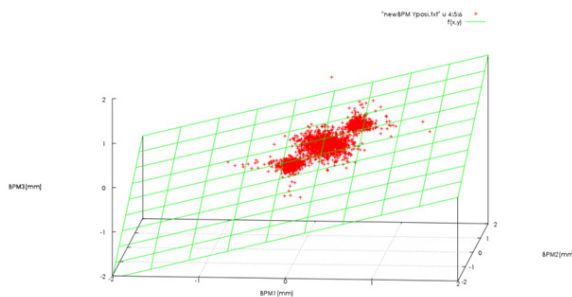


Figure 10: Correlation between QFS1-BPM, QFS2-BPM, and QFS3-BPM horizontal beam position.

図 11 は平面からのずれを集計したものである。実線は分布がガウス分布であると仮定して最小二乗法で評価した結果である。得られた分散値を表 1 に示す。

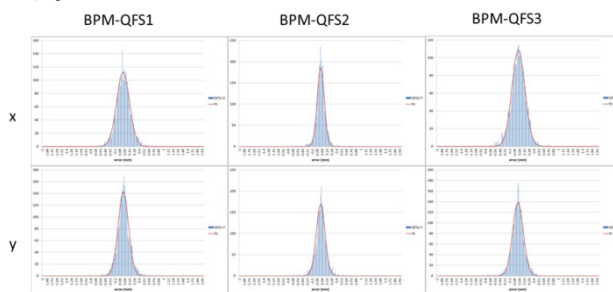


Figure 11: Error distributions of the beam position and fitting results using gauss function.

Table 1: Position Resolution in Unit of [mm] Estimated by Using the 3-BPM Method

	BPM-QFS1	BPM-QFS2	BPM-QFS3
Horizontal	0.159	0.088	0.162
Vertical	0.129	0.109	0.133

7. まとめと今後の課題

350BT 光学パラメータを詳細に研究するためにコリメータエリアに 3 台の BPM を設置した。コリメータ部では、散乱ビームが BPM 電極に入射することによって発生する擬信号の影響が無視できないため電極面積を小さくできるループアンテナを利用した磁場カップル型 BPM を採用した

BPM は QM ヨークに固定治具で固定し、レーザートラッカーで設置誤差を測定した。水平位置の平均オフセットは 0.035 mm、-垂直位置の平均オフセットは平均-0.623 mm であった。垂直位置が下がっているのは専用の支持架台をもたない片持ち構造であるためである

各 BPM は設置前にワイヤ法による校正を行い、応答関数を求めた。ビーム位置が-20~20 mm の範囲が 3 次元多項式で、それを超える-70~70 mm の

範囲は 5 次元多項式で評価した。評価誤差はビーム重心位置-20 mm~20 mm の範囲で $\pm 20 \mu\text{m}$ 、-70~70 mm の範囲で $\pm 1 \text{mm}$ である。ビーム位置は得られた応答関数と設置誤差を補正して求める。

測定精度は水平位置の精度が平均 $136 \mu\text{m}$ 、垂直位置の精度は $124 \mu\text{m}$ であった。もっともこの精度はあくまでも BPM 中心に対する相対誤差であり、BPM 中心の QM に対するズレは Beam Based Alignment^[8]によって求なければならないが、未実施である。また、より測定精度を上げるためには各信号 L、R、U、D に対する測定系のゲインのズレを校正しなければいけない (Beam Based Gain Calibration^[9])。

残念ながらコリメータで散乱されるビーム由来の荷電粒子の影響も未確認である。これはビームをコリメータ Jaw にあてて、確かめることができる。ビーム試験再開後すぐに確認する予定である。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Harada *et al.*, "OPTICS TUNING AT THE J-PARC 3-50BT LINE", Proc. of the PASJ10, Nagoya, Aug. 3-5, 2013.
- [3] H. Harada, *et al.*, "Optics Tuning in the J-PARC 3-50 Beam Transport Line for Beam Collimation", Proc. of the 2nd J-PARC symposium, Tsukuba, July 12-14, 2014.
- [4] K. Hanamura *et al.*, "DEVELOPMENT OF CALIBRATION SYSTEM FOR BPM AT J-PARC 50GEV SYNCHROTRON", Proc. PASJ3, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [5] 平松成範, 加速器のビームモニタ, 平成 15 年度技術部職員専門研修, KEK レポート.
- [6] N. Baboi, *et al.*, "MAGNETIC COUPLED BEAM POSITION MONITOR FOR THE FLASH DUMP LINE", Proc. of the BIW10, Santa Fe, New Mexico, US, TUPSM093, p. 420.
- [7] M. Tejima, *et al.*, "SHOT-BY-SHOT BEAM POSITION MONITOR SYSTEM FOR BEAM TRANSPORT LINE FROM RCS TO MR IN J-PARC", Proc. of IPAC'10.
- [8] M. Masuzawa, Proc. of EPAC2000, (2000) 1780.
- [9] M. Tejima *et al.*, "Beam Based Gain Calibration of Beam Position Monitors at J-PARC MR", Proc. Of DIPAC2011, MOPD22, 2011.