

SPring-8 アップグレードに向けたビーム位置モニタの開発

DEVELOPMENT OF BEAM POSITION MONITOR FOR SPring-8 UPGRADE

前坂比呂和^{#, A)}, 出羽英紀^{B)}, 藤田貴弘^{B)}, 正木満博^{B)}, 高野史郎^{A), B)}

Hirokazu Maesaka^{#, A)}, Hideki Dewa^{B)}, Takahiro Fujita^{B)}, Mitsuhiro Masaki^{B)}, Shiro Takano^{A), B)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

A precise and stable BPM system for the SPring-8 upgrade has been developed in order to stably provide brilliant X-rays to experimental users. The required position resolutions are 0.1 μm rms for a COD-mode with 100 mA stored current and 100 μm rms for a single-pass (SP) mode with a 100 pC single bunch. The long-term stability is demanded to be 5 μm /month. The electric center accuracy should be 100 μm std. (2σ max.) for a first-turn steering for initial machine commissioning. We designed a precise BPM electrode and block by taking into account the signal intensity, trapped-mode heating, etc. We have also tested some radiation-hard signal cables to prevent any drifts from the deterioration of the cables. For readout electronics, an original design based on the MicroTCA.4 standard and a commercial module (Libera Brilliance+) have been developed and evaluated in parallel. A prototype of the BPM system was installed to the present SPring-8 storage ring and beam data have been acquired. Position resolutions for both COD- and SP-modes were confirmed to be better than the required values. The electric center and the long-term stability data were indicated to be sufficient for the SPring-8 upgrade. Thus, the BPM system is almost ready for the SPring-8 upgrade.

1. はじめに

SPring-8 では、高輝度化アップグレード計画として、ビームエネルギー6 GeV の 5 ベンドアクロマトラティスで、約 140 pm rad のエミッタンス¹を達成する電子蓄積リングへの入れ替えを検討している[1]。それにより、60 keV 以下の X 線で現 SPring-8 の 20 倍以上の輝度をもつ放射光を発生できるようになる。この高輝度 X 線を最大限に利用するためには、電子ビーム軌道を安定化することにより光軸を安定に保つことが不可欠である。また、高輝度を目指す低エミッタンスラティスではビームの動力学的安定領域が狭くなるため、コミッショニング時には 4 極磁石等の磁場中心に精度よくビームを導かなければならない。そこで、これらの要求を満たす高精度・高安定なビーム位置モニタ (BPM) を開発し、その性能評価をおこなっている。

放射光軸の安定化については、光源点での電子ビームサイズが水平約 28 μm std.、垂直約 6 μm std. であり、X 線の拡がり角は水平約 5 μrad std.、垂直約 17 μrad std. となるので、光軸の変動はそれらよりも十分小さい値に抑えなければならない。そのため、BPM の closed-orbit distortion (COD) モード測定の安定性として 1 か月あたり 5 μm pk-pk を要求値とした。このとき、約 5 m の挿入光源用直線部の両端の BPM でビーム方向を測定すれば 1 μrad 程度の角度安定性が期待できる。

コミッショニング時には、片側水平約 10 mm、垂直約 2 mm という狭い安定領域の中に電子ビームの閉軌道を精度よく合わせていかなければならない。その最初のステップとして、入射されたビームの 1 周回目の軌道を single-pass (SP) モードにより高い位置分解能で測定する必要がある。同時に、BPM の電気中心が隣接する 4 極

磁石等の磁場中心に正確に合っていないなければならない。位置分解能としては、100 pC の入射ビームに対して 100 μm std. が必要とされており、BPM 電気中心誤差としては 100 μm std. (2σ max.) が要求されている。

これらの要求を満たすよう、ボタン電極や BPM ブロックを設計・試作し、その評価をおこなっている。信号ケーブルにおいても放射線環境で安定性を損なわないものを選定し、評価している。また、読み出し回路としては、市販品の Libera Brilliance+ [2]の評価をおこないながら、MicroTCA.4 [3]ベースのものを開発している。試作したものは単体での評価をおこない、現 SPring-8 でのビーム試験もおこなっている。本稿では、BPM システムのデザインと試作品の評価、ビーム試験の結果などについて述べる。

2. BPM のデザイン

BPM システムのデザインとして、電極とブロック、信号ケーブル、読み出し回路について順に述べる。

2.1 BPM 電極とブロック

BPM 電極とブロックの設計にあたっては以下のことを考慮した。

- SP モードにて十分な信号強度が得られること。
- Trapped mode 等による発熱が十分小さいこと。
- 温度変化による変形が十分小さいこと。
- 加工誤差による電気中心誤差が十分小さいこと。
- 非磁性であること。
- 上下流の真空チェンバの断面形状と一致すること。

その結果、Fig. 1 に示すような BPM 電極とブロックとなった。

真空チェンバ断面には上下に 20 mm 幅のフラット部があり、その間隔が 16 mm となっている。そのフラット部にできるかぎり大きなボタン電極を付けて

[#] maesaka@spring8.or.jp

¹ 挿入光源によるダンピングがない場合。

より大きい信号強度を得ることを考え、12 mm スパンで直径 7 mm のボタン電極を取り付けることとした。電極を挿入する穴の径は 8 mm とし、電極とブロックのギャップは 0.5 mm とした。BPM ブロックの材質は真空チェンバと同じ SUS とした。BPM ブロックには冷却水配管を設けることとし、チェンバ内面や電極周辺での電子ビームによる温度上昇を抑えるようにした。

電極の材質は非磁性、かつ、熱伝導率・電気伝導率が良いモリブデンを採用した。それにより、Trapped mode による発熱を低減することができる。また、線膨張率が絶縁体を使用するアルミナセラミクスに近く、ロウ付けによる接合がしやすいことも理由として挙げられる。外側のスリーブはブロックと同じ SUS とした。モリブデンに比べて SUS は電気伝導率が低いため、Trapped mode による発熱は SUS 側にて多く発生する。電極とブロックの接合は入熱量を制御しやすい電子ビーム溶接 (EBW) とし、溶接時の収縮による寸法変動が起こりにくくするようにした。

コネクタは逆極性 SMA とした。というのは、内導体のメス型コネクタはバネで接触を担保するが、ロウ付けなどの熱処理にてバネ性が失われる恐れがあるためである。逆極性 SMA であれば、内導体がオス型なので、そのような心配がなくなる。

BPM の位置感度、信号強度や Trapped mode 等は CST Studio [4] による 3 次元電磁界シミュレーションにて解析した。位置感度については、ビーム位置を

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_x}{2} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} + \frac{V_4 - V_3}{V_4 + V_3} \right) \\ \frac{k_y}{2} \left(\frac{V_1 - V_4}{V_1 + V_4} + \frac{V_2 - V_3}{V_2 + V_3} \right) \end{pmatrix}$$

にて計算する場合、位置感度係数 k_x , k_y はそれぞれ 6.8 mm, 7.7 mm となることがわかった。ここに、 $V_1, \dots, V_4$ は各電極からの信号強度である。コミショニング時に想定される 100 pC の SP モード測定では、読み出し回路のバンドパスフィルタ (RF 周波数 508.76 MHz) のバンド幅が 10 MHz のときに得られる信号強度が -53 dBm となることがわかった。この信号強度の場合、位置分解能は 70 μm std. 以下にできる計算となり、要求を満たすことができる。COD モードにおいては、100 mA 蓄積時の信号強度が -12.5 dBm と計算されており、1 kHz バンド幅にて 0.1 μm std. の位置分解能を出すのに十分であることが示された。

Trapped mode 等による発熱についてもシミュレーションをおこなった[5]。まず、電極の厚さなどの寸法を変えて計算し、発熱が小さくなるよう最適化した。その結果、電極の厚さは 5 mm とすることにした。次に、得られた寸法で発熱量を計算した。フィリングパターンごとにバンチ長と発熱量の関係をプロットしたものを Fig. 2 に示す。アップグレード後の自然バンチ長は 7 ps rms であるが、バンチ電流が 0.5 mA のときは 10 ps 以上、1 mA のときは 14 ps 以上となることが予想されている。したがって、BPM ブロックの発熱は最大 5 W 程度と見積もられた。この入熱量をもとに ANSYS [6] による熱シミュレーションをおこなったところ、30°C の冷却水を流した場合、電極の最大温度は約 35°C となった。

この程度の温度上昇であれば、熱による大きな変形などの心配はないだろうと考えられる。

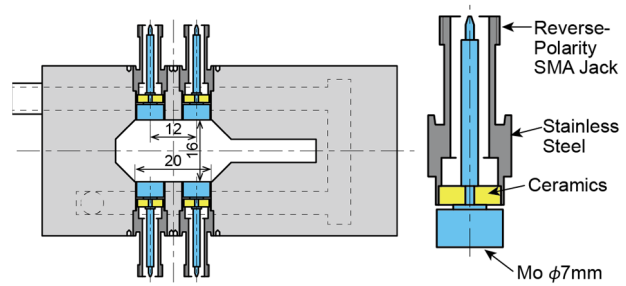


Figure 1: Schematic drawings of the BPM block (left) and the BPM electrode (right).

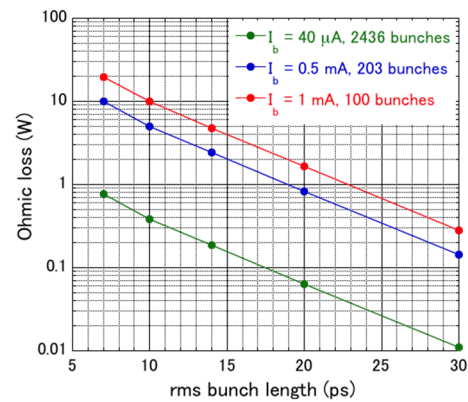


Figure 2: Calculated heat input to the BPM block for the beam current of 100 mA with bunch currents of 0.04 mA (green), 0.5 mA (blue) and 1 mA (red) as functions of the bunch length.

2.2 信号ケーブル

BPM システムで使用する信号ケーブルは、BPM ブロックに接続する短いケーブル (A ケーブル)、加速器収納部から保守通路までの長いケーブル (B ケーブル)、読み出し回路に入力するための短いケーブル (C ケーブル) の 3 種類からなる予定である。これは現 SPring-8 の BPM システムも同様である。これらのケーブルの特性が変化するとビーム位置のドリフトにつながるため、特性の安定したものを選定する必要がある。

実際、現 SPring-8 におけるビーム位置のドリフトについて調査したところ、A ケーブルの放射線損傷により、湿度に依存した変動があることがわかった[7, 8]。放射線損傷を受けた部分の特性インピーダンスが他の部分と若干異なり、その値が湿度に依存することも確認された。このことはケーブルの絶縁体の化学分析でも裏付けを取っており、放射線損傷を受けたことで湿気を吸いやすくなっていることがわかった。そこで、耐放射線ケーブルとして、絶縁体に SiO_2 、または、PEEK を使ったセミジッドケーブルを A ケーブルに用いることを検討している。

B ケーブルにおいても、現 SPring-8 において特性の

変化がみられるものがあった。現状、コルゲート同軸ケーブルと編組同軸ケーブルの2種類が混在しているが、編組同軸ケーブルの方にのみ特性変化が見られている。そこで、B ケーブルには今後コルゲート同軸ケーブルを用いることとしている。

2.3 読み出し回路

読み出し回路の候補として、独自開発のものと、市販品の Libera Brilliance+ [2]の次期バージョンを挙げ、並行して開発・評価している。

独自開発のものは SPring-8 の新 Low-Level RF (LLRF) システム[9, 10]と同じ MicroTCA.4 [3]を用いることとした。その簡単なブロック図を Fig. 3 に示す。この回路は BPM からの高周波信号を処理する RF フロントエンド回路としての BPM Rear Transition Module (RTM) と信号を AD 変換する高速デジタイザ Advanced Mezzanine Card (AMC) からなる。高速デジタイザ AMC には 10 チャンネルの入力があるので、1 枚で 2 台の BPM を読み出すこととした。RTM では、バンドパスフィルタで加速高周波に同期した 508.76 MHz の信号のみを抽出し、ステップ減衰器、増幅器、BALUN を経て AMC に信号を送る。高速デジタイザ AMC は最大 370 MHz のサンプリングレートがあるので、508.76 MHz の 5/7 の 363 MHz で直接アンダーサンプリングすることとした。そうすることで、ダウンコンバータのようなアクティブ素子を減らすことができ、より安定な回路となることが期待される。また、BPM-RTM には校正トーンを出す機能を備えており、ビーム信号の周波数からわずかにずらした RF 信号を合波することで常時回路のゲインドリフト等を補正できるようにした。

Libera Brilliance+ については、現行品の評価をしながら次期バージョンの仕様についてメーカーと協議している。現行品ではビーム位置の計算式が1次式のみであるため、高次の多項式での演算機能も加えてもらう予定である。また、アップグレード後は BPM の台数に余裕がないため、4 電極のうち 1 電極に障害が生じてでもビーム位置を測定したい。そこで、3 電極でのビーム位置計算の機能も実装してもらうことを検討している。これらの機能はもちろん独自開発のものにも反映させることとしている。

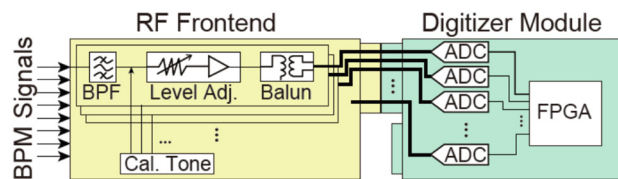


Figure 3: Schematic diagram of the MicroTCA.4-based BPM electronics.

3. BPM 電極・ブロックの試作と評価

デザインした BPM 電極とブロックを実際に試作し、実験室にて評価をおこなった。その結果について簡単にまとめる。

3.1 BPM 電極の試作

設計どおりの形状と精度で適切に BPM 電極が製作できるかどうか確かめるため、2 社に試作をしてもらった。両社とも、ボタン電極付近の形状は同じで、セラミック付近の形状が若干異なるのみである。試作の結果、両社の製品とも真空リークや引っ張り時の剥がれのようなロウ付けの失敗はなく、設計どおりのものができあがった。また、真空ベークを想定した熱サイクル試験でも問題なかった。寸法精度についてもボタン電極付近の重要な部分については、10 μm オーダーに設定した厳しい許容差をほぼ満たすことができた。

試作した BPM 電極を直径 8 mm の穴に差し込んで測定した Time-Domain Reflectometry (TDR) の波形を Fig. 4 に示す。両社の電極ともほぼ一致した波形で、同じ高周波特性の電極ができていることがわかる。

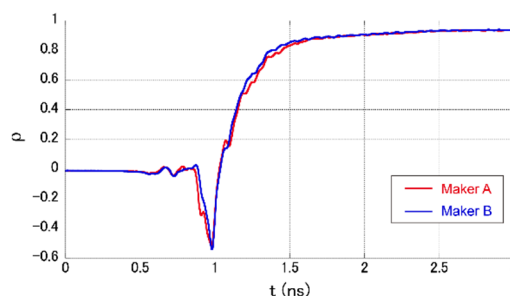


Figure 4: TDR waveform of two prototypes of BPM electrodes.

3.2 BPM ブロックの試作

BPM ブロックについても、電気中心が 100 μm std. (2σ max.) の要求を十分に満たす精度が出せるかどうかを確かめるため、試作をおこなった。真空チェンバの断面形状はワイヤ放電加工で作了出来。電極用の穴は切削加工であけた。断面形状や電極位置、ブロック外側の基準面などについて 10 μm オーダーの厳しい許容差を課していたが、十分な精度のものを作ることができた。

電極の EBW による接合の際には、溶接による収縮で電極が穴奥側への引っ込むことが確認された。そこで、ダミー電極を用いた条件出しをおこない、EBW 時の入熱条件などを最適化した。その結果、電極の引っ込み量を +0–50 μm の許容差内に収めることができた。この許容差内であれば、BPM の電気中心誤差への影響は 80 μm 以下であることが電磁界シミュレーションにて得られている。

4. BPM のビーム試験

BPM システム全体としての評価をおこなうため、現 SPring-8 蓄積リングに BPM ブロックを設置してビーム試験をおこなっている。また、信号ケーブルの耐放射線性を確かめるため、A ケーブルのサンプルを放射線の強い場所に置いて加速試験もおこなっている。本節では、試験セットアップとこれまでに得られている結果についてまとめる。

4.1 ビーム試験セットアップ

ビーム試験に用いた BPM ブロックの概略図を Fig. 5 に示す。実際の BPM 電極を実際の配置で並べている。唯一の違いは開口の横幅で、現蓄積リングに合わせて 90 mm とした。このブロックに BPM 4 台分、16 個の電極を取り付けた。冷却水配管は電極との位置関係を保つように配置して実際の BPM ブロックに近い冷却ができるようにし、温度上昇を評価できるように電極付近に測温抵抗体用の穴をあけて温度を測定した(図中赤***部)。

信号ケーブルについては、A ケーブルとして SiO₂, PEEK の各セリジッドケーブルと、現 BPM システムで使っているポリエチレンのフレキシブルケーブルを比較のために敷設した。B ケーブルはすべてコルゲート同軸ケーブルとした。

読み出し回路は Libera Brilliance+ の現行品を使用している。独自開発のものについては BPM-RTM の実験室での動作確認と評価中で、近いうちにビーム試験に導入する予定である。

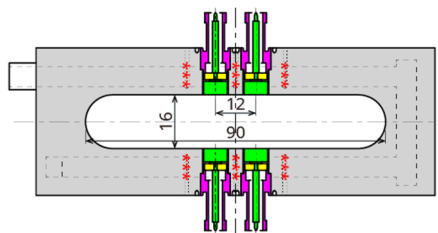


Figure 5: Schematic drawing of the BPM block for a beam test.

4.2 信号波形・強度と位置分解能

シングルバンチビームにて得られた信号波形を Fig. 6 に示す。ボタン電極の双極インパルス信号のあとに若干のリングングが出ているが、次のバンチが来る約 2 ns 後には信号はほぼなくなっており、問題ない波形が得られた。信号強度については、100 mA 蓄積時に -12.5 dBm 程度の計算どおりの RF パワーが得られた。

位置分解能を評価するため、4 台分の BPM のうち両端の 2 台で中間の 2 台の BPM でのビーム位置を内挿して予想し、測定値と比較した。その測定値と予想値の差について、SP モードと COD モードそれぞれについてプロットしたものを Fig. 7 に示す。SP モードのデータはおよそ 100 pC のビームに対するもので、位置分解能は約 70 μm rms となった。COD モードのデータは 100 mA の蓄積ビームに対するもので、位置分解能は約 0.01 μm rms となった。いずれも要求値を十分に満たしている。

4.3 電気中心

BPM ブロックの電気中心誤差を評価するため、4 台分の BPM が示すビーム位置を比較した。その結果を Fig. 8 に示す。4 台の BPM が示すビーム位置は半径 0.1 mm 以内に収まっており、BPM ブロックから回路まで含めたシステム全体として、電気中心誤差が 0.1 mm 以内であることを示唆している。統計量は少ないが、電気中心が 100 μm std. (2 σ max.) を満たすことができるものと期待される。

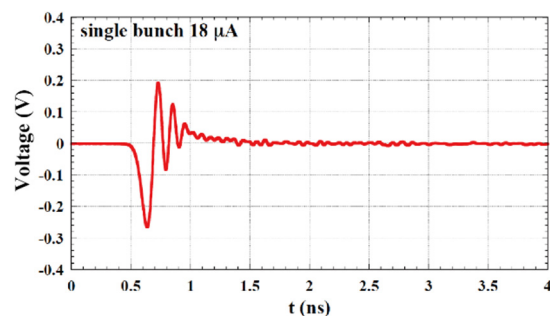


Figure 6: BPM signal waveform for a single-bunch beam.

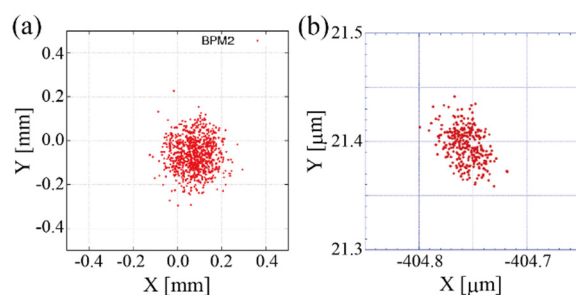


Figure 7: Beam position difference between a middle BPM data and the prediction from two BPMs at both ends. SP-mode data are plotted in (a) and COD-mode data are in (b).

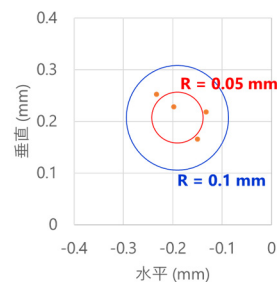


Figure 8: Beam positions from 4 BPM sets.

4.4 長期安定性

長期安定性の評価をするには、実際のビーム位置の変動の影響を取り除いた、BPM システム自体の変動を抽出する必要がある。そのために、バランスエラーという量を定義する[7, 8]。バランスエラーとは、4 電極のうちの 3 電極の組み合わせ (4 組) でビーム位置をそれぞれ計算し、その 4 つの値の最大値と最小値の差をとったものである。バランスエラーは、実際のビーム位置が変わっても理想的には変動しないものである。したがって、バランスエラーの変動は BPM システム自体の変動を反映したものとなる。

このバランスエラーのトレンドグラフを Fig. 9 に示す。ところどころ段差があるのはフィリング変更等のビーム条件が変わったためである。ビーム条件が一定であれば、1

か月程度でのバランスエラーの変動は $5\ \mu\text{m}$ 以内に収まっていることがわかる。このように、長期安定性についても、 $5\ \mu\text{m}/\text{month}$ の要求を満たすことがわかった。

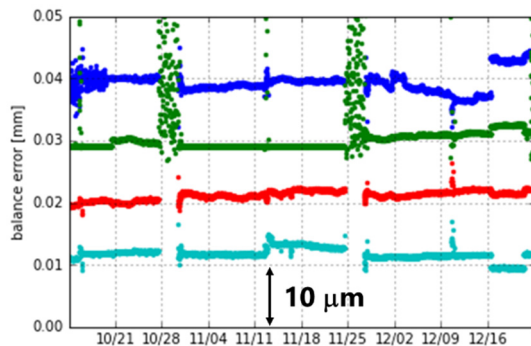


Figure 9: Trend graph of balance errors of 4 BPMs for 2.5 months.

4.5 温度上昇

ビーム試験中の BPM 電極付近の温度を常時記録して、ビームによる温度上昇を測定した。その結果、ビームがあるときとないときの温度差は、場所やフィリングパターンによって $0.1 - 0.5^\circ\text{C}$ であった。これは ANSYS による熱シミュレーション結果と 0.15°C 以内の誤差で一致した。したがって、電磁界シミュレーションによる入熱量の見積もりや熱シミュレーションがおおむね正しくおこなわれているものと考えられる。熱シミュレーションによると、温度が最大となるのは BPM 電極のモリブデンで、その温度は約 35°C である。BPM ブロックの温度上昇が適切に見積もられていることから、電極の温度もほぼ計算どおりとなっているものと考えられる。 35°C 程度であれば、熱膨張による変形は無視できるものと考えられる。

4.6 A ケーブルの放射線照射試験

A ケーブルの耐放射線性を確認するため、ビーム試験とは別に、放射光アブソーバの直近に A ケーブルの候補を設置し、そこからの強い散乱 X 線の照射による加速試験をおこなっている。試験対象のケーブルは SiO_2 、PEEK の各セミリジッドケーブルとポリエチレン絶縁体のフレキシブルケーブルである。運転期間 10 年以上に相当する線量を照射した結果、フレキシブルケーブルでは特性インピーダンスに若干の変化が見られた。しかし、 SiO_2 と PEEK のケーブルには有意な変化が見られていない。したがって、これらのケーブルを用いることで、信号ケーブルの劣化によるドリフトは防げるものと考えられる。

5. まとめ

SPring-8 の高輝度化アップグレードに向けて高精度・高安定なビーム位置モニタ(BPM)を開発している。BPM ブロックの設計においては、必要な信号強度と機械精度が得られ、かつ、ビームによる発熱などの問題が起こらないよう十分考慮した。また、信号ケーブルの放射線劣化によるドリフトが現 SPring-8 で見られているため、耐放射

線ケーブルの選定をおこなった。読み出し回路は、MicroTCA.4 規格の独自回路の開発と、市販回路である Libera Brilliance+ の評価とを並行して進めている。BPM 電極・ブロックは設計どおりの形状・寸法精度のものを試作することができた。試作した BPM 電極を用いたセットアップでビーム試験をおこない、システム全体としての性能を評価した。その結果、SP モードにおいて $100\ \text{pC}$ のシングルバンチビームに対し約 $70\ \mu\text{m rms}$ 、COD モードにおいて $100\ \text{mA}$ のビーム電流に対して約 $0.01\ \mu\text{m rms}$ の位置分解能が得られた。長期安定性においても、1 か月あたり $5\ \mu\text{m}$ 以内の安定性が確認できた。BPM ブロックの温度上昇についても、電磁界シミュレーション・熱シミュレーションの結果と矛盾しないものが得られた。耐放射線信号ケーブルの放射線照射試験においても、劣化が十分小さいことが確かめられた。このように、BPM システム全体として要求を満たす結果が得られている。

参考文献

- [1] SPring-8-II Conceptual Design Report, Nov. 2014; <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [2] Instrumentation Technologies; <https://www.i-tech.si/>
- [3] PICMG MicroTCA open standard; <https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>
- [4] CST Studio Suite; <https://www.cst.com/>
- [5] M. Masaki *et al.*, “Design Optimization of Button-type BPM Electrode for the SPring-8 Upgrade”, Proceedings of 5th International Beam Instrumentation Conference (IBIC2016), Barcelona, Spain, Sep. 11–15, 2016, pp. 360–363.
- [6] ANSYS; <https://www.ansys.com/>
- [7] T. Fujita *et al.*, “SPring-8 でのビーム位置モニタ長期安定化に向けた新たな取り組み”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5–7, 2015, pp. 1219–1223.
- [8] T. Fujita *et al.*, “Long-term Stability of the Beam Position Monitors at SPring-8”, Proceedings of 4th International Beam Instrumentation Conference (IBIC2015), Melbourne, Australia, Sep. 13–17, 2015, pp. 359–363.
- [9] T. Ohshima *et al.*, “MTCA.4 規格低電力高周波システムの SPring-8 蓄積リング A ステーションへの導入”, in these proceedings.
- [10] T. Ohshima *et al.*, “Development of a New LLRF System Based on MicroTCA.4 for the SPring-8 Storage Ring”, Proceedings of 8th International Particle Accelerator Conference, May. 14–19, 2017, pp. 3996–3999.