

PF-BT におけるスクリーンモニターの高度化と常時 OTR モニターの画像歪み改善

UPGRADE OF SCREEN MONITORS AND IMAGE DISTORTION IMPROVEMENT OF CONSTANT OTR MONITOR AT THE PF-BT

高井 良太^{*}), 谷本 育律, 野上 隆史, 多田野 幹人, 帯名 崇

Ryota Takai^{*}, Yasunori Tanimoto, Takashi Nogami, Mikito Tadano, Takashi Obina
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

Screen monitors installed in the PF-BT have been upgraded in stages. It has become possible to measure the injection beam profiles more precisely by replacing old analog CCD cameras and alumina fluorescent plates with compact GigE cameras and Ce:YAG scintillators, respectively. The constant OTR monitor using a metal window for the air gap located at the end of the PF-BT has difficulty with the beam image distortion caused by a surface waving of the window. In order to improve this image distortion, we replaced the existing septum duct equipped with the metal window with one that was remanufactured by devising processing methods and assembly procedures around the window. In this report, we describe the details of the screen monitors upgrade and the improvement results of the OTR image distortion by replacing the septum duct.

1. はじめに

KEK の Photon Factory では、真空紫外線から X 線領域までの幅広い波長領域をカバーする放射光源として 2.5 GeV 電子蓄積リング “PF リング” を運用している。PF リングのビーム入射路 (PF-BT) には、入射ビーム観測用のスクリーンモニターが計 12 台設置されている。これらのうち、入射路入口からの 10 台はアルミナ蛍光板 (デマルケスト) とアナログの CCD カメラで構成されており、像が明るくビームとの精密な同期も不要というメリットがある反面、厚い蛍光板内での電子散乱に起因する像の滲みや Shot ごとの残像、CCD 画素の飽和等によって正確なビームプロファイルの測定が困難であった。このような状況を改善するため、2021 年度から 2022 年度にかけて、同蛍光板とカメラをそれぞれ Ce:YAG シンチレータと GigE カメラに更新する作業を行った。Figure 1 に PF-BT の写真を示す。

一方、入射路出口に位置する残りの 2 台は、2020 年度に行われた入射部改造に合わせて設置されたもので、1 台はセプタム壁近傍を通過するビームでもプロファイル測定が可能な YAG スクリーン、もう 1 台はリングの蓄積ビームダクトとの間に設けられたエアギャップ用金属窓で生じる遷移放射光 (OTR) を利用した OTR スクリーンとなっている [1-3]。この OTR スクリーンは、別途放射ターゲットを挿入する必要がないため、リングの入射効率に影響を与えることなく常時入射ビームを観測できるという優れた特徴を持っているが、溶接加工時に生じたと思われる窓表面のうねりにより、OTR を結像して得られるビーム画像が大きく歪んでしまうことが問題となっていた。そこで、できるだけフラットな窓表面を実現できるよう加工方法や組み立て手順を見直した上でセプタムダクトを再製作し、2022 年度にその入れ替え作業を行った。

本発表では、上記の PF-BT スクリーン高度化の詳細とセプタムダクト入れ替えによる OTR 画像の歪み改善

結果について報告する。

2. PF-BT スクリーンの高度化

2.1 CCD カメラの交換

シンチレータ観測用カメラの交換作業は 2021 年度の夏季停止期間中に行われた。Figure 2(a) に PF-BT で使用されている典型的なスクリーンモニターの写真を示す。電子ビームを可視化するためのシンチレータには厚さ 1 mm のアルミナ蛍光板 (デマルケスト) が使用されており、ビームの入射方向から見て下向きに 45° の角度で挿入される。カメラは鏡筒の役割も兼ねた円筒架台の内側に上向きで固定され、ビューポートを介してダクト内のシンチレータ表面を直接撮影する構造となっている。シンチレータ正面に位置する小口径のビューポートには、ダクト内を照らすための LED ラ



Figure 1: Photo of the PF-BT. The PF-BT is a 2.5 GeV beam transport line with a total length of about 170 m and connects the end of the LINAC located underground to the injection point of the PF-ring located at ground level.

^{*} ryota.takai@kek.jp



Figure 2: Photos of (a) the PF-BT typical screen monitor and its camera (b) before and (c) after the replacement.

イトが取り付けであり、カメラ調整やシンチレータ上のビーム位置を確認する際に使用される。カメラにはこれまでアナログのモノクロ CCD カメラ (Panasonic, WV-BP50) を使用してきたが、既に廃番となっており、外部トリガーへの同期やカメラゲイン他の遠隔制御もできないことから、他の加速器のスクリーンモニターでも使用実績のある小型の GigE モノクロカメラ (Allied Vision Technologies, Mako G-040B) と交換することにした。撮影倍率を変える必要はないため、カメラレンズは元々使用していたもの (焦点距離 100 mm) を流用した。Figure 2(b), (c) に交換前と後でのカメラ本体の写真を示す。

カメラ交換前後に撮影された入射ビームプロファイルの例を Fig. 3(a), (b) に示す。例示したプロファイルは入射路入口から 2 番目に位置するスクリーンモニター (PM2) で取得されたもので、この場所はビーム光学上水平方向の分散関数が比較的大きいことから、入射ビームのエネルギージッターや運動量拡がりや水平方向のビーム位置・サイズに反映されやすい。交換前のアナログ CCD カメラでは、アルミナ蛍光板からの強い光が 30 fps = 33 ms の長い露光時間分積算されて多くの画素が飽和してしまい、シングルショットの画像にもかかわらず非常に横長のビームプロファイルに見えてしまっている。この画像から水平方向や鉛直方向の射影プロファイルを算出しても飽和の影響でピーク周辺が潰れた形状となるため、正確なビームサイズの評価は難しい。一方、交換後の GigE カメラでは入射トリガーに同期した上で露光時間やトリガーディレイ、カメラゲイン等を細かく調節可能となり、飽和のない本来のビームプロファイルを得ることができている。横長に見えていたプロファイルの大部分はエネルギーのずれたビームによる希薄なハロー成分であったことが明らかとなり、これまではその中に埋もれてしまっていたビームコアの存在もはっきりと確認できるようになった。交換の前後でビームの見え方に最も大きな変化が

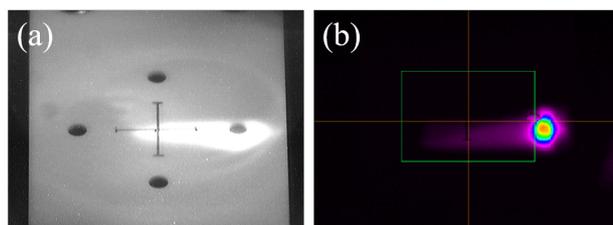


Figure 3: Examples of injection beam profiles obtained with the PM2 (a) before and (b) after the camera replacement. The green frame shown in the right figure is set so as to pass through the centers of the four holes on the fluorescent plates provided as markers.

あったのはこの PM2 であるが、他のスクリーンについても同様にプロファイルの飽和が解消され、横方向のビームサイズや強度分布を正しく計測可能となった。また、PoE 対応の GigE カメラに更新したことで、随時カメラの電源を OFF/ON できるようになった恩恵も大きい。上記の PM2 を含む PF-BT 入口の 2 台は、ビームエネルギーの高い SuperKEKB の BT や LINAC のビームダンプと同じエリア (第 3 スイッチヤード) 内に設置されているため、放射線による画質の劣化や制御回路部の故障を起こしやすい状況にある。カメラの周囲を鉛のシートやブロックで囲うことで対策しているが、使用時以外はカメラの電源を OFF にしておくことで、より劣化の進行を遅らせたり故障の頻度を下げることが可能となった。

2.2 シンチレータの交換

スクリーンダクト内のシンチレータ交換作業は、2022 年度の夏季停止期間中に行われた。Figure 4(a), (b) に交換前のアルミナ蛍光板 (デマルケスト) と交換後の Ce:YAG シンチレータの写真を示す。アルミナ蛍光板の横方向サイズは製作時期や設置場所によって異なるが、典型的には幅 32 mm, 高さ 50 mm の板状であり、板上部に開けた 2 つの穴を利用して直線導入機のシャフトに繋がる治具に 45° の角度で直接固定されている。板の下端から 20 mm の位置がダクト中心に来るよう設計されており、水平・鉛直方向ともその中心から ±10 mm の位置に直径 2.4 mm の穴がマーカーとして設けられている。物によっては板表面に十字線状の目盛りが描かれているものもあった。これらと交換した Ce:YAG シンチレータは厚さが 0.1 mm しかないため、挿入時の

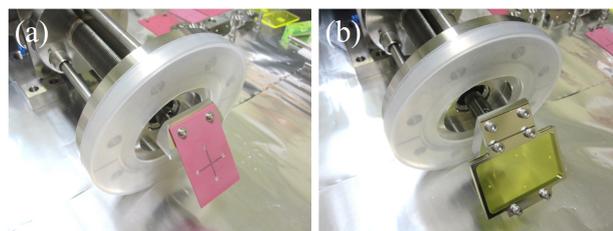


Figure 4: Photos of scintillators for the PF-BT (a) before and (b) after the replacement.

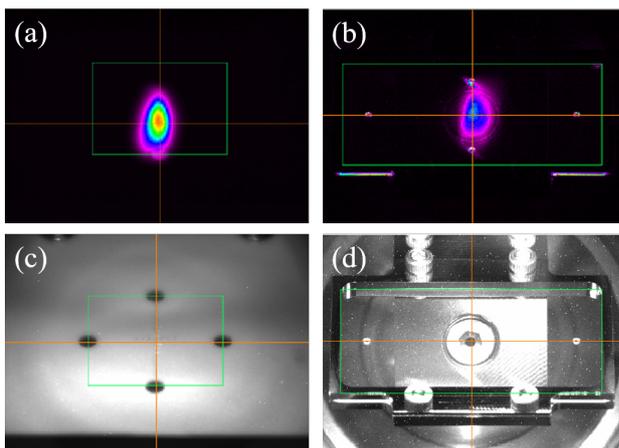


Figure 5: Examples of injection beam profiles obtained with the PM3 (a) before and (b) after the scintillator replacement. Scintillator images taken with the LED light on (c) before and (d) after the replacement.

位置や角度はアルミナ蛍光板と同じに保ちつつ、ステンレス製のスクリーンホルダを介してシャフトの治具に固定した。ホルダの開口サイズは基本的に幅 50 mm、高さ 30 mm に統一され、水平方向は中心から ± 20 mm、鉛直方向は ± 10 mm の位置に直径 1 mm の穴を設けた。このマーカーは、透明なシンチレータ表面にカメラのピントを合わせる際や、カメラ画像から得られるピクセル値を撮影倍率を加味した長さに変換するための校正係数を算出する際に利用される。観測対象となる入射ビームのエネルギーは 2.5 GeV であるため、ビームによるシンチレータのチャージアップは問題にならないと判断し、ビーム入射面への導電性コーティング等は行わなかった。アルミナ蛍光板と比べてシンチレータの横幅が約 1.5 倍に大きくなったことから、撮影倍率を落とすためカメラレンズの焦点距離は 100 mm から 75 mm に変更された。

シンチレータ交換前後に撮影された入射ビームプロファイルの例を Fig. 5(a), (b) に示す。例示したプロファイルは入射路入口から 3 番目に位置するスクリーンモニター (PM3) で取得されたものである。取得時期が大きく異なるのでビームサイズ等の定量的な比較はできないが、ほぼ相似形のプロファイルが得られているのが分かる。今回使用したアルミナ蛍光板と Ce:YAG シンチレータには、蛍光の減衰時間 (蛍光寿命) と素材の厚みに大きな差がある。Ce:YAG シンチレータの蛍光寿命は 100 ns 以下と非常に短いのに対し、アルミナ蛍光板の場合は数 10 秒から数分にも及ぶため、入射の繰り返しの影響が無視できないレベルになり得る。また、アルミナ蛍光板は機械的強度の点からあまり薄く加工できないため、結晶内での電子散乱の影響で生じる発光点の滲みが比較的大きく、ビームサイズを大きめに見積ってしまう傾向がある。同様の現象は Ce:YAG シンチレータでも起こるが、素材の厚みが 1/10 であるため、その寄与は PF-BT のビームサイズに対して無視できるレベルとなる。素材が薄くなることで、スクリーン使用時の

ビームロスやエネルギー損失が少なくなる点もメリットと言えよう。このように、今回 Ce:YAG シンチレータに交換した意義は大きい、1 つだけ予想外のデメリットが発覚した。Fig. 5(b) をよく見ると、ビームプロファイルの周囲に同心円状の縞模様を確認できる。これはシンチレータから等方的に発せられた蛍光がシンチレータの裏側にある構造物に反射して戻ってきた光で、Ce:YAG の結晶が透明であるが故に生じる現象である。参考のため、全く同じセットアップの下でダクト内照明を点けて撮ったシンチレータの画像を Fig. 5(c), (d) に示す。ビームプロファイルの周囲に見られていた縞模様は、スクリーンホルダを直線導入機のシャフトに固定するためのボルトの像であることが分かる。また、マーカーとしてシンチレータ周辺に開けた 4 つの穴やホルダ下端から垣間見えるシンチレータの縁が明るく光っているのも確認できる。後者はカメラの ROI を狭めることでプロファイルへの影響をなくせるが、前者はどうしてもプロファイルに重畳する位置に来てしまうため、この反射光の影響を取り除くのが今後の課題である。

3. 常時 OTR モニターの画像歪み改善

3.1 セプタムダクトの再製作

OTR によるビーム画像が歪む原因となっているエアギャップ用金属窓の表面うねりをできる限り低減するため、窓周辺の加工方法や組み立て手順を変えていくつかの窓サンプルを製作し、最もフラットな表面を実現できた手法でセプタムダクトごと再製作した。Figure 6(a) にセプタムダクトの下流端にあるモニターチェンバーの模式図を示す。元のモニターチェンバーの窓部は、主に次のような手順で製作されていた：

1. 窓板 A に窓開口となる角穴を開ける (幅 16 mm、高さ 16.5 mm)
2. 真空側の面だけ鏡面加工した 0.2 mm 厚の SUS 箔を角穴の大気側からファイバーレーザー溶接で取

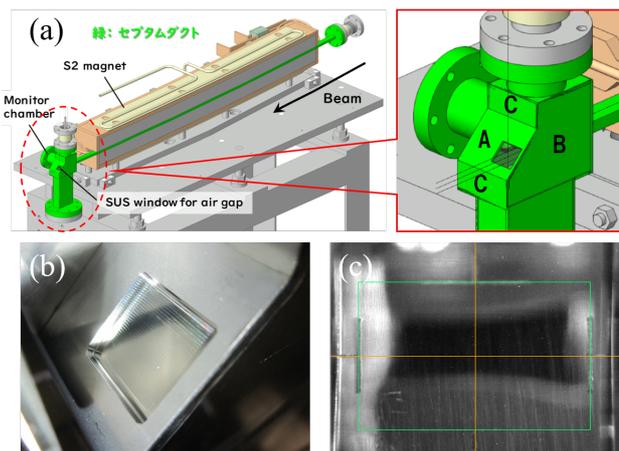


Figure 6: (a) Schematic view of the monitor chamber. Metal window seen from (b) atmosphere side and from (c) vacuum side of the remanufactured septum duct.

り付ける

3. 側板 B と側板 C を TIG 溶接で順次接合する

この手法では、特に TIG 溶接の過程で生じる大きな熱歪みを避けられないため、今回は最終的に次のような手順で製作した：

1. 窓板 A と側板 C からなる面を溶接ではなく曲げ加工で製作する
2. 側板 B をファイバーレーザー溶接で接合する
3. 窓板 A の大気側からエンドミルによる削り出しで 0.2mm 厚の窓部を製作する（幅 16mm, 高さ 15mm）

手順 1 で使用する部材は、事前に真空側の面のみバフ研磨による鏡面加工を施した。このままだとダクト下部のビューポートからカメラで覗いたときに窓の位置が分からず、窓表面へのピントも合わせにくいいため、窓の周囲 4ヶ所にはマーカーとして T 字のケガキ線を入れた。また、手順 3 の切削加工では、当初エンドミルの刃を窓中心から同心円状に送るスパイラルスキャン方式を採用していたが、この方法ではどうしても裏面にピラミッド状の加工痕が残ってしまうことが判明したため、刃の送り方を窓全体に均等に圧のかかるラインスキャン方式に変更することでこの問題を回避した。再製作した金属窓を大気側から見た写真と真空側から見た画像を Fig. 6(b), (c) に示す。この OTR スクリーンの 35mm 手前にある YAG スクリーンや各スクリーンを観測するための光学系に変更点はない [3]。

3.2 OTR 画像の歪みチェック

セプタムダクトの入れ替え作業は 2022 年度の夏季停止期間中に行われ、その後のマシンスタディ中に実際

の入射ビームを用いて OTR 画像の歪み具合をチェックした。スタディでは、まずセプタム電磁石の上流にある 4 極電磁石を利用して入射ビームを細く絞った後、補正電磁石を用いて入射ビームの位置を水平方向および鉛直方向に等間隔でスキャンした。スキャンは窓中心付近の水平線上、窓中心付近の鉛直線上、窓左端（ビーム入射位置）付近の鉛直線上という 3 パターンで行った。各スキャン時にセプタムダクト下端の YAG スクリーン、OTR スクリーンそれぞれで得られたビームプロファイルを数枚ずつ重ね描きしたものを Fig. 7(a), (b) にまとめて示す。上段の YAG スクリーンによる結果を見ると、スキャンパターンに依らず等間隔で移動する入射ビームのプロファイルがくっきりと写し出されている。原因は特定されていないが、窓中心付近での鉛直方向スキャン（上段中央）では、プロファイルがビーム位置と共に少しずつ回転する様子も確認できる。上述したように、この YAG スクリーンと OTR スクリーンは入射路出口のほぼ同じ位置にタンデムに並んでおり、カメラの撮影倍率もほぼ同じであるため、本来であれば下段の OTR スクリーンでも上段と同様の結果が得られるはずであるが、残念ながらそこまでの互換性は得られなかった。窓の中心付近をビームが通過した場合、多少ムラのある薄いバックグラウンドが重畳しているものの、YAG スクリーンで得られたプロファイルと同様の位置に明るいビーム像が得られている。ビームが窓周辺に近付くと、像が極端に暗くはなるが、全く見えなくなるわけではない。下段中央の図をよく見ると、画面中央の明るい 2 つの像の上下に、微弱ながら残り 3 つの像も確認できる。普段の入射位置である窓左端付近では、ビーム位置に応じて移動する像を判別することはできるが、ほぼ同じ明るさのバックグラウンドに埋もれていて分離は難しい状況となっている。

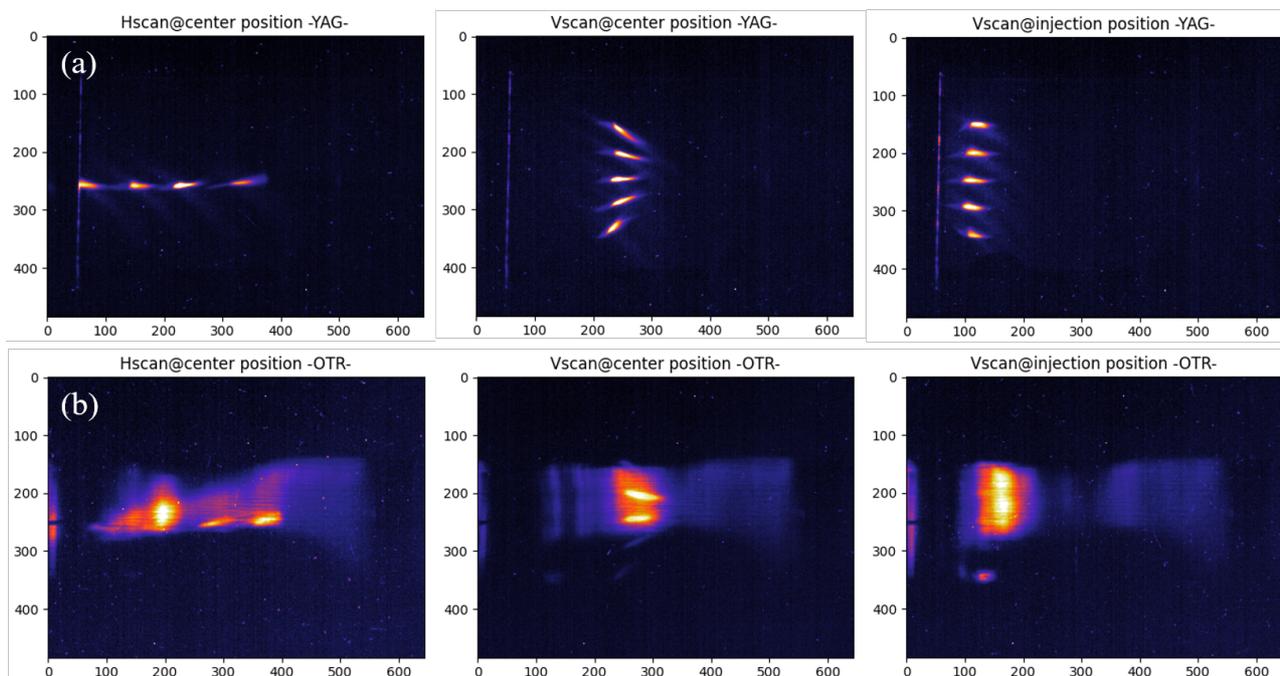


Figure 7: Beam profiles obtained with the (a) YAG screen and (b) OTR screen after the duct replacement.

以前報告したとおり [3]、ダクトを入れ替える前は同じ入射位置でも画面中央付近にビーム位置に依らないぼんやりとした迷光しか見えていなかったため、窓中心付近における像のクオリティを含め以前よりは改善したと言えるが、まだ実用レベルには達していない。原因は、やはり OTR の放射ターゲットを兼ねた金属窓表面の歪みと考えられ、それに応じた角度を持って放出された OTR のコアがカメラレンズの有効径を外れたり、狭小なモニターチェンバー内で多重反射されることで強い迷光や強度ムラが生じている可能性が高い。事実、Fig. 8 は鏡面加工された窓表面を介して上流にある YAG スクリーンのホルダを見たときの画像であるが、入射ビームが通過して来る細い角パイプの像が大きく湾曲しており、ビームの入射位置に近い画面左端には溶接ビードのような構造も見える。ビームの入射位置が溶接面に近接している現在のセプトダクトでは、これ以上平坦な窓を実現するのは技術的に困難であるため、常時 OTR モニターの実用化にはダクト構造自体の大幅な見直しが必要であると考えている。

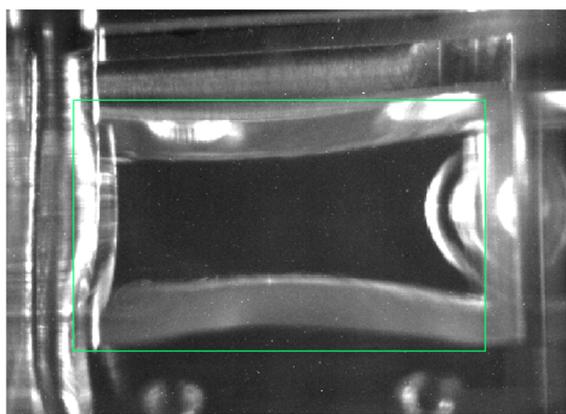


Figure 8: Camera image when focusing on the YAG screen holder through the mirrored inner surface of the window.

4. まとめ

KEK の PF-BT では、入射ビーム観測用スクリーンモニターの高度化を行った。2021 年度と 2022 年度の 2 回

に分けて、各スクリーンのカメラとシンチレータを段階的に更新した。現在は全てのスクリーンが Ce:YAG シンチレータと GigE カメラの構成となり、以前よりも格段に精密な入射ビームプロファイルの観測が可能になった。これらは既に入射ビームエミッタンスの定期測定や BT オプティクス調整・改善等に利用されている。また、BT 最下流のエアギャップ用金属窓を利用した常時 OTR モニターでは、画像歪みを改善するため金属窓付きセプトダクトを新しく再製作したものと入れ替えた。新ダクトの製作では切削加工や曲げ加工、ファイバーレーザー溶接等を駆使することでよりフラットな窓表面を追求したが、普段の入射軌道において実用に足るビームプロファイルは得られなかった。更なる改善にはダクト構造自体の見直しが必要であると考えており、詳細は現在計画中の入射部再改造の進捗に合わせて検討する予定である。

謝辞

東日本技術研究所の路川徹也氏には、スクリーンモニターやカメラの制御ソフトウェアを整備していただきました。コミヤマエレクトロン株式会社の地場弘行氏には、金属窓の試作・改良において多大なご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] C. Mitsuda *et al.*, “Injection section upgrading with the septum-magnet replacement in KEK-PF ring”, Proceedings of IPAC2021, Campinas, SP, Brazil, May 24-28, 2021, paper MOPAB091, pp. 342-345.
- [2] Y. Tanimoto *et al.*, “Vacuum system renewal for the PF-ring injection-section upgrade”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper MOP011, pp. 248-251.
- [3] R. Takai *et al.*, “Development of injection beam profile monitor near septum wall and constant profile monitor using metal window for air gap”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper MOP026, pp. 306-310.