

セプタム壁近傍における入射ビームプロファイルモニターと エアギャップ用金属窓を利用した常時プロファイルモニターの開発

DEVELOPMENT OF INJECTION BEAM PROFILE MONITOR NEAR SEPTUM WALL AND CONSTANT PROFILE MONITOR USING METAL WINDOW FOR AIR GAP

高井 良太*, 谷本 育律, 内山 隆司, 野上 隆史, 満田 史織, 帯名 崇

Ryota Takai*, Yasunori Tanimoto, Takashi Uchiyama, Takashi Nogami, Chikaori Mitsuda, Takashi Obina
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

In the Photon Factory storage ring (PF-ring), which is a dedicated light source of KEK, a new septum magnet has been installed at the beam injection point with two types of screen monitors: YAG screen and OTR screen. The YAG screen uses a C-shaped screen holder having no frame on the septum-wall side and makes possible to measure the injection beam profile near the septum wall precisely. The OTR screen uses the Optical Transition Radiation (OTR) emitted from a metal window for the air gap and enables constant monitoring of the injection beam profile without degrading the beam injection efficiency. Although the idea to use a metal window for the air gap as a radiation target for the screen monitor is so unique and promising, our present OTR screen is unable to obtain the correct profile for injection beams passing near the septum wall. We think that the cause of this is a surface waving of the metal window generated after being welded and are producing a prototype of the window by using a method for reducing the surface waving as much as possible.

1. はじめに

KEK の放射光源である PF リングでは、2020 年の夏季停止期間中にビーム入射点のパルスセプタム電磁石（通称セプタム 2, S2）とその真空ダクトが更新された [1,2]。元々設置されていたセプタム 2 は 1988 年製の真空ダクトに磁極を内蔵した in-vacuum 型のセプタム電磁石で、2015 年には老朽化のため真空ダクト内の冷却水配管から水漏れを起こした。液体シール材による応急処置でリングの運転は続けられたが、その後もリークの再発を繰り返したため、2017 年には同配管内を真空化するとともに、その分ダクトへの入熱を減らすべく蓄積リング側の直上流に光アブソーバを追加する処置が取られた。しかしながら、蓄積ビームの中心軌道から 15 mm の位置まで挿入されたこの光アブソーバがリングの（入射ビームに対する）物理的口径を狭める結果となり、以降高い入射効率と小さい入射振動を両立することが困難となっていた。今回の更新は、この一連のトラブルに対する根本的な対処となる。すなわち、老朽化した真空ダクトを更新することで真空リークの問題を完全に解消するとともに、問題となっていた光アブソーバを廃して入射スキームを見直すことにより、入射効率改善と入射振動抑制の両立化を図る。これは、実験フロアの放射線レベル低減と放射光強度の安定化に寄与するため、放射光利用施設にとっては特に重要な改善と言える。

この更新に伴い、入射ビームに対するビームモニターも大幅に強化された。以前のセプタム 2 には、ビーム輸送ライン（BT）の終端における入射ビームの横方向プロファイルを観測するため、磁極を出てすぐの所にアルミナ蛍光板（デマルケスト）とアナログ CCD カメラで構成されるスクリーンモニターが設置されていた。デマル

ケストは電子ビームに対して非常に明るく・長く発光するという特性を持っており、カメラによる撮像が容易なため BT のスクリーンモニターにはよく使われてきた素材であるが、近年の高電荷で繰り返しの速いビームに対しては、カメラの画素の飽和や発光点の滲み、前のビームの残像等によって正確なプロファイルが測定できないという問題がある。そこで、新しい真空ダクトには、デマルケスト以外の放射ターゲットを用いた 2 種類のスクリーンモニターが設置された。本発表では、これらのスクリーンモニターの詳細と入射ビームの観測例、今後の課題について述べる。

2. 2 種類のスクリーンモニター

新しい真空ダクトは、入射ビームダクトと蓄積ビームダクトが長さ数 cm のエアギャップで完全に分けられた分離型構造となっている [3]。その入射ビームダクトの最下流部にプロファイルモニター専用のモニターチェンバーがあり、2 種類のスクリーンモニターはそこに設置された。Figure 1 にモニターチェンバー周辺の写真を示す。

2.1 YAG スクリーン

Figure 2 にモニターチェンバーとそれに付属する暗箱内の構造を示す。2 種類のスクリーンモニターのうちの一つは、Ce:YAG シンチレータを用いたスクリーンモニター（YAG スクリーン）である。圧空式の直線導入機により、オンデマンドのプロファイル測定を可能にする。Ce:YAG シンチレータは、数あるシンチレータの中でも電子ビームに対するフォトン収率が高く、発せられる蛍光の減衰時間も 100 ns 程度と非常に短いため、低電荷の高繰り返しビームであっても shot-by-shot で精密なプロファイルを得ることができる。新たに設定された入射軌道では、入射ビームはセプタム壁から約 2.5 mm の

* ryota.takai@kek.jp

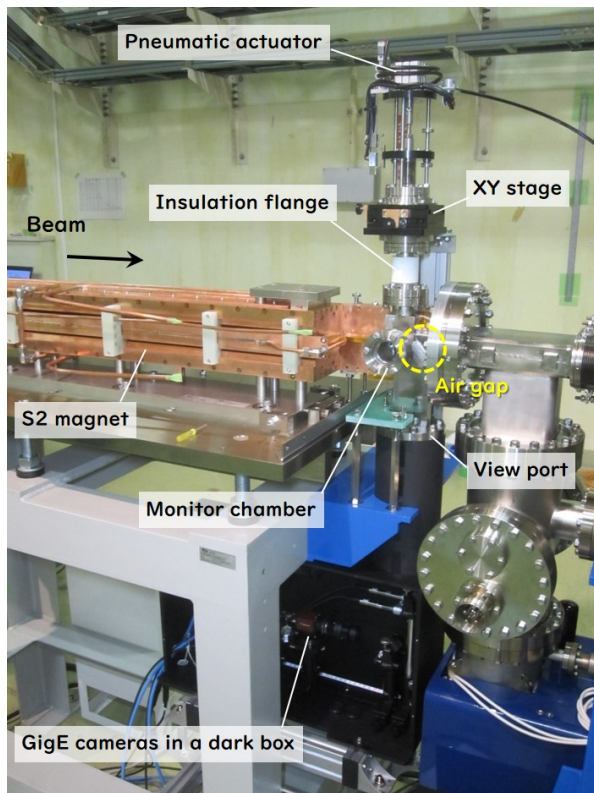


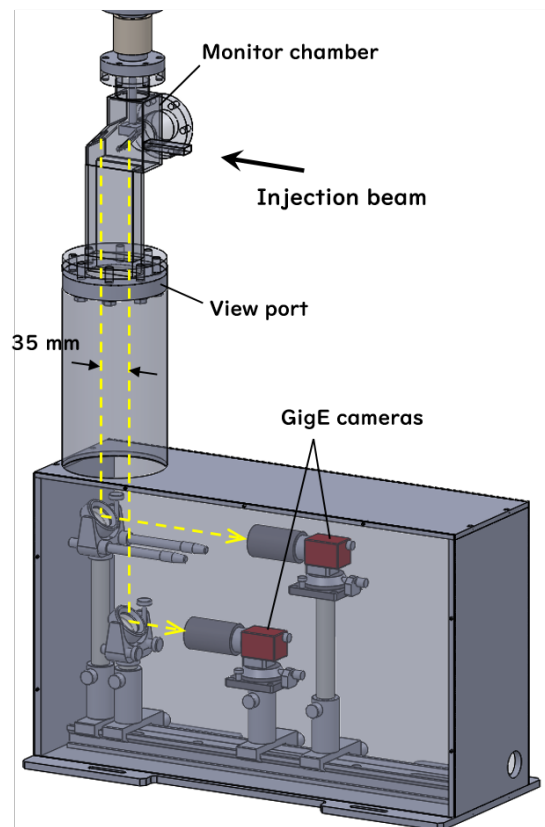
Figure 1: Photo around the monitor chamber installed on downstream of the new septum magnet.

位置を通過するため [4]、シンチレータを保持するスクリーンホルダにはセプタム壁側のフレームがないコの字型のものを採用した。また、このスクリーンホルダとセプタム壁との間隔（設計上は 1 mm）は、導入機に設けた XY ステージにて大気側から微調可能となっている。スクリーンホルダの開口は幅 17 mm、高さ 15 mm となっており、これを下に 45° 傾けて後述する真下のビューポートから観測する。モニターチェンバーに入るまでに入射ビームが通ってくるインコネル製の薄肉ダクト（厚さ 0.3 mm）の内法が 15.8 mm×7.4 mm であるから、正面から見たホルダ開口はそれよりもひと回り大きいサイズとなっている。シンチレータの厚みは 0.1 mm と薄いため、結晶内での電子散乱による像の滲みの影響は、入射ビームのサイズに対してほぼ無視できる。チャージアップによる放電防止のため、ビームの入射面には厚さ 30 Å の導電性コーティングが施してある。Figure 3 に YAG スクリーンの写真を示す。

2.2 OTR スクリーン

もう一つのスクリーンモニターは、エアギャップに面した金属窓から発せられる遷移放射光（OTR）を利用したスクリーンモニター（OTR スクリーン）である。OTR とは、荷電粒子が誘電率の異なる物質へ入射する際にその境界面から発せられる輻射で、今回のような薄いターゲットの場合、ビームがターゲットを透過する方向（前方）とターゲットで鏡面反射された光が進む方向（後方）の二手に放出される。光量はシンチレータに劣るが、

(a) Whole view



(b) Closeup of the monitor chamber

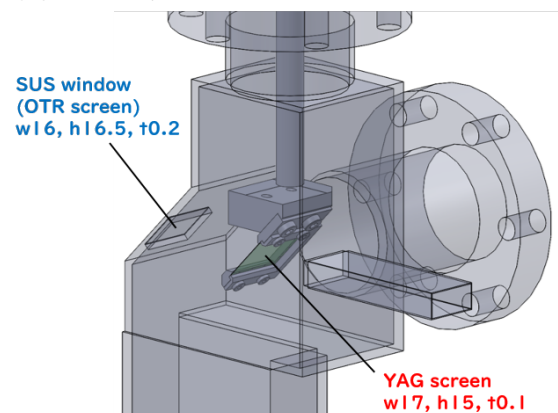


Figure 2: Inner structure of the monitor chamber and its dark box.

ビーム強度に対する線形性や発光の減衰時間の面では優れている。ただし、その放射強度はビームエネルギーに依存した強い指向性と中空の空間分布を持つという特徴がある。通常、金属窓はビームに対して垂直に設けられるが、今回は後方 OTR を真下のビューポートから取り出して利用できるように、YAG スクリーンと同様に下へ 45° 傾けて設置された。金属窓は厚さ 0.2 mm のステンレス製で、大気側から熱歪みの小さいファイバーレーザー溶接にて溶接されている。真空側の面は後方 OTR の指向性を高めて光量を確保するため、バフ研磨により鏡面加

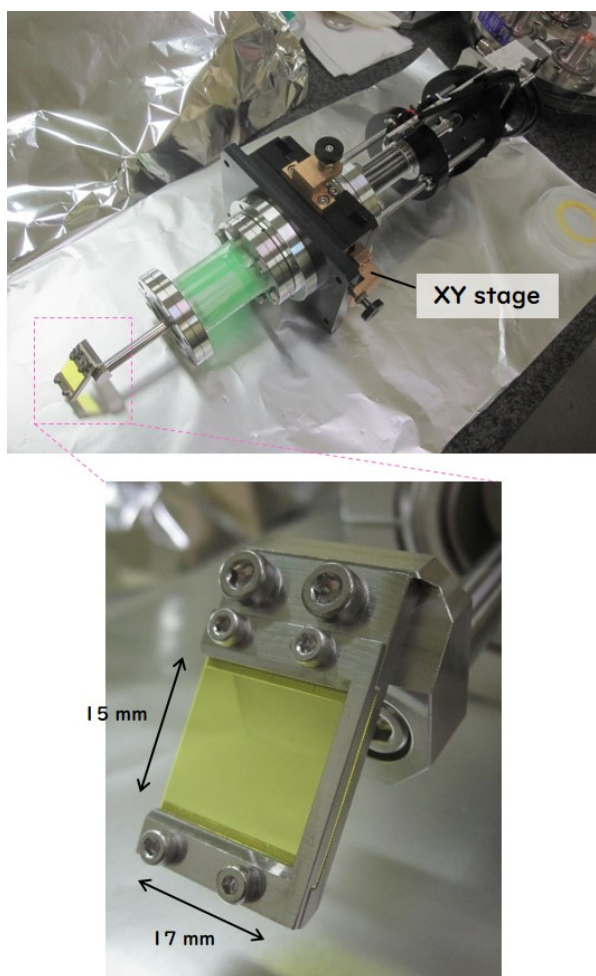


Figure 3: YAG screen.

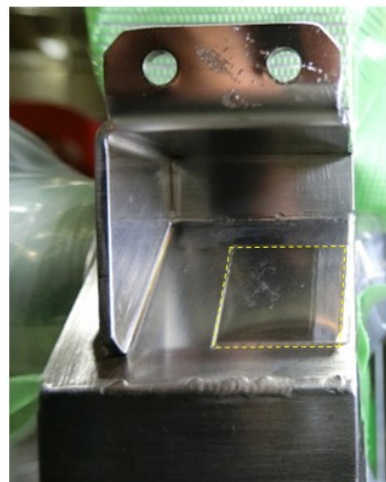
工されている。窓の開口は幅 16 mm、高さ 16.5 mm であり、やはり上述した薄肉ダクトの内法全体をカバーできるサイズとなっている。このスクリーンモニターは、別途放射ターゲットを挿入する必要がないため、リングの入射効率に影響を与えることなく常時入射ビームのプロファイルを観測することが可能である。エアギャップ用の金属窓をスクリーンモニターの放射ターゲットとして利用する試みは、世界でも他に類を見ないユニークなものである。Figure 4 に OTR スクリーンの写真を示す。

2.3 スクリーン観測用光学系

これら二つのスクリーンから出た光は、モニターチェンバー下部に設けられた共通のビューポート (ICF114, 熔融石英) から取り出され、それぞれ 1 枚の平面ミラーを介してカメラに導かれる。二つのスクリーンの中心間距離が 35 mm しかないため、小型のジンバル式ミラーホルダを上下にずらして並べ、スペースに余裕のあった上流側へ光をはねる構成にした。また、上述したように、高エネルギーのビームから得られる OTR は放射軸周りの非常に狭い範囲に集中しており¹、放射面の角度

¹ 2.5 GeV の電子ビームの場合、ターゲットから 1 m 先での OTR の空間的な拡がりは直径 1 mm にも満たない。

(a) 大気側



(b) 真空側 (溶接前)

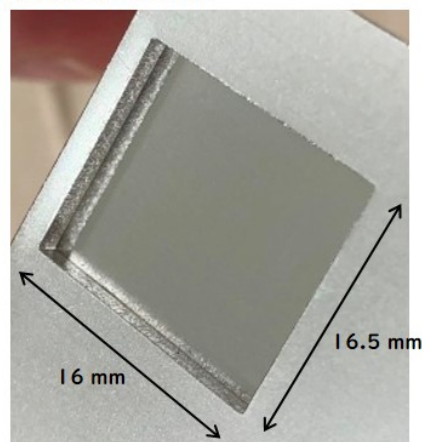


Figure 4: OTR screen.

誤差によってはその光軸がカメラレンズの口径を外れる恐れがあるため、OTR 用のミラーはリモートで角度を調整できるようにした。カメラには、比較的放射線耐性が高いとされている CMOS センサーを用いた GigE カメラ (Allied Vision Technologies, Mako G-030B) を使用した。どちらの発光も減衰時間が非常に短いため、これらのカメラはビームの入射トリガーに同期して動作させる必要がある。被写体であるスクリーンのサイズが小さいことから、カメラレンズには焦点距離 75 mm の CCTV レンズに 2 倍のエクステンダーを付けて使用した。撮像倍率はどちらのカメラも $33.8 \mu\text{m}/\text{pixel}$ となっている。これらの光学系は一つの暗箱に納められ、セプタム 2 用架台の貫部分にアルミフレームを介して固定された (Fig. 1, 2 参照)。

3. 入射ビームの観測例

Figure 5 に YAG スクリーン、Fig. 6 に OTR スクリーンでの入射ビームの観測例を示す。図中にある緑色の枠はカメラから見た各放射ターゲットの開口を示しており、その中心がビーム入射路 (薄肉ダクト) の中心に対

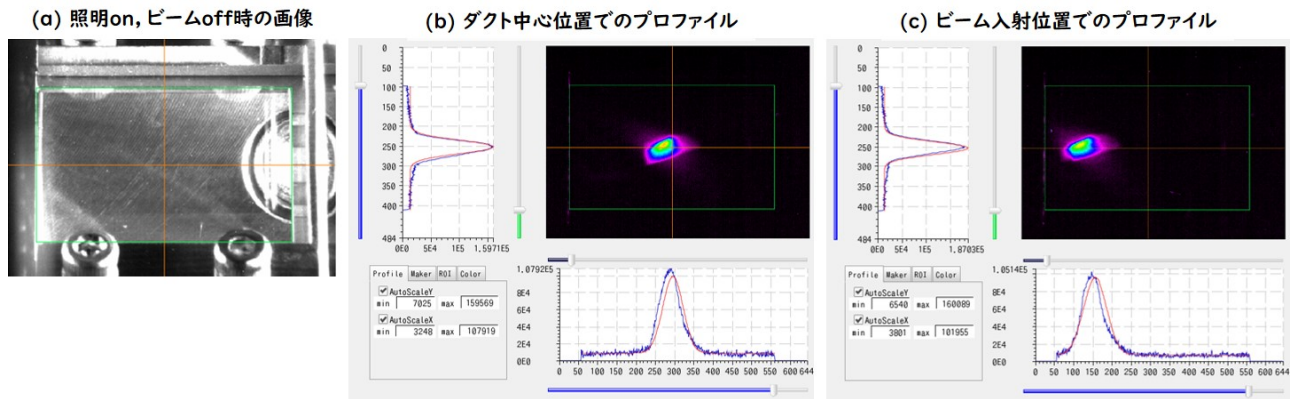


Figure 5: Injection beam profiles observed with the YAG screen.

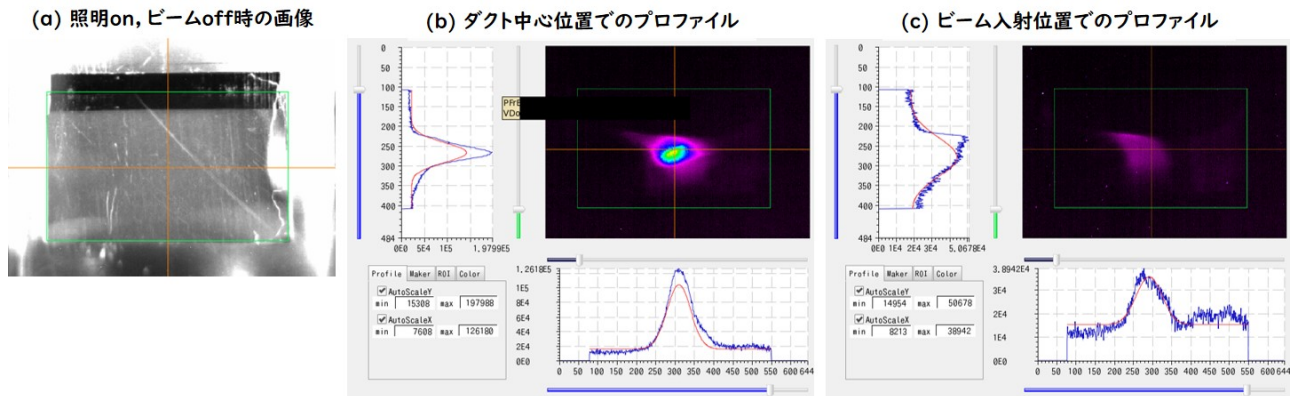


Figure 6: Injection beam profiles observed with the OTR screen.

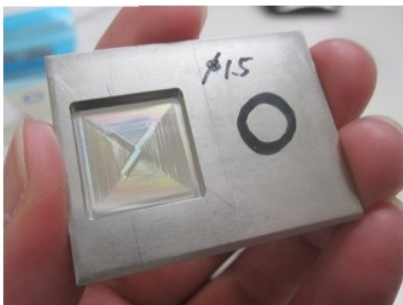
応している。また、画像の上下左右はビームに乗って見たときの方向と一致させてあり、画像の左側がセプタム壁（蓄積リング）の方向である。Figure 5 から分かります、YAG スクリーンでは入射ビームの位置に依らず綺麗なビームプロファイルが得られている。一方、Fig. 6 に示した OTR スクリーンでは、ビームがダクト中心付近にあるときは YAG スクリーンと遜色のない綺麗なプロファイルが得られているが、ビームをセプタム壁近傍の入射位置まで寄せると薄く広がった奇妙な像になってしまう。この像はビームに同期して得られるので OTR に由来しているのは間違いないが、その位置・形状・強度とも本来のプロファイルとはかけ離れている。この原因は、モニターチェンバー組み立て時に行った TIG 溶接の熱の影響で薄い金属窓の表面にうねり（熱歪み）が生じており、ビームが当たる位置によって OTR の光軸が大きくずれるためと考えている。Figure 6(a) のカメラ画像では分かりにくいですが、実際にビューポートから肉眼で覗くと、明らかに金属窓の表面が平坦でないのを確認できる。Figure 2 から分かります、金属窓からビューポートに至るまでの光路が非常に狭いため、角度を持って出た本来の光がダクト内で多重反射して生じた迷光の一部を見ている可能性が高い。今のところ中継ミラーの角度を 2 次元的にスキャンしても YAG スクリーンで得られるような本来の像は現れないため、OTR の光軸はカメラレンズではなくその前のミラーの段階で観測

可能な口径から逸脱していると予想される。

4. 今後の課題

OTR スクリーンにおいて、ビームの入射位置、すなわち金属窓の周辺部においても正しいビーム像が得られるようにするのが今後の課題である。前章で述べたように、正しいビーム像が得られない原因はモニターチェンバー組み立て時に生じた窓表面のうねりと考えられるため、大きな熱歪みを伴う TIG 溶接を使わないチェンバーの組み立て方法や、できるだけ平坦な表面を実現できる窓の加工方法・加工手順を検討している。Figure 7 は、エンドミルによる切削加工のみで製作した厚さ 0.2 mm の金属窓の写真である。肉眼ではほとんど分からないものの、OTR の放射面である真空側の面に 1 mm ピッチの方眼パターンを映してみると、窓表面にわずかながらピラミッド状の加工痕を視認できる（Fig. 7(c) 参照）。このような加工痕は、後の試作でエンドミルの刃の送り方を変えることにより改善できることが分かっている。また、窓周辺の溶接は熱歪みの小さいファイバーレーザー溶接で行い、技術上それが難しい箇所は曲げ加工を適用する等、窓表面にできるだけうねりを生じさせないような組み立て方法の検討も進んでおり、現在はこれらの工夫を組み合わせたモニターチェンバーを試作中である。

(a) 大気側



(b) 真空側



(c) 表面うねりの評価

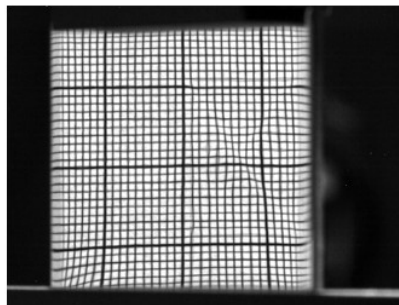


Figure 7: Sample of the metal window manufactured by only machining.

5. まとめ

PF リング入射点のセプタム 2 更新に伴い、2 種類のスクリーンモニター：YAG スクリーンと OTR スクリーンが設置された。YAG スクリーンはセプタム壁側のフレームがないコの字型ホルダを使用しており、セプタム壁近傍における入射ビームプロファイルの精密観測が可能である。OTR スクリーンはエアギャップ用の金属窓から発せられる OTR を利用しており、リングの入射効率に影響を与えることなく入射ビームプロファイルの常時観測が可能である。エアギャップ用の金属窓をスクリーンモニターの放射ターゲットとして利用するこのアイデアは他に類を見ないユニークなものであるが、現状の OTR スクリーンではセプタム壁近傍のビーム入射位置において正しいビームプロファイルが得られていない。その原因はモニターチェンバーの組み立て時に生じた金属窓表面のうねりと考えられており、現在はそれを極力低減し得る方法によるモニターチェンバーの試作が進められている。

謝辞

参考文献にあるとおり、セプタム 2 の更新には筆者らが所属する加速器第 6 研究系の他のメンバーも多く尽力されました。東日本技術研究所の路川徹也氏には、設置

したプロファイルモニター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の地場弘行氏には、モニターチェンバーの試作・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、皆様に深く感謝申し上げます。

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, to be published.
- [2] A. Ueda *et al.*, “Characteristic evaluation of the new septum magnet for PF injection section upgrade”, presented at the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper WEP016, this conference.
- [3] Y. Tanimoto *et al.*, “Vacuum system renewal for the PF-ring injection-section upgrade”, presented at the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper MOP011, this conference.
- [4] S. Nagahashi *et al.*, “Design of the injection point and align magnets for the upgrade of PF ring injection section”, presented at the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Aug. 9-12, 2021, paper THP008, this conference.