

ガフクロミックフィルムを用いた KEK 加速器放射線影響評価のための調査 INVESTIGATION OF RADIATION EFFECTS ASSESSMENT OF KEK ACCELERATOR USING GAFCHROMIC FILM

田中窓香 ^{*,A)}, 岩瀬広 ^{A)}, 岩渕周平 ^{A)}, 塩澤真未 ^{A)}

Madoka Tanaka ^{*,A)}, Hiroshi Iwase ^{A)}, Shuhei Iwabuchi ^{A)}, Mami Shiozawa ^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

At the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) accelerators, we introduced the Gafchromic films: EBT3 (0.01 - 10 Gy) and HD-V2 (10 - 1000 Gy), which change color when exposed to radiation, to determine the appropriate dose to prevent damage to beamline components. In order to correlate the color change of the films with the irradiation dose, calibration irradiation using gamma rays with cobalt-60 was performed and calibration curves were created. In addition, EBT3 and OSL dosimeters, HD-V2 and RadFET were irradiated together at three accelerators in KEK (Linac, SuperKEKB, and Photon Factory), and the results were compared with the calibration irradiation results. Measurements using EBT3 were within 3σ at most points, which is considered sufficient for measuring doses in the accelerators. In contrast, the measurement results in the accelerators for HD-V2 deviated significantly from the calibration curve. This is thought to be largely related to the characteristics of the RadFET. In order to accurately understand the damage to electronic devices caused by accelerator operation, it is necessary to carefully examine and thoroughly compare the irradiation results of RadFET and Gafchromic film.

1. INTRODUCTION

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の加速器では、偏向電磁石や陽電子ターゲットの周辺など、放射線量の高いところで電子機器の故障やケーブル等の樹脂製品の劣化といった放射線の影響による現象に悩まされている。この問題に適切に対処するには、各コンポーネントが浴びる放射線量を的確に把握する必要がある。そのために安価で取扱いが非常に容易なガフクロミックフィルムを導入することにした。

ガフクロミックフィルム GAFChromic™ は ASHLAND 社が販売しているラジオクロミックフィルムの商標名である。ラジオクロミックフィルムとは、放射線照射により変色する物質が添加されたプラスチックの総称で、積算照射線量に応じて色に変化する [1]。ガフクロミックフィルムは感度とエネルギー応答性に優れており、スキャナーを使えば手軽に 2 次元の分布を得ることができる [1]。今回、我々はガフクロミックフィルムのうち、透過型の EBT3 と HD-V2 の 2 種類を導入することにした。これらは透明の薄い黄色のフィルムで、放射線を照射することで青～黒へと色に変化する。色の変化を積算線量に変換するためには、予め色の変化と積算照射線量値を対応付ける校正曲線が必要となる。本論文では、コバルト 60 によるガンマ線を校正照射とした積算線量評価系を構築し、実際に KEK の加速器内での測定と対応させ、KEK 加速器での校正曲線を作成した。

本論文では、1 Sv=1 Gy として、以下 Gy を標準単位として扱っていく。

2. コバルト 60 によるガンマ線校正照射

2.1 ガフクロミックフィルムについて

ガフクロミックフィルムは従来使用されてきたラジオグラフィックフィルムと異なり、現像処理を必要とせず、炭素、水素、酸素を主成分とし銀を含まないためエネルギー依存性が低く、手軽にハサミでカットできるなど、非常に取り扱いがしやすい [1,2]。変色には、放射線感受性モノマーの破断・重合の作用によりポリマー化され染色される作用を利用している。感光材の放射線感受性モノマーが棒状構造のため、スキャナーでの読み取り時に回転および裏表の方向依存性があることに注意して取り扱う必要がある。なお、照射時には回転及び裏表は考慮しなくて良い。ガフクロミックフィルムには、大きく分けて透過型と反射型の 2 種類がある。透過型は、淡黄色で、照射すると青黒く変色する。反射型は表面がオレンジ色、裏面が白色のフィルムで、照射すると黄黒く変化する。反射光でスキャンを行う。フィルムによっては紫外線に感度があり、長時間セットする場合は遮光が必要となる。

今回導入した 2 種類のフィルムそれぞれの特性を表 1 に示す [3,4]。EBT3 はレンジが 0.01~20 Gy であるが、メーカーから 10 Gy 以上は他のフィルムの使用を推奨されていることもあり、0.01~10 Gy の範囲で校正を行った。

スキャンにあたっては、一般的なフラットベッド型スキャナーの使用が推奨されており、フィルムの波長特性を利用するため、RGB 各 16 bit のカラー 48 bit が推奨されている。フィルムは透過型原稿であるので、スキャンの際にはバックライト光源として透過原稿ユニットが必要となる。今回、EPSON 社のスキャナ DS-G20000 と、R-TECH 社のガフクロミックスキャンというアプリケーションを使用した。フィルムはポジカラーフィルムとしてスキャンしている。RGB 各色 16 bit の計 48 bit でスキャンし、ダイナミックレンジの最も大きい赤色 [3,4]

* madokat@post.kek.jp

を解析に使用した。スキャンした Pixel value (以下 PV) 値は 1 枚のフィルムに対して 5 回行った際の平均値を使い、更にスキャンした画像から任意の 40×40 pixel 内の PV 値を読み取った平均値を使用している。

Table 1: The Characteristics of Two Types of Films

| | EBT3 | HD-V2 |
|-----------------|----------------|----------------|
| Dose range (Gy) | 0.01 - 20 | 10 - 1000 |
| Energy range | 60 keV - 1 MeV | 1 MeV - 18 MeV |

2.2 その他の放射線測定器

校正にあたって、OSL (Optically Stimulated Luminescence) 線量計と RadFET (Radiation Field Effect Transistor) を用いた。

OSL 線量計は長瀬ランダウア社のインライトを用いた。OSL 線量計は放射線を受けたある種の物質に特定の波長を当てると、その受けた線量に比例した蛍光を発するという現象 (高刺激ルミネセンス現象) を利用した線量計である [5,6]。これは X 線、ガンマ線、ベータ線用の個人線量計である。中性子線にはほとんど感度を有していない。インライトの使用範囲は 0.01~10 Gy である。X 線、ガンマ線の検出エネルギー範囲は 5 keV ~ 10 MeV、ベータ線に対しては 150 keV ~ 3 MeV である [5]。

RadFET は、Varadis 社製の MOS 型トランジスタを用いた総被ばく量を測定できる機器である。専用の読み取り機でトランジスタとしての閾値電圧を測定し、線量値に変換する。本論文では使用範囲が 10~1000 Gy である VT06 を使用した。また、Varadis 社で公開されている電圧-放射線量対応曲線は使用せず、本論文で行った校正照射により得られた曲線を用いる。

以下、RadFET の原理について説明する。放射線の影響として絶縁層中の電荷蓄積が有り、これによって閾電圧 V_{th} が変化する特性を利用して、 V_{th} の測定値から積算線量を見積もる装置である。MOS 型トランジスタ等の半導体に高エネルギーの放射線が入射した場合、放射線の種類によって支配的となる影響が異なる。陽子や中性子の場合には原子核と衝突し、その原子核が反跳すると半導体の結晶格子に格子欠陥が生じて半導体の実効不純物濃度が変化する。光子または荷電粒子が入射した場合は共有結合を破壊し、イオン化を生じる。半導体の酸化膜や絶縁膜においてイオン化は不可逆的で、影響が蓄積していく ([7], Fig. 1)。RadFET においては放射線が入射するとゲート酸化膜に電子正孔対が生成される。電子はゲート電極から吸い出されるが、正孔はゲート酸化膜内に蓄積され、その量に応じてトランジスタとしての V_{th} が変化する、RadFET ではその量は入射した放射線量へと変換することができる。RadFET においてはシリコン層が薄いため光子または荷電粒子への影響が支配的である。

2.3 ガンマ線校正照射

コバルト 60 によるガンマ線照射について述べる。0.01~0.1 Gy の範囲を KEK 内の照射施設で、0.1~1000

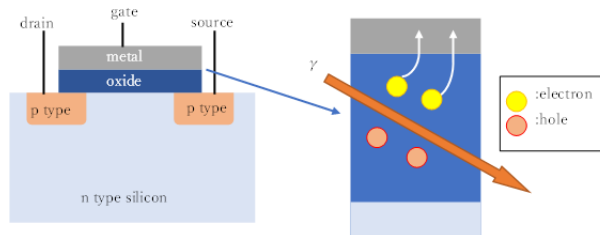


Figure 1: A principle of RadFET [7].

Gy の範囲を量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所 (以下 QST) で行った。コバルト 60 は、天然素材であるコバルト 59 に原子炉で中性子を照射して作られる [8]。時間とともに電子を放射するベータ崩壊を起こしてニッケルに変化する過程で 2 種類のガンマ線 (1.17 MeV, 1.33 MeV) を放出する。QST ではコバルト 60 線源は金属製の筒に密封されており、プール水中に格納されており、照射するときには線源を水中で移動して昇降装置によって照射室内に運ぶ [8]。

照射に正確性を出すため、Fig. 2、Fig. 3 のような治具を準備した。フィルムは 4 cm × 4 cm にカットし、Fig. 2 のように線量計と並べた。二次電子平衡のため、試料は 4 mm 厚の亚克力板で挟んだ。遮光のため、黒の亚克力板を使用している (Fig. 2)。QST での照射では、線量値は QST 公称値を使用した。KEK での照射は、線源の強さを正確に算出できないこと、線源から試料までの距離を正確に測れないことから線量値はインライトで測定した値を使用した。KEK での照射の様子を Fig. 4 に示す。



Figure 2: A jig for irradiating films and dosimeters between acrylic planes.

2.4 ガンマ線照射の結果

スキャンした際の赤の 16 bit デジタルカウント値を PV とし、Optical Density (以下 OD) を求め、未照射のフィルムをスキャンして得られた PV_0 、 OD_0 を使って netOD 値に変換した [9]。



Figure 3: Overall view of a jig for irradiating films and dosimeters. The contents of the black acrylic plate in the middle are shown in Fig. 2.

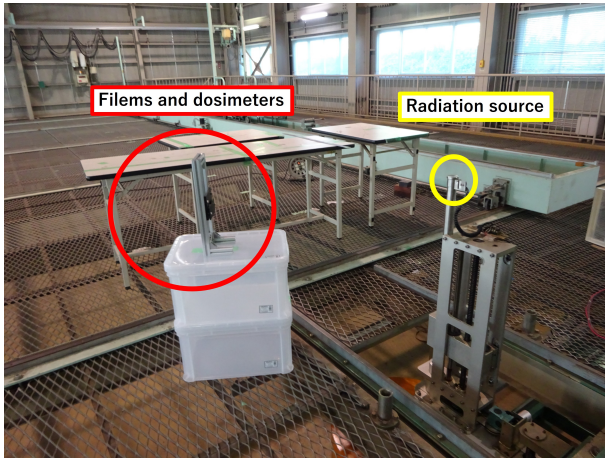


Figure 4: Gamma irradiation setup at KEK. The jig in red circle is Fig. 3. Yellow circle indicates radiation source.

$$OD = -\log_{10} \{PV / (2^{16} - 1)\}$$

$$netOD = OD - OD_0 = -\log_{10}(PV/PV_0)$$

なお、R-TECH 社のソフトでは、白を 0、色の最大値を $2^{16} - 1$ としており、通常の設定と逆になる。そのため、 $PV' = (2^{16} - 1) - PV$ とし、

$$netOD' = OD' - OD'_0 = -\log_{10}(PV'/PV'_0)$$

として計算した。

コバルト 60 の照射結果を、ガフクロミック EBT3 について Fig. 5 に、HD-V2 について Fig. 6 に載せる。

エラーバーはスキャンした際の PV の標準偏差を OD' 値に変換したものである。得られたデータを任意の関数

$$f(x) = a + \frac{b}{x - c}$$

でフィットした [10] 結果、表 2 のように係数と標準偏差 (σ) が求められた。ここで、 σ は得られた曲線と測定値の残差二乗和をデータ数で割ったものの平方根である。

同時に行った RadFET の校正照射の結果を記す。照射前の電圧を V_a 、照射後の電圧を V_b としたとき、照射した積算線量との関係を

$$\Delta V = V_b - V_a = A \cdot Dose^B$$

と表すことができる。校正照射により、 $A = 0.00330$ 、 $B = 0.539$ が得られた。

Table 2: Calculated Constants of Two Types of Films

| | EBT3 | HD-V2 |
|-------|--------|---------|
| a | 0.667 | 0.861 |
| b | -3.12 | -271 |
| c | -4.79 | -320 |
| sigma | 0.0124 | 0.00788 |

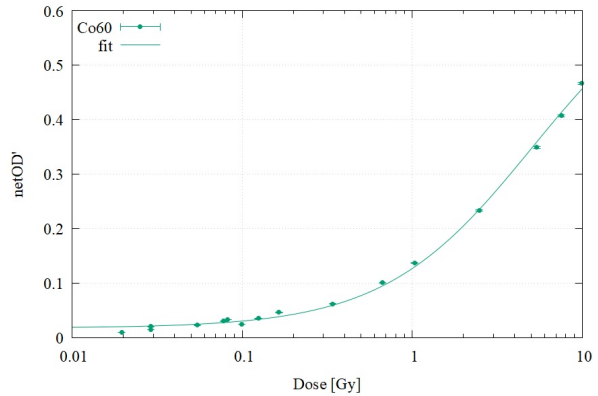


Figure 5: EBT3 calibration result by cobalt-60 irradiation. Error bars are variations in scanning.

3. KEK 加速器での放射線照射

ガフクロミックフィルムでは照射された放射線の線種、エネルギーの切り分けができない。そのため、実際の加速器内の環境において、ガフクロミックフィルムが使えるかの検証を行う必要がある。KEK は複数の加速器を所持している。今回ガフクロミックフィルムを用いて検証を行ったのは、電子陽電子ビームを生成・加速する線形加速器 LINAC、電子と陽電子の衝突実験を行うための円形加速器 SuperKEKB、放射光実験施設である Photon Factory Ring (PF) の 3 つである。それぞれエネルギーや線種の分布が異なるが、トンネル内の放射線は数 GeV の電子ビームが加速器コンポーネントに衝突し

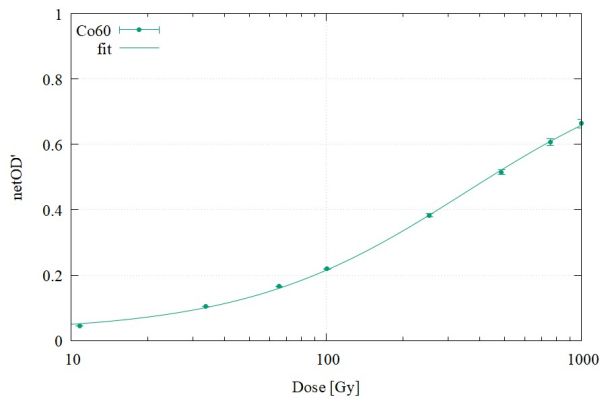


Figure 6: HD-V2 calibration result by cobalt-60 irradiation. Error bars are variations in scanning.

てできる電磁シャワーが主成分だと考えられる。ガンマ線のエネルギー範囲は実効的に 10 keV~50 MeV 程度である。ガンマ線を主として中性子線、ベータ線が確認されており、エネルギーは keV 領域から GeV 領域まで広い範囲に及ぶ。

加速器での照射では、EBT3 の比較に OSL 線量計を、HD-V2 の比較に RadFET を用いた。遮光袋にフィルムと線量計を入れて加速器内に設置した (Fig. 7)。

3.1 Injector LINAC.

LINAC は全長 600 m の電子と陽電子を生成、加速させる線形加速器で、下流にある SuperKEKB、PF 等計 4 つの加速器へビームを供給している。入射器は 100 m と 500 m の直線部が 180 度の ARC でつながっていて、加速管 4 本からなるユニットと、ユニット 8 つからなるセクターが 8 つで構成される。間に電磁石やモニター類、真空機器など様々なコンポーネントを含む。出射点から約 200 m のところに陽電子源ターゲットが置かれている。入射部から徐々に加速された電子・陽電子は下流の各加速器へ分配する最下流のエネルギーはそれぞれ 7 GeV、4 GeV となる。

夏や冬などの長期メンテナンス時、加速器の運転が止まった直後に行われる放射線サーベイで残留放射線の強い場所は把握されている。例えば、直線部をつなぐ J-ARC 部や、陽電子ターゲット付近で非常に高い残留放射線が確認されている。このサーベイ結果を元にし、運転中のメンテナンス日を利用して 2022 年 3 月~12 月の間にデータの採取を行った。

3.2 SuperKEKB ring

SuperKEKB は衝突型加速器で、7 GeV 電子加速リング (HER) と 4 GeV 陽電子加速リング (LER) の 2 つの周長約 3 km のリングそれぞれで加速された粒子を衝突させて実験を行う。ビームトランスポートラインを経て LINAC から電子・陽電子が送られている。当然ながら衝突点付近は非常に高い放射線量となる。今回データを採取したのは、筑波衝突点に近いビームライン周辺である。



Figure 7: Irradiation setup at LINAC. The red circle indicates the light-shielding bag containing the films and dosimeters.

3.3 PF Ring

PF は円形の放射光実験施設で、電子ビームを曲げるときに発生する放射光と言われる光を利用して実験を行う施設である。加速器部分の周長は 187 m で、ビームエネルギーは 2.5 GeV であり、SuperKEKB とは異なるトランスポートラインを経て LINAC からビームが供給されている。PF リング内では入射点や超伝導ウィグラー下流の放射線が高いことが確認されている [11]。

4. 結果

LINAC、SuperKEKB、PF での測定結果をコバルト 60 照射の結果と同時にプロットしたものが Fig. 8、Fig. 9 である。LINAC のデータは赤、KEKB リングのデータは青、PF のデータは水色でプロットした。図中の破線は $\pm 3\sigma$ の範囲を示す。

Figure 8 は積算線量をインライトで値付けした結果である。線量の範囲は 0.01~10 Gy である。EBT3 ではほとんどの点が 3σ 内に入っていることがわかった。これはインライトとガフクロミックフィルムの対応エネルギー・対応線種がよく一致しているともいえる。今回の測定では、ほとんどのインライトでガンマ線のみを検出し、数点の観測点でガンマ線と中性子線を検出しているが、1 つだけ、インライトが電子を感知したものがあった。Figure 8 中の 7 Gy 周辺のプロットである。電子はガフクロミックフィルムの着色の影響が大きい可能性があるが、F. Fienga and F. Ravotti によると、電子線による照射とガンマ線による照射は同じ曲線上に乗っているため、その可能性は低いと考えられる。加速器内で意図的に電子を照射させることは難しく、検証はできていない [10]。

Figure 9 は積算線量を RadFET で測定した結果である。線量の範囲は 10~1000 Gy である。HD-V2 では校正曲線から大きく逸脱するものが多かった。PF での測定 1 点を除いた LINAC、KEKB のデータは曲線より大きく値が出ており、加速器に依存している可能性がある。まだ測定点が足りないため、測定を継続して検証

していく必要がある。これには中性子の影響を受けやすい等の RadFET の特性が大きく影響していると考えられる。RadFET は半導体デバイスなので、加速器内の電子部品の故障の特性と直に対応させられる可能性があり、RadFET で測定した値を使うことが望ましいと考えられる。また、今回、加速器ごとに特性がある可能性がわかったので、今回使用した RadFET (VT06) だけでなく、EBT3、インライトと測定範囲の一致する型を使って、RadFET と一緒に照射を行い、コバルト 60 校正曲線の結果と比較することを検討している。

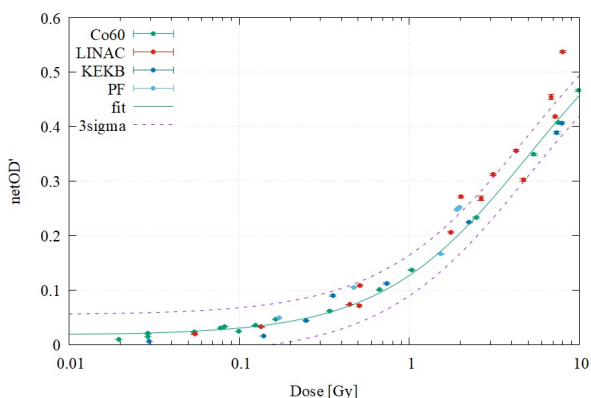


Figure 8: Measurement using EBT3 in accelerators. Red dots are LINAC, blue dots are KEKB, light blue dots are PF data. Dashed lines represent +/- 3 sigma when fitting.

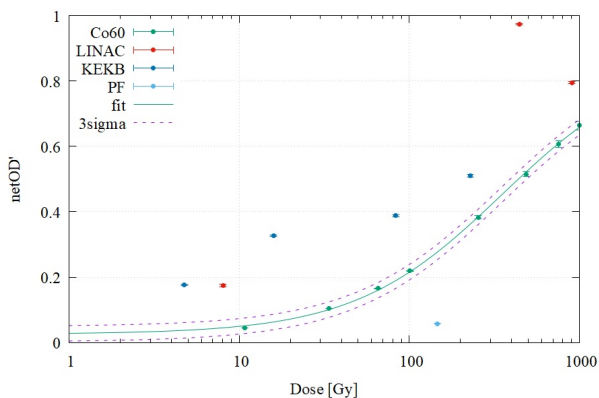


Figure 9: Measurement using HD-V2 in accelerators. Red dots are LINAC, blue dots are KEKB, light blue dots are PF data. Dashed lines represent +/- 3 sigma when fitting.

5. まとめ

KEK 加速器でビームラインコンポーネントの損傷を防ぐための適切な線量把握のために、ガフクロミックフィルム EBT3 と HD-V2 を導入した。フィルムの色の变化と照射線量を対応付けるため、コバルト 60 によるガンマ線を用いた校正照射を行った。また、実際に KEK 内の 3 つの加速器で EBT3 とインライト、HD-V2 と RadFET を一緒に照射し、校正照射結果と比較した。EBT3 を使った測定では、殆どの点で 3σ 内に入って

おり、加速器内で線量を測定するには十分な結果が得られらたと考えられる。対して HD-V2 は加速器内での測定結果が校正曲線から大きく逸脱した。このことは、放射線による応答がガフクロミックフィルムとインライトで似ていること、またガフクロミックフィルムと RadFET では異なることを示唆している。これによって、インライトで測定した線量値がそのまま放射線影響の度合いを示すような対象物に対しては、ガフクロミックフィルムでその評価が可能になったと言える。一方で、前述のように、加速器トンネル内において、電子デバイスの放射線影響はインライトよりも RadFET の値を元に評価する方が望ましいと考えられるため、今後はガフクロミックフィルムによって RadFET の測定値を再現できるような値付けを行うことも重要であろう。

ACKNOWLEDGEMENT

本論文で行ったコバルト 60 照射では量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門高崎量子技術基盤研究所の方々、高エネルギー加速器研究機構放射線科学センターにご協力いただいた。SuperKEKB Ring での測定では、KEKB マグネットグループにご尽力いただいた。また札幌東徳洲会病院の小島秀樹様には PV 値から OD 値への変換について資料をご提供いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] S. Kishimoto and Y. Tanaka Eds., 放射光ユーザーのための検出器ガイド, 1st ed., Kodansha Scientific LTD., Tokyo, 2011.
- [2] ガフクロミックフィルムの取り扱いに関して, 第 10 回ガフクロミック研究会, Kyoto, Japan, 2018. <https://www.veritastk.co.jp/products/pdf>
- [3] GafChromic dosimetry media EBT3, http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf
- [4] GafChromic dosimetry media HD-V2, <http://www.gafchromic.com/documents/gafchromic-hdv2.pdf>
- [5] A. Suzuki *et al.*, Characteristics of OSL Dosimeter for Individual Monitoring for External Radiation, JAEA-Technology, 049 (2014).
- [6] N. Juto *et al.*, Radiation Management Column, Japanese Journal of Health Physics, 36(1) (2001) 95 - 100.
- [7] N. Hubert *et al.*, RadFET dose monitor system for soleil, 7th Int. Beam Instrumentation Conf., Shanghai, China, 2018, WEOB02.
- [8] National Institutes for Quantum Science and Technology, <https://www.qst.go.jp/site/taka-shisetsuka/2103.html>
- [9] GAFCHROMIC EBT2 Technical Brief, <https://www.veritastk.co.jp/products/pdf/GAFCHROMICEBT2TechnicalBrief-Rev1.pdf>
- [10] F. Fienga and F. Ravotti, GafChromic Film Dosimeter CERN calibration, 2453885 (2021).
- [11] M. Shiozawa and T. Obina, ガフクロミックフィルムによるビームロス評価, 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online (Kyushu University), Fukuoka, Japan, 2022, THP014.