

ガフクロミックフィルムによるビームロス評価 BEAM LOSS EVALUATION BY GAFCHROMIC FILM

塩澤真未[#], 帯名崇

Mami Shiozawa, Takashi Obina

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

Measurement of radiation dose distribution in the accelerator shield is very important for knowing where beam loss is occurring during operation. In addition, it is also a guide to find a place with a high radiation dose in order to replace the equipment in the accelerator chamber before failure or to protect it with shielding lead. Generally, radiation dose can be measured by survey meters, film batches, various beam loss monitors, and the like. However, in order to know the detailed distribution over a wide area in the accelerator chamber, it is desirable to have a tool that is inexpensive and easy to install and measure. Therefore, we measured beam loss at the compact energy recovery Linac (cERL) and Photon Factory (PF) accelerators in KEK using Gafchromic film as a tool that can easily measure radiation. Gafchromic film is a type of radiochromic film that discolours due to the rupture and polymerization action of a radiosensitive monomer due to radiation exposure. Originally developed and sold in the medical field for measuring the dose distribution of X-rays and γ rays, it has recently been applied to the accelerator field as well. In this article, we will report on the calibration of absolute values using a radiation area monitor and the beam loss distribution measured at PF.

1. はじめに

加速器は放射線発生装置であり、遮蔽体で覆われた加速器室や加速器トンネル内では加速器運転中、放射線が発生する。ビームロスが比較的多い箇所では加速器の運転停止後も残留放射線が見られることもある。放射線によるダメージは、電磁石やモニターなどの様々な加速器コンポーネントにトラブルを引き起こすことがある。実際に KEK でもビームモニターの CCD 素子が放射線ダメージを受け、ノイズとしてスターダストが見られたり (Fig. 1)、冷却水のゴムホースが放射線ダメージにより硬化して冷却水が漏れるトラブル等も起きたりしている。

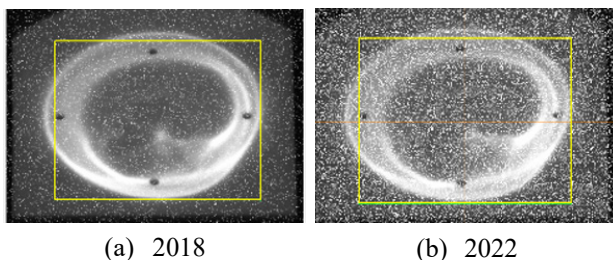


Figure 1: CCD damage due to radiation.

機器の故障前に交換を行ったり、事前に遮蔽鉛等で保護しておいたりするという観点からも、加速器室内のどこでビームがロスしているのか、どこで放射線が強いのかを知ることは非常に重要である。しかし、放射線エリアモニターはリアルタイムで測定できるのが最大のメリットである反面、比較的高価で配線など設置の手間もかかり設置場所が限定されてしまう。そこで我々は放射線を計測するツールとして、設置場所の自由度が高く、比較的安

[#] mami@post.kek.jp

価で複数の場所を同時に測定可能なガフクロミックフィルム(Gafchromic[®] Film Ashland 社製)に着目した。

本稿では、放射線エリアモニターを用いた絶対値の校正や KEK の光源加速器 PF での実際のビームロス測定例を紹介する。

2. 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とは Ashland 社の製品名で放射線への暴露により色が変化するラジオクロミックフィルムの1種である[1]。もともとは、医療分野で X 線や γ 線の線量分布測定用として開発、販売されてきたが、近年は国内外の加速器施設でも使用されているようである[2-5]。類似した放射線測定ツールとしてラジオグラフィックフィルムというものがあるが、これはハロゲン化銀の還元作用を利用しており暗室での現像が必要でエネルギー依存性が高く、使用後の廃棄が面倒である。一方、我々が利用したガフクロミックフィルムは現像や暗室が不要で、放射線感受性モノマーの破断・重合作用によって、Dose 量を色の变化として直観的に理解でき、金属を使っていないため使用後の廃棄も容易である[6]。

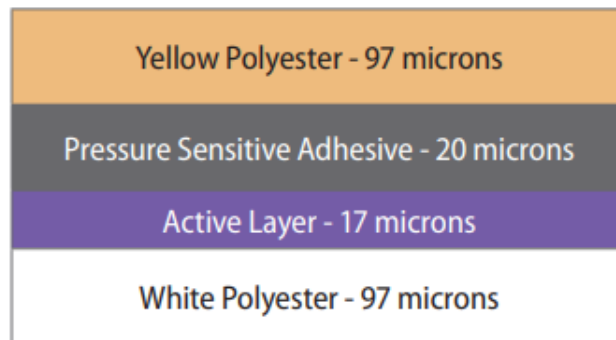


Figure 2: Layer structure of RT-QA2 [7].

ガフクロミックフィルムは用途や感度、照射後の読みとり方法などにより数種類のフィルムがあるが、今回利用したのは感度が20~8000 mGyのRT-QA2である。RT-QA2は Fig. 2 に示すような4層のレイヤー構造である。購入後のフィルムは鮮やかなオレンジ色をしており、照射したDose量に応じて、きつね色、こげ茶色へと変色する(Fig. 3)。



Figure 3: The film on the left has zero dose, and the film on the right has more dose.

3. 測定と解析

ガフクロミックフィルムの吸収特性を調べ、解析方法を検討するために紫外可視近赤分光光度計によりガフクロミックフィルム RT-QA2 の吸収特性のDose量依存性を測定した。また、ガフクロミックフィルムは蛍光灯の光にもわずかに反応してしまうため、遮光方法として採用した市販のポリエチレン製の遮光袋の効果を調べた。

3.1 紫外可視近赤分光光度計

KEK 放射線科学センター所有の日本分光株式会社製の紫外可視近赤分光光度計 V-670 の構成を Fig. 4 に示す。

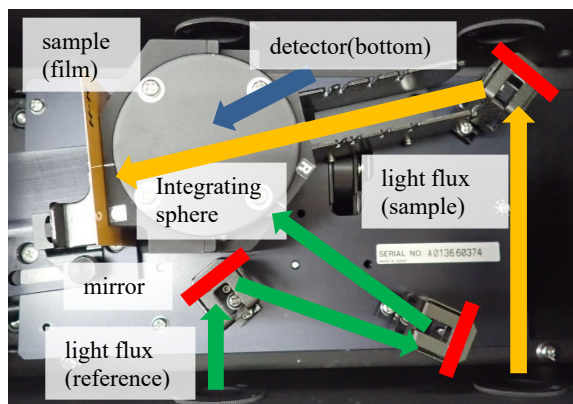


Figure 4: Equipment of V-670.

ガフクロミックフィルム RT-QA2 は反射光で読み取りを行うため、積分球内壁の硫酸バリウム(BaSO₄)で反射光を拡散させて計測を行う積分球ユニットを用いた。測定は350nm~800 nmを1 nmステップで行った。サンプル光を入射光と比較し、Absorptionとしてプロットしたのが Fig. 5 である。黄色のポリエチレン層の影響もあり、波長が450-485 nmの青の領域では吸収は1以上と比較的高いままで、Dose量にはほとんど依存しないことがわかる。一方で500-565 nmの緑の領域や625-780 nmの赤の領域ではDose量が増えるほど、Absorptionも高くなり

Dose量に依存していることがわかった。この結果より解析では赤の成分のみを用いることにした。

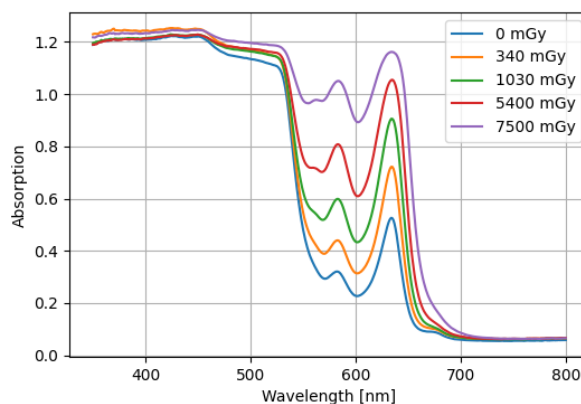


Figure 5: Changes in absorption characteristics due to irradiation dose.

3.2 フィルムの準備と測定

購入直後のフィルムは10インチ四方の正方形であり、そのままでは大きすぎて扱いづらい上に加速器内の多くの箇所への設置ができない。そのため、キズが付かないよう注意しながら、カッターを用いて任意の大きさに裁断した。裁断後は、設置時や運搬時に剥離したり、表面に傷がついたりするのを避けるためポリエチレン製の袋に入れた。準備したフィルムは加速器運転開始前に加速器室の壁やエアモニターの検出器部分の隣などの測定場所に養生テープを用いて固定し、運転停止後に取り出した。cERLでは運転期間中は毎日加速器室内に入ることができるが、ユーザー運転がメインのPFでは毎日入ることができない。そのため、PFでは約2週間に一度のマシスタディの際に加速器室内に入域し回収および設置を行った。

3.3 スキャンと解析

測定後のフィルムは潜像の影響を避けるため半日ほど経過後に一般的な反射式のフラッドベッドスキャナーを用いてデジタル化した。今回はPF制御室にある富士ゼロックス社製のApeosPort C2360を用い、24 bit RGB (8 bit × 3)、解像度は最大設定値の600 dpiで取り込んだ。デジタル化したデータはPythonを用いて解析を行った。はじめに、細かいキズやスキャン時のほこりの影響を避けるためmedian filterで補正し、RT-QA2で最も感度の高いRed成分のみを抽出して8 bitカウント値の平均を求めた。次に、Eq. (1)を用いてカウント値から吸光度Optical Density(OD)に変換した。この赤のOD値をフィルムの変色度合の指標とした。

$$OD = \log_{10} \left(\frac{2^8 - 1}{Counts} \right) \quad (1)$$

3.4 遮光について

様々な測定を進めて行く中でガフクロミックフィルムは蛍光灯の光などの放射線以外のエネルギーにも反応し

て変色してしまうことが分かったため、測定途中から遮光袋を採用した。Table 1 はそれぞれ異なる条件で保管したフィルムの吸光度を示した。遮光袋を使うと加速器室内の蛍光灯による影響をかなり低減できることが分かった。

Table 1: Optical Density (OD)

Boxed and stored on the shelf	0.087 (0.003)
Stored with a light-shielding bag under fluorescent light (for 1 week)	0.09 (0.002)
Stored without a light-shielding bag under fluorescent light (for 1 week)	0.119(0.004)

4. 絶対値の較正

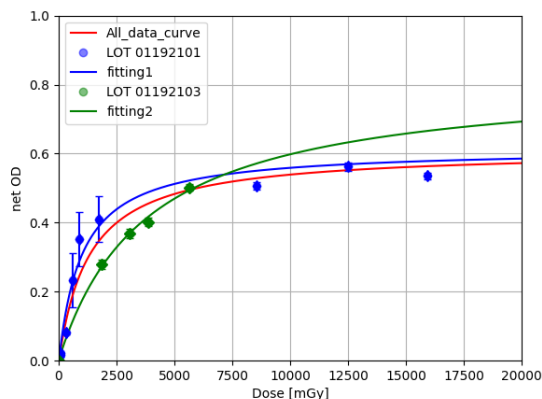


Figure 6: Calibration Curve.

KEK 内の PF および cERL に既存の放射線エアモニターを複数台用いて加速器室内の実環境で求めた較正曲線を Fig. 6 に示す。方法としては、エアモニターの検出器部分の隣にフィルムを設置し、フィルムの設置期間にエアモニターで測定した線量率の積分値とフィルムの変色度合の対応を Eq. (2)^[5]を用い、較正曲線として求めた。また、未照射フィルムの OD 値を差し引いた net OD を縦軸をとすることで、較正曲線が原点を通るようにした。Fitting Parameters は Table 2 に示す。

$$f(D) = a + \frac{b}{D - c} \quad (2)$$

青と緑の曲線はフィルムの LOT 毎に作成したものであり、ポスターにも示した赤色の曲線は全データから求めた曲線である。今回はこの赤色の曲線を用いて、Dose 量の見積もりを行った。

Table 2: Fitting Parameters

	a	b	c
All_data_curve	6.1×10^{-1}	-8.0×10^2	-1.3×10^3
LOT 01192101	6.1×10^{-1}	-6.2×10^2	-9.9×10^2
LOT 01192103	8.2×10^{-1}	-3.1×10^3	-3.8×10^3

5. PF におけるビームロス分布測定例

実際に PF リング内でビームロスにより発生した放射線で変色したガフクロミックフィルムを Fig. 7 に示す。Figure 7(a)のフィルムの設置期間は 2021 年 12 月 9 日から 23 日の約 2 週間で、設置場所は多角形状になっている内壁の頂点から上流、下流にそれぞれ 1000 mm の位置でビームと同じ 1200 mm の高さである。この測定ではまだ遮光袋は採用していない。一方で Fig. 7(b)のフィルムの測定期間は 2022 年 5 月 6 日から 7 月 8 日の約 2 ヶ月で設置場所は実験ホールへと抜けるビームダクトの外側である。この測定では遮光袋を採用している。

内壁の測定結果より、超伝導ウイグラー付近のフィルムの変色が明らかで、それ以外の場所での目立ったビームロスはないことが確認できた。外壁の結果からは、超伝導ウイグラー以外では図中の左側に見られるような局所的なビームロスを発見することができた。これは直上流の Multi Pole Wiggler による影響と考えられる。

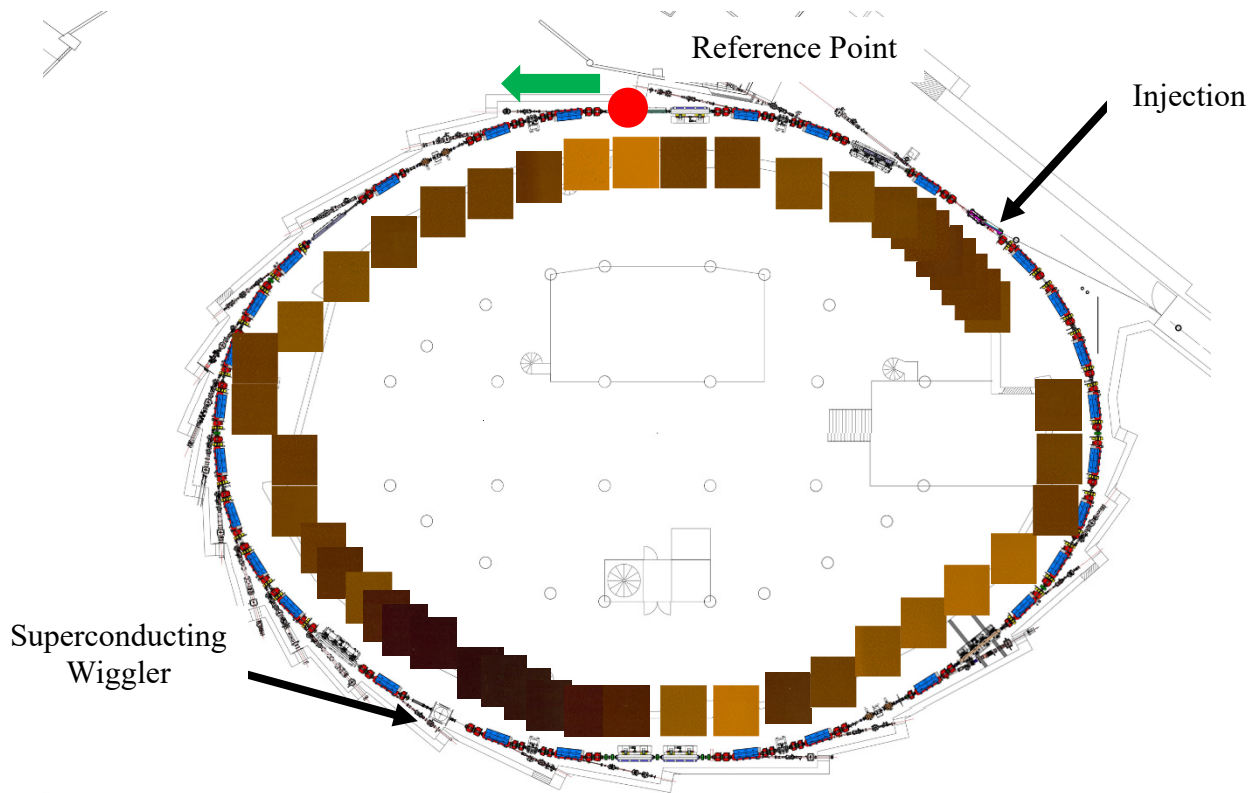
リングの内壁と外壁の分布を比較するため、リング 1 周分を 1 として、Fig. 7 に示す基準点からの相対的な位置における規格化 Dose 量分布を求めた(Fig. 8)。Dose 量は作成した較正曲線を使用して求め、基準点に最も近いフィルムの Dose 量を基準とした。飽和してしまっているフィルムもあり、すべてのフィルムで正確な Dose 量を見積もることはできなかったものの、入射点より超伝導ウイグラー付近でのビームロスの方が多くなっていることが初めて分かった。内壁では、超伝導ウイグラーから比較的近い場所で Dose 量が多くなっているのに対し、外壁ではやや下流での Dose 量が多くなっていることも分かった。

6. まとめと今後の展望

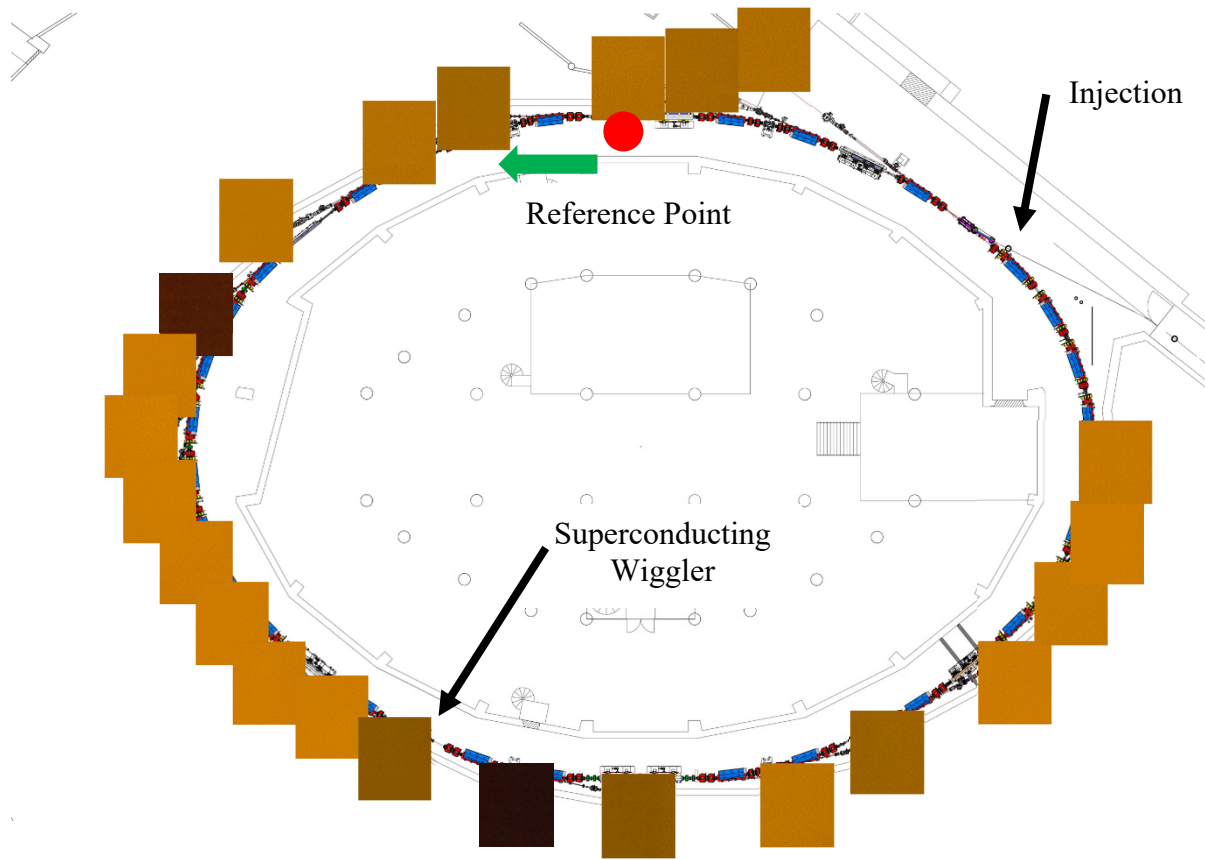
ガフクロミックフィルムを用いて加速器シールド内でのビームロス分布の計測を安価で簡単に行うことができた。較正曲線を求めたことで、放射線エアモニターがない場所でも任意期間内の積分 Dose 量の見積もりが可能となり、広範囲での精密なビームロス分布が測定可能となったことで当初の目標を達成することができた。ガフクロミックフィルムは今回紹介した 20~8000 mGy の感度をもつ RT-QA2 のほかにもさまざまな感度のフィルムがあり、組合せによっては、10 mGy~1 kGy という幅広いレンジでの測定が可能であるため、非常に加速器向きのツールであるといえる。

今回の測定では飽和してしまったフィルムもあったため、今後は適切な感度のフィルムで再測定を行う必要がある。また、リアルタイム性がないという点がガフクロミックフィルムの最大のデメリットであるため、リアルタイムで読み出せるデバイスの製作等も視野に入れて利用の幅を広げたい。本研究では較正に既存の放射線エアモニターを用いたが、シリコン半導体検出器を使用しているため、パルス応答には鈍感である。そのため、Fig. 6 では示していないが本来は横方向の Dose 量の誤差もある。この絶対値の検討やデータ点を増やすなどして較正曲線の精度を高めることが今後の課題である。

本稿では述べなかったが、ビームロスポイントが色の変化として直観的にわかることを利用して、比較的簡単



(a) Inner wall of the PF ring, Installation period : 2021/12/9-2021/12/23, without light-shielding bag.



(b) Outer wall of the PF ring, Installation period : 2022/5/6-2022/7/8, with light-shielding bag.

Figure 7: Irradiated film of the PF ring.

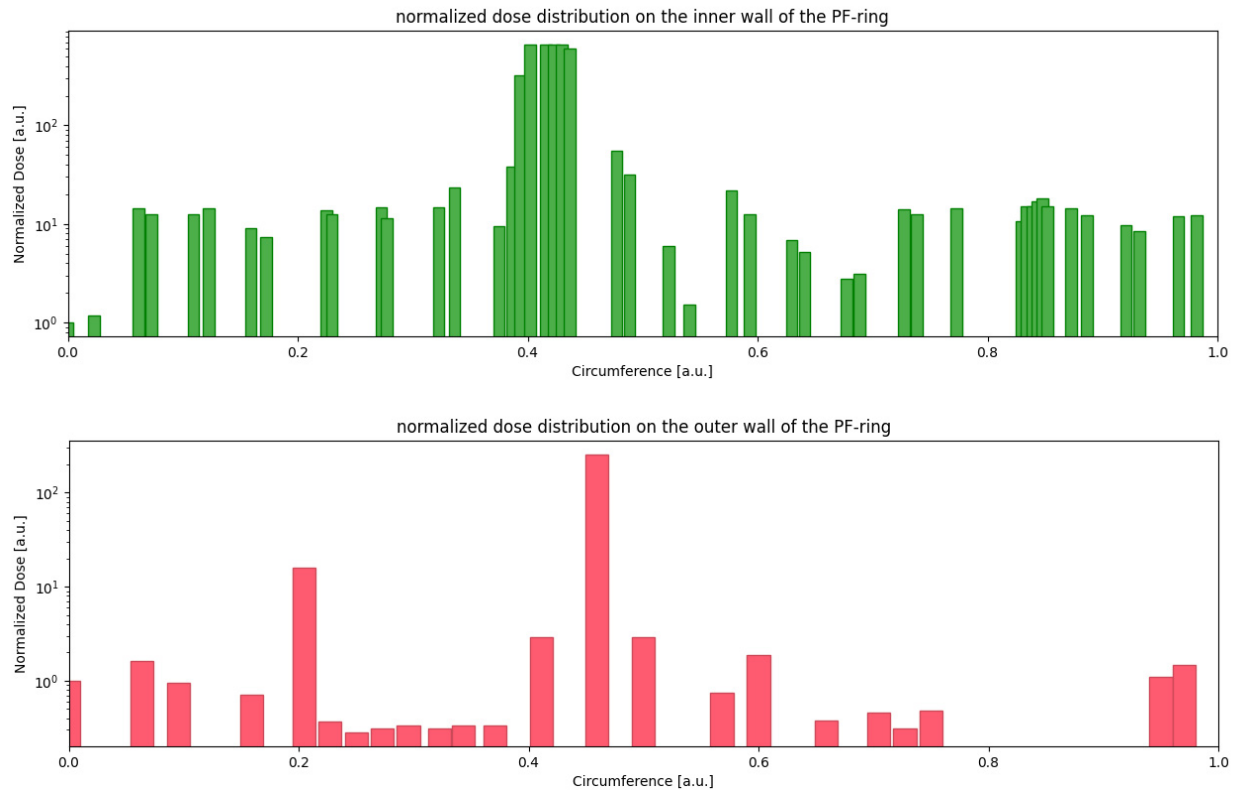


Figure 8: Normalized dose distribution of the PF ring.

に加速器室内に立ち入ることができる cERL ではビーム調整の際に非常に役に立った^[8]。ガフクロミックフィルムは今後も加速器分野での応用が期待される。

謝辞

マシンスタディの合間の短い時間の中でたくさんのフィルムの回収や設置作業には、三菱電気システムサービスの方々や加速器第六研究系の多くの方々にご協力いただきました。また、ガフクロミックフィルムでの計測および解析について KEK 放射線科学センターの岸本祐二氏にご助言いただきました。紫外可視近赤分光光度計の計測に当たっては KEK 放射線科学センターの武智英明氏より手厚くサポートいただきました。この場をお借りして皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] ガフクロミックフィルム研究会編 ガフクロミックフィルムの取り扱いに関して 第10回ガフクロミックフィルム研究会(2018).
- [2] Y. Yuri *et al.*, “Application of a Gafchromic film to the intensity distribution measurement of low-energy ion beams”, in the Proceedings of the 13th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, 2016, p.1277.
- [3] T. Ishizaka *et al.*, “Calibration of gafchromic dosimetry films for large-area ion-beams distribution measurement”, in the Proceedings of the 9th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, 2012, p.594.
- [4] T. Ishizaka *et al.*, “Measurement Method of Ion-beam Relative Intensity Distribution Using γ -Ray Irradiation Response Function of Gafchromic Film HD-V2”, *Radioisotopes* 66, 252 (2017).
- [5] Francesco Fienga, Federico Ravotti. GafChromic Film

Dosimeter CERN calibration. 2021, 2453885.

- [6] 吉田毅 GAFCHROMIC 事始め 第9回 GAFCHROMIC Film 研究会(2017).
- [7] GafchromicRTQA2film;
http://www.gafchromic.com/documents/RTQA2_Literature.pdf
- [8] T. Tanikawa *et al.*, “Current status of compact ERL operation toward high-power CW-FEL”, in the Proceedings of the 19th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022.