

# ラジオクロミックフィルムのリアルタイム測定

○設樂 暁<sup>A)</sup>、恵郷博文<sup>A)</sup>、酒井 汰一<sup>A)</sup>、肥後壽泰<sup>A)</sup>、東 保男<sup>A)</sup>、牛本信二<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、<sup>B)</sup> 三菱電機システムサービス株式会社

## 1. はじめに

加速器における放射線線量分布の把握は、安全運転を行う上で極めて重要である。<sup>[1][2]</sup> 放射線線量の測定装置にはさまざまな手法が存在するが、その中でもラジオクロミックフィルムは、簡便かつ安価に多点同時測定を可能とする有効な方法として広く利用されてきた。しかしながら、ラジオクロミックフィルムは放射線照射後にスキャナを用いた読み取り作業を行わなければ線量評価ができないという課題を有している。このため、照射中に線量を把握することができず、照射時間が過大となってフィルムの測定レンジが飽和し、結果として測定不能となるなど、実験失敗の要因となる問題があった。

本研究では、ラジオクロミックフィルムをリアルタイムで読み取る手法を考案し、試作機の開発を行った。<sup>[3]</sup> 本手法ではカラーセンサを用いて、放射線照射によって生じるフィルムの色変化を高精度に測定し、その情報を線量値へ変換することを可能とした。

本研究では Gafchromic film EBT4 を対象とし、その基本特性ならびに本手法の有効性について検証を行った。

## 2. ラジオクロミックフィルム

ラジオクロミックフィルムとは、放射線に曝露されるとフィルム内部に含まれる放射線感受性モノマーがラジカル反応を起こし、重合することで発色(変色)する放射線検出材料である。従来は医療分野、特にがん治療用加速器における X 線およびガンマ線の二次元線量分布測定を目的として開発・販売されている。

ラジオクロミックフィルムは現像処理や暗室を必要としないため、取り扱いが容易であることが大きな特徴である。一方で、極端な高温環境や蛍光灯下での長時間の曝露は発色特性に影響を及ぼし、測定精度を低下させる可能性があるため、使用環境には注意を要する。

また、フィルム状であることから電源や配線を必要とせず、設置自由度が高いという利点を有する。そのため、多数枚を同時に設置することが可能であり、広範囲にわたる放射線分布測定に適している。

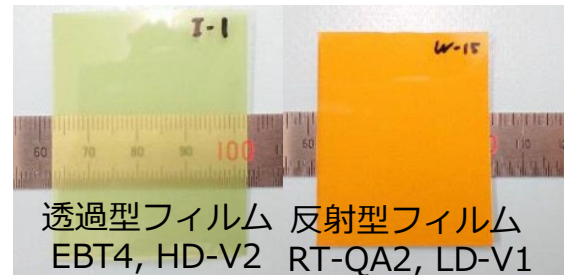


図 1 ラジオクロミックフィルムの外観

さらに、フィルム自体は磁性体を含まないため、電磁石やビームダクトなど磁場環境下への直接設置も可能である。

本研究では、ASHLAND 社製の「Gafchromic film」を使用した。Gafchromic film には図 1 に示すように透過型および反射型など複数の種類が存在するが、本研究では透過型の EBT4 を用いた。<sup>[4]</sup> EBT4 はおよそ 0.2~10 Gy の線量範囲で測定が可能なフィルムである

## 3. リアルタイム測定器

ラジオクロミックフィルムのリアルタイム読み取りに用いた実験装置の構成を図 2 に示す。本システムでは、フィルムの発色を検出するためにカラーセンサを用いた。

カラーセンサで取得した測定データは I2C 通信を介して Arduino に送信される。Arduino は受信したデータをシリアル通信により Raspberry Pi に転送し、Raspberry Pi はネットワーク経由でアーカイブサーバへデータを保存する構成とした。

なお、カラーセンサは測定に先立ち、従来用いていたスキャナによる測定結果との色調整合性を確保するための校正を実施した。

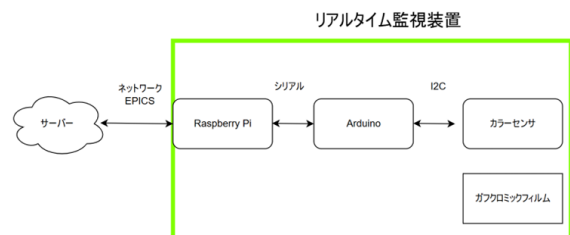


図 2 リアルタイム測定装置のシステム図

#### 4. 実験方法

本実験は、KEK つくばキャンパス電子陽電子入射棟に設置されている加速管コンディショニング用テストスタンドにおいて実施した。本テストスタンドは、S-band 加速管および電子銃の高電力 RF コンディショニングを目的とした設備であり、高出力クライストロンから供給されるマイクロ波を用いて加速管やパルスコンプレッサなどの高電界試験を行うものである。

本研究において線源として加速管を選定した理由は二点ある。第一に、加速管における暗電流 (field emission electron current) と発生放射線線量との間に強い相関があるためである。高電界下では電界放出により電子が加速構造内から放出され、これらの電子が構造壁や下流機器に衝突することで制動放射 (Bremsstrahlung) が発生する。この放射線強度は暗電流量に依存し、暗電流は印加 RF パワーおよび加速電界強度に強く依存する。したがって、RF パワーを制御することで暗電流量を調整でき、それに伴い放射線線量も制御可能である。これは線量依存性評価およびダイナミックレンジ検証を行う上で適した条件を提供する。

第二に、本研究の最終的な目標は実機加速器環境におけるリアルタイム線量モニタリングへの適用である。そのため、実際に運用環境で使用される加速管と同一仕様の装置を用いることで、磁場・真空・パルス RF 条件を含む実環境に近い条件下で本手法の有効性および耐環境性を評価することが可能となる。この観点から、コンディショニング用テストスタンドを実験環境として選定した。

テストスタンドの構成は、シールド外に設置されたクライストロンおよびその高圧電源装置から RF が供給され、パルスコンプレッサを介してピーク電力を増幅した後、導波管系を通じてシールド内部の加速管へ伝送される構成となっている。加速管の上流および下流には暗電流測定用のファラデーカップが設置されており、放射線発生量との相関評価が可能である。

本実験では、RF ピークパワーを 5~65 MW の範囲で設定し、3 時間ごとに 5 MW ずつ段階的に増加させた。各パワー条件において十分な安定時間を確保した後、放射線線量を測定し、RF パワー・暗電流・線量の相関特性およびリアルタイム読み取り手法の応答特性を評価した。

今回のリアルタイム測定器はこのテストスタンドで一番放射線線量の高い下流のファラデーカップ

(図 3) に設置をした。

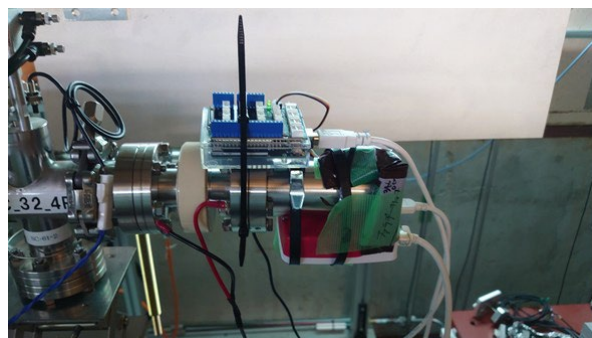


図 3 リアルタイム測定器の設置

#### 5. 実験結果

時間経過に伴う放射線線量の変化を図 4 に示す。図 4 より、時間の経過とともに線量が単調に増加していることが確認できる。この結果は、本研究で構築したシステムによりラジオクロミックフィルムのリアルタイム線量評価が可能であることを示している。また、RF パワーが反射の増大により一時的に低下した際にも、線量が増加していることが確認された。これは、RF 反射に伴う放電現象の発生により暗電流が増加し、その結果として制動放射が強く発生したことを示唆している。すなわち、暗電流に起因する放射線増加を本手法により検出可能であることが確認された。[5][6]

さらに、フィルムの線量から線量率を求めた ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$  と仮定)。これにより求めた線量率と RF パワーとの関係を図 5 に示す。図 5 より、RF パワーの増加に伴い線量率も増加する傾向が明確に確認された。この結果は、RF パワーを上げることで加速電界が強くなり、暗電流が増え、その影響で放射線量も増加するという傾向とよく一致している。

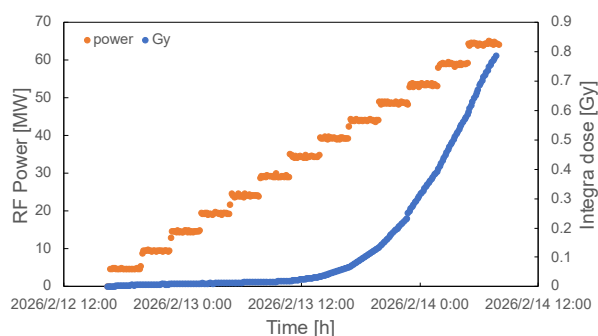


図 4 時間経過に伴う RF パワーと線量の変化

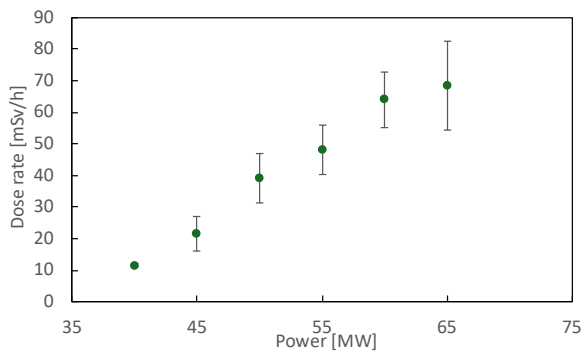


図 5 RF パワーにおける Dose の変化

## 5. まとめ

本研究では、加速管コンディショニング用テストスタンドを用いて、ラジオクロミックフィルムのリアルタイム測定実験を実施した。加速管に印加する RF パワーを段階的に上昇させた結果、線量が時間とともに増加することが確認された。さらに、RF パワーの増加に伴い線量率も増加する傾向が明確に観測された。

今後は、他種のラジオクロミックフィルムを用いた応答特性の比較評価を行うとともに、線種およびエネルギーが既知の線源を用いた校正実験を実施し、線量換算精度のさらなる向上を図る予定である。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] M. Tanaka *et al.*, “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”, 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Aug. 2024, FRP066.
- [3] Pierluigi Casolaro *et al.*, “Real-time dosimetry with radiochromic films” Scientific Reports volume 9, Article number: 5307 (2019)
- [4] 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/2018\\_Gafchromic\\_rivised\\_protocol\\_draft.pdf](https://www.veritastk.co.jp/products/pdf/2018_Gafchromic_rivised_protocol_draft.pdf).
- [5] S.Shitara *et al.*, “ミュオン加速管の放射線線量推定”, 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Aug. 2024, THP065.
- [6] S.Shitara *et al.*, “Radiation dose from dark current electrons in a muon linear accelerator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 1083, March 2026, 171150.