

可逆性ゲル線量計の基礎特性と加速器施設における利用に関する検討

AN OVERVIEW OF REUSABLE GEL DOSIMETERS AND HOW ACCELERATOR FACILITIES UTILIZE THEM

飯島康太郎^{#, A)}, 早川恭史^{B)}, 境武志^{B)}, 高津淳^{A)}, 村上直也^{A)}, 小此木範之^{A)}, 川本晃史^{A)}, 小杉康夫^{A)},
村本耀一^{A)}, 小島佳奈子^{A)}, 加藤奏^{A)}, 鹿間直人^{A)}

Kotaro Iijima^{#, A)}, Yasushi Hayakawa^{B)}, Takeshi Sakai^{B)}, Jun Takatsu^{A)}, Naoya Murakami^{A)}, Noriyuki Okonogi^{A)},
Terufumi Kawamoto^{A)}, Yasuo Kosugi^{A)}, Yoichi Muramoto^{A)}, Kanako Kojima^{A)}, Kanade Kato^{A)}, Naoto Shikama^{A)}

^{A)} Department of Radiation Oncology, Juntendo University Graduate School of Medicine

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University

Abstract

Equipment failure caused by radiation is a frequent problem in accelerator facilities. One way to predict this problem is to measure doses on a long-term basis and correlate equipment failures with accumulated doses. Most of the currently available accumulated dosimeters require destructive reading and are easily saturated, however such dosimeters are not suitable for periodic or accumulated measurements. In consideration of this, there is a need for dosimeters that are able to perform non-destructive reading and integrated dosimetry. We are considering the use of gel dosimeters as a candidate for this purpose. There are many types of gel dosimeters, each of which has its own unique characteristics. There have been several problems in using gel dosimeters in accelerator facilities (e.g. dose-accumulation dependence, narrow measurement range). Polyvinyl alcohol - iodine (PVA-I) complex gel dosimeters, recently developed in Japan, are gel dosimeters that solve various problems of conventional gel dosimeters. The purpose of this report is to confirm whether our originally formulated PVA-I gel dosimeter has the same characteristics as previously reported and to discuss how to use PVA-I gel dosimeters in accelerator facilities. As a result, we report that the characteristics of our PVA-I gel dosimeter are consistent with previously reported results, and that we found the possibility of dose accumulation measurement at the laboratory for electron beam research and application in Nihon University.

1. 背景

加速器施設において放射化による機器の故障は度々問題となっているが、被ばく線量と機器故障の関係性は定量化されていない。これは取り扱いが簡単で、かつ様々な線量的依存性を持たない積算線量計が少なかったことに起因する。

近年、様々な線量的依存性を持たず、かつアニーリング(温めることで線量情報が消失する現象)が可能なゲル線量計が開発された。これは福井工業大学の砂川らと広島国際大学の林らによって考案、開発された国産の新しいゲル線量計である[1-3]。このゲル線量計は Polyvinyl alcohol - iodine (PVA-I) ゲル線量計と呼ばれており、放射線治療装置の線量測定分野で広く研究されるようになってきた[4-6]。我々は PVA-I ゲル線量計の特性は加速器周辺設備の被ばく線量を測定するのに非常に適していると考えており、研究を行っている。本報告では加速器施設における PVA-I ゲル線量計を用いた線量測定のために、その基礎データの再現性を確認し、加速器施設における利用方法について検討したので報告する。

2. Polyvinyl alcohol - iodine complex (PVA-I) ゲル線量計の概要

PVA-I ゲル線量計の構成を Table 1 に示す。一般的

にゲル線量計は不純物に影響を受けるため、精製水以上の水が必要となる。Gellan Gum は線量情報を固定するために用いるゲル化剤として使用する。PVA と KI は放射線と相互作用することでゲル線量計を赤色化させる成分である。Fructose はゲル線量計の線量情報を消失させる還元糖として働く。TBAA は PVA と KI の反応に対する増感剤の役割を持つ。

PVA-I ゲル線量計の具体的な機序は次のとおりである。ヨウ化物イオン(I⁻)が水の放射線分解によって生成されたラジカル(R[•])によって酸化され、ヨウ素分子(I₂)が生成される。I₂ が別の I⁻ と結合すると、三ヨウ化物イオン(またはポリヨウ化物イオン)(I₃⁻)が生成される。I₃⁻ が部分的にけん化された PVA の残存アセチル基のグループと錯体形成することで、赤色化する。また、PVA-I 錯体を還元糖

Table 1: Preparation of PVA-I Gel Dosimeter

Components	Ratio
Pure water	98.6 wt%
Gellan gum	0.4 wt%
Polyvinyl alcohol (PVA)	1.0 wt%
KI	70 mM
Fructose	100 mM
TBAA	2.2 mM

[#] k.iijima.wt@juntendo.ac.jp

存在下で加熱すると PVA と I_3 に解離し、 I_3 がモノヨウ化物イオンに還元され、脱色が起こる(アニーリング)[1]。

照射した PVA-I ゲル線量計は室温でもアニーリングを起こすため、保管のためには保冷庫が必要である。

3. 基礎特性の測定方法

本研究では我々が検討した調合割合で作成した PVA-I ゲル線量計が、既報[1-3]の PVA-I ゲル線量計と同じ特性を示すか調査した。本研究で調査した特性は、線量直線性、エネルギー依存性、線量率依存性、線量積算依存性、吸光特性、アニーリング特性である。

3.1 使用機器

本研究では医療用リニアックである TrueBeam (Varian Medical Systems, Fig. 1 左図)を用いて、PVA-I ゲル線量計を封入した可視分光測定用ディスポセル (Fig. 1 右図)に X 線を照射した。照射した PVA-I ゲル線量計は室温でも時間とともに線量情報が消失していくため、4 °C の保冷庫で保管することで線量情報を持つことが可能である。PVA-I ゲル線量計の線量情報は可視分光光度計やフラットベッドスキャナ等多彩な測定機器で読み出しが可能だが、本研究では詳細な測定のために分光光度計 (ASV11D-H、アズワン)を用いて 490 nm の波長の光を使用した。アニーリングの際には 40 °C を長期間保つことが可能な恒温庫を使用した。

3.2 照射方法と解析方法

3.2.1 線量直線性とエネルギー依存性の測定方法

PVA-I ゲル線量計の線量直線性とエネルギー依存性

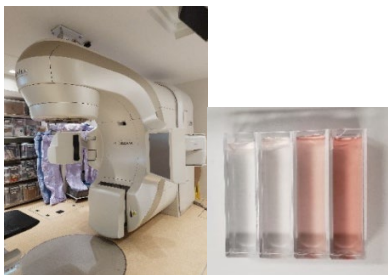


Figure 1: (Left) A medical linac and (Right) PVA-I gel dosimeters sealed in disposable cells. From left to right: redness after 0 Gy, 2 Gy, 5 Gy, and 10 Gy irradiation.

は同時に測定した。4 MV、6 MV、10 MV、15 MV のエネルギーの X 線を 0.5、1、1.5、2、5、10、15、20 Gy 照射した。このとき照射野を $10 \times 10 \text{ cm}^2$ として照射野内に PVA-I ゲル線量計を 10 個並べて同時に照射した。線量率は 6 Gy/分とした。

3.2.2 線量率依存性の測定方法

線量率依存性は、1 Gy/分、2 Gy/分、3 Gy/分、4 Gy/分、5 Gy/分、6 Gy/分の線量率の 6 MV X 線を 5 Gy 照射することで調査した。このとき照射野を $10 \times 10 \text{ cm}^2$ として照射野内に PVA-I ゲル線量計を 10 個並べて同時に照射した。

3.2.3 線量積算依存性の測定方法

12 日間 1 日 1 回、同じ PVA-I ゲル線量計に次の線量を照射することで調査した。照射した線量は、2 Gy を 5

回、20 Gy を 3 回、30 Gy を 1 回、50 Gy を 2 回、100 Gy を 1 回である。アニーリングによる退色が起こらないように、照射後の PVA-I ゲル線量計は 4°C の保冷庫に保管した。

3.2.4 吸光特性の測定方法

線量直線性試験で照射した PVA-I ゲル線量計について、分光光度計を用いて吸光特性評価を行った。分光光度計の読み取り波長を 350 nm から 1000 nm まで変化させて測定することで、PVA-I ゲル線量計の線量情報を取得するのに最も適した波長を調査した。

3.2.5 アニーリングの測定方法

線量直線性試験で照射した PVA-I ゲル線量計を 40°C の恒温庫に保管し、1、2、3、4、12、24、48 時間毎に取り出し吸光度を測定した。取り出した際は 4°C の保冷庫に 1 日保管しアニーリングが起こらない状態に安定させてから、吸光度を測定した。

3.3 加速器施設における線量測定方法

本研究では日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) の加速器設備の被ばく線量測定を簡易的に実施した。Figure 2 に示す位置に PVA-I ゲル線量計を設置し、通常通りの運転をした場合の線量を測定した。I はアンジュレータ入射口前のベンディングマグネット付近の線量を測定するために設置した。II はアンジュレータ入射口に設置しており、磁場下でも線量測定が可能か確認するために設置した。III はビームダンプ後方の光子線並びに中性子線の線量を測定するために設置した。PVA-I ゲル線量計は 3 種類作成し、Fig. 3 のように並べて設置した。Figure 3 における A と C は Table 1 の調合割合で作成した線量計であるが、ロットが異なる。B は Table 1 の調合割合の線量計にホウ素を 100 ppm 添加したものである。ホウ素を添加することで中性子線量を測定の測定可能性を調査した。A を 2 本、B と C を 3 本用意し、運転 1 回毎に 1 つ外すことで、運転 1 回分、2 回分、3 回分の積算線量を測定した。

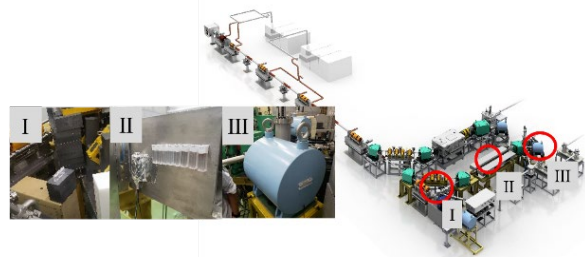


Figure 2: Location of PVA-I gel dosimeters in facilities around the accelerator.



Figure 3: PVA-I gel dosimeter placement. An example of setting of II in Figure 2 is shown. The left side (A side) is the beam entrance side, and the right side (C side) is the outside of the undulator. The same placement was used for all locations.

4. 結果

4.1 線量直線性とエネルギー依存性

Figure 4 に線量直線性試験とエネルギー依存性試験の結果を示す。横軸は線量であり、縦軸は吸光度である。相関分析の結果、ピアソンの相関係数は全てのエネルギーで 0.99 以上となり、p 値は 0.05 を大きく下回った。このことから PVA-I ゲル線量計は高い直線性を持つことが確認された。またエネルギーに依らず同様の測定値を示したことから、本測定で用いたエネルギー帯においてはエネルギー依存性が無いと考えられる。

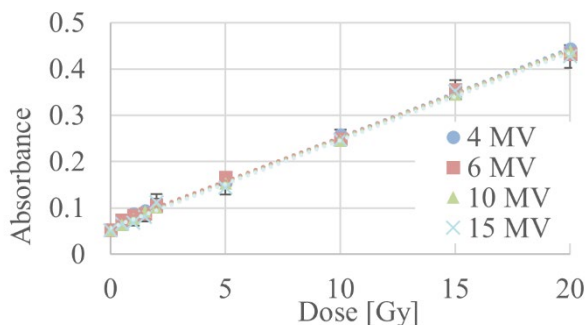


Figure 4: linearity in PVA-I gel dosimeter. Error bars are standard deviations.

4.2 線量率依存性

Figure 5 に線量率依存性の測定結果を示す。横軸は線量率であり、縦軸は吸光度である。相関分析の結果、ピアソンの相関係数は 0.19、p 値は 0.86 となった。このことから本測定で用いた線量率帯では線量率依存性は確認されなかった。

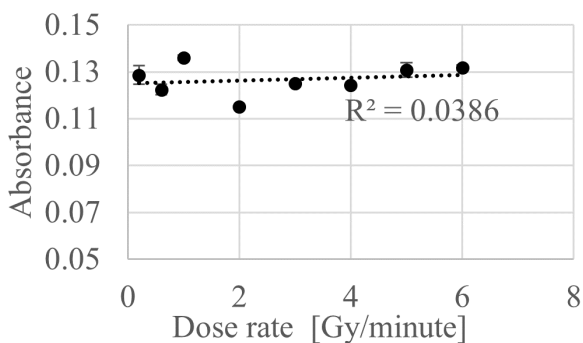


Figure 5: Dependence of dose rate in PVA-I gel dosimeter. Error bars are standard deviations.

4.3 線量積算依存性

Figure 6 は線量積算依存性の測定結果である。Figure 6 の上図は 0 Gy から 300 Gy まで線量を積算した際の線形性を示している。横軸は線量であり、縦軸は吸光度である。Figure 7 下図は照射回数毎の吸光度を示している。横軸は照射回数であり、縦軸は吸光度である。1 回目から 5 回目までは 2 Gy を照射し、6 回目から 8 回目までは 20 Gy を照射した。9 回目は 30 Gy を照射し、10 回目と 11 回目は 50 Gy を照射した。12 回目は 100 Gy を照射した。12 日間にわたって様々な線量を積算したにも関わ

らず、高い線形性を得られたことから、PVA-I ゲル線量計は線量積算依存性を持たないと考えられる。

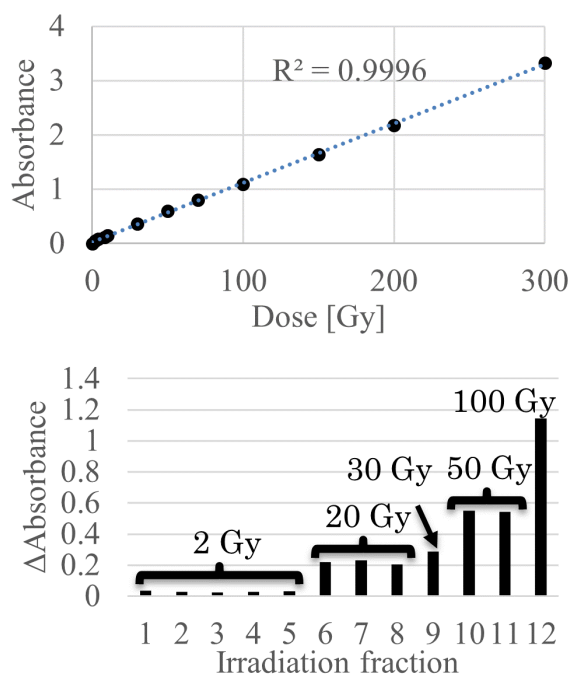


Figure 6: Dose-accumulation dependence. The upper figure shows the linearity of the accumulated dose. The lower figure shows the absorbance for each irradiation.

4.4 吸光特性

Figure 7 は吸光特性の測定結果である。横軸は測定波長、縦軸は吸光度であり、各線は線量を表している。全ての線量において 490 nm の波長で最も高い吸光度を示した。

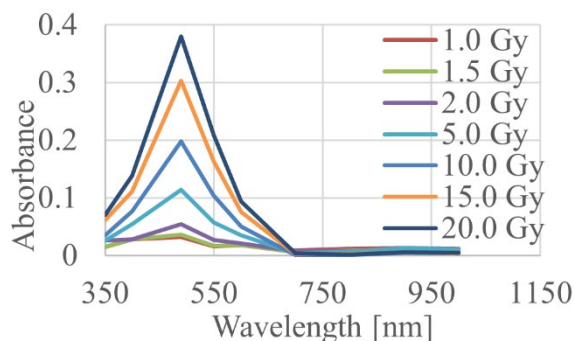


Figure 7: Absorption characteristics. The horizontal axis is the wavelength of light, and the vertical axis is the absorbance.

4.5 アニール特性

Figure 8 は照射後の PVA-I ゲル線量計を 40°C で保管した際のアニール特性である。横軸は恒温庫での保管時間であり、縦軸は吸光度である。各線量は表している。各線量において 12 時間のアニールで十分な線量情報消失を確認した。

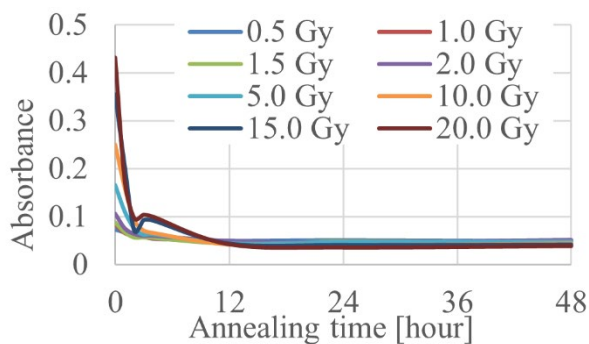


Figure 8: Annealing characteristics.

4.6 ベンディングマグネット周辺線量

Figure 9 はアンジュレータ直前のベンディングマグネット周辺線量を測定した結果である。上図は実際に測定した PVA-I ゲル線量計である。中央図は各測定位置における線量である。下図は測定時間に対する線量の相関を示している。測定位置依存性やアニーリングの影響はあると考えられるが、下図より測定時間に対する高い直線性を得ることに成功した(どの位置でも決定係数は 0.98 以上)。

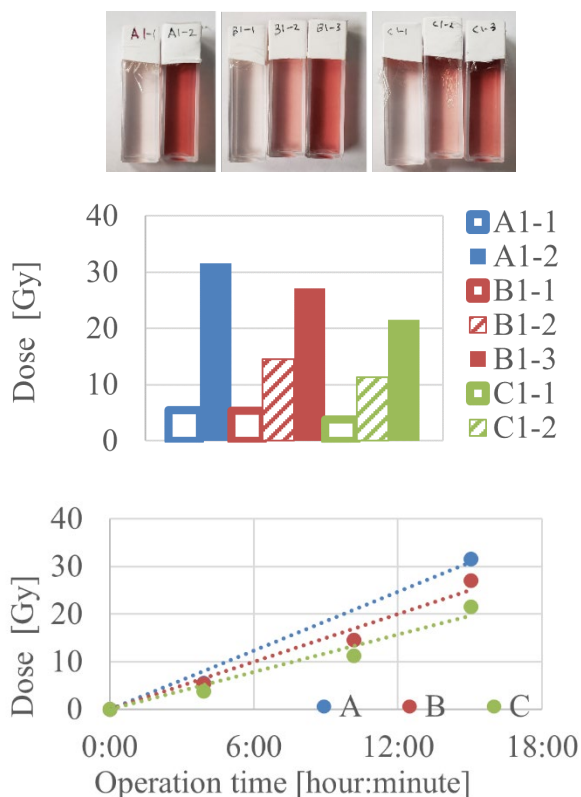


Figure 9: Dose around bending magnet.

4.7 アンジュレータ周辺線量

Figure 10 はアンジュレータ入射直前の線量である。A 側がアンジュレータへのビーム入射口であり、C 側がアンジュレータ外側になる。Figure 9 下図のような直線性は得られなかったが、測定位置依存性が観測され、アンジュ

レータへのビーム入射口側で高い線量を観測した。

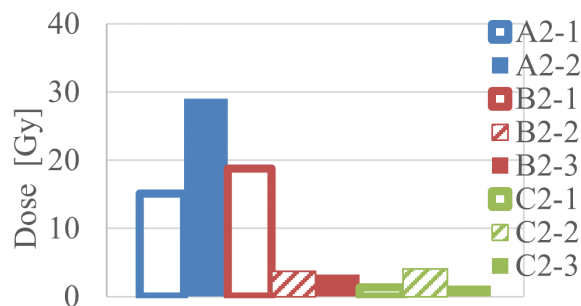


Figure 10: Dose around undulator.

4.8 ビームダンプ後方の線量

Figure 11 はビームダンプ後方の線量である。上図は各位置における線量である。ホウ素を添加した PVA-I ゲル線量計である B において線量直線性が確認できたため、下図のようにプロットし、直線性を調べたところ、決定係数 0.98 と高い線形性を得られた。中性子線量の測定に成功していると考えられる。また他の設備周辺線量に比べて、ビームダンプ後方で測定された線量は 10 Gy 前後と低かった。

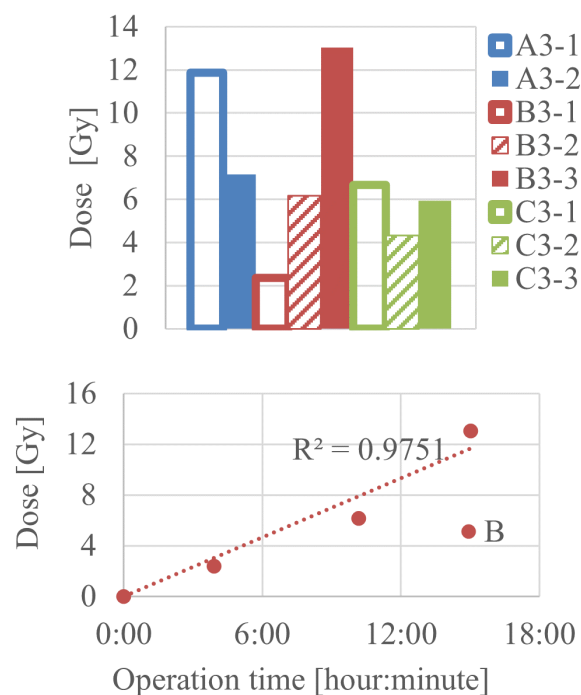


Figure 11: Dose behind the beam dump.

5. 考察

我々が検討した調合割合 (Table 1) で作成した PVA-I ゲル線量計は既出の報告と同じ特性を有することを確認した。PVA-I ゲル線量計は 490 nm の波長において最大の吸光ピークを示し、非常に高い直線性と線量率非依存性、エネルギー非依存性、線量積算非依存性を確認

することができた。また積算線量依存性試験では PVA-I ゲル線量計が非常に広い測定レンジを有していることが確認できた。加速器周辺設備に照射される放射線は線量や線量率、エネルギーが様々であると予想されるため、多くの非依存性と広い測定レンジを持つ PVA-I ゲル線量計は加速器利用施設において加速器設備の線量を測定するのに適していると考えられる。アニーリングについては 20 Gy の線量情報を 12 時間で消失させることができた。しかし、加速器周辺設備の線量測定では 20 Gy を超える線量が観測されたことから、さらに高い線量におけるアニーリング特性を調査する必要がある。また数週間から数か月わたる積算線量測定を目指す場合、室温におけるアニーリングは無視できなくなると考えられることから、様々な温度におけるアニーリング特性を調査する必要もあると考える。

LEBRA の直線加速器周辺設備3か所の簡易的な線量測定を行ったところ、それぞれの測定位置で特徴的な結果が得られた。ベンディングマグネット周辺においては、運転毎に同量の線量積算が確認された。設置位置による線量の違いや室温に設置することによるアニーリングなど、多くのファクターによって正しく線量測定ができていない可能性があるものの、十分な直線性を示した。ベンディングマグネットからの制動放射は広い範囲に同量の放射線を放出している可能性がある。アンジュレータ入射口の線量測定では設置位置に依存した線量差が顕著に表れた。Figure 10 の A 側はアンジュレータ内側であり、C 側はアンジュレータ外側となる。A2-1、A2-2 は運転回数の増加とともに線量の増加も確認できたが、B2-2 から C2-3 では低い線量しか検出されなかった。これはアンジュレータ入射口手前で発生する制動放射はある程度の指向性を有していることを示唆している。またこの測定により磁場下での線量測定が可能であることも示唆された。ビームダンプ後方の線量測定においては、中性子線量を測定することに成功した。Figure 11 下図からわかるように、ホウ素を添加した PVA-I ゲル線量計のみ高い直線性を示した。また他の設置場所と比較して低い線量を示していることから、ビームダンプでビームが停止する際に発生する制動放射や中性子を検出できている可能性がある。ホウ素を添加した PVA-I ゲル線量計は中性子線量のみを測定しているわけではなく、光子線と中性子線の両方の線量が合わかっている。中性子線量のみを取り出す場合は、ホウ素を添加した PVA-I ゲル線量計とホウ素を添加していない PVA-I ゲル線量計の測定値の差を中性子線量とするなど工夫が必要である。

PVA-I ゲル線量計が加速器設備の被ばく線量を測定するツールになり得ることを確認できたが、実際に利用

するには多くの課題がある。1 つ目は室温によるアニーリングで消失した線量情報を補正する必要がある。2 つ目は水分の蒸発の問題であり、これにより成分割合が変化し線量特性も変わるため、確実に密閉する方法を検討する必要がある。3 つ目は線量読み出しの方法を検討する必要がある。現状では正しく線量情報を読み取るために 490 nm の波長を用いた可視光分析を行っているが、このためには毎回線量計を取り外す必要があり、日々の測定には不向きである。一方で必ずしも 490 nm の波長を用いなければ線量測定ができないわけではないことから、ポータブルカラーメータなどによる線量情報読み出しも検討していく。

6. 結語

本研究では PVA-I ゲル線量計を加速器設備の被ばく線量測定に使用することを検討している。本報告では我々が検討した調合割合の PVA-I ゲル線量計が既出の PVA-I ゲル線量計に関する報告と同様の特性を有していることを確認した。また加速器設備の被ばく線量を評価できる可能性を示唆した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K15872 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] S. Hayashi *et al.*, “Novel radiochromic gel dosimeter based on a polyvinyl alcohol – Iodide complex.”, *Radiation Measurements*, 131, 2020.
- [2] K. Fujino *et al.*, “Influence of the components of a radiochromic PVA-Iodide gel dosimeter on the thermal and spatial stability.” *Radiation Measurements*, 135, 2020.
- [3] S. Hayashi *et al.*, “Effects of PVA-GTA-I radiochromic gel dosimeter components on optical dose-response.”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2167, 2022.
- [4] K. One *et al.*, “Dosimetric impact of iodine content in a polyvinyl alcohol-iodide radiochromic gel dosimeter.”, *Radiation Measurements*, 135, 2020.
- [5] K. Ono *et al.*, “Three-dimensional Winston-Lutz test using reusable polyvinyl alcohol-iodide (PVA-I) radiochromic gel dosimeter.”, *Physics in Medicine & Biology*, 66(20), 2021.
- [6] K. Tadano *et al.*, “Elucidation of poly(vinyl alcohol) and iodide gel dosimeter characteristics by predicting changes in radical concentrations and measuring responsiveness to heavy ion beams.”, *Radiation Physics and Chemistry*, 197, 2022.