

PVA-KI ゲル線量計への γ 線照射における *in-situ* 測定研究*砂川 武義^{*1}, 吉橋 幸子^{*2}, Glenn HARVEL^{*3}, 青木 祐太郎^{*1}Study of *in-situ* measuring device for γ -ray irradiation of PVA-KI gel dosimeterTakeyoshi SUNAGAWA^{*1}, Sachiko YOSHIHASHI, Glenn HARVEL, and Yutaro AOKI^{*1} Faculty of Engineering, Department of Applied Nuclear Technology

In recent years, in radiation cancer therapy, a technique for easily visualizing radiation and evaluating accurate dose distribution is required. In our laboratory, we have developed a gel dosimeter made from PVA, KI, borax, and fructose, which have the same composition as biological components. Furthermore, in order to clarify the effect of radiation irradiation on the PVA-KI gel dosimeter, we developed a separate type *in-situ* measurement device that enables *in-situ* measurement of light absorption of the gel during irradiation. In this study, in order to clarify the characteristics of the PVA-KI gel as a dosimeter, we compared the measurement results using a separate *in-situ* measurement device and the measurement results using an ionization chamber. Furthermore, we tried to clarify the characteristics of γ -ray irradiation to PVA-KI gel by comparing with the results of X-ray irradiation.

Key Words : Chemical Dosimeter, Gel Dosimeter, *in-situ*, γ -ray

1. 緒 言

近年、放射線がん治療において、容易かつ正確な線量分布評価のための新たな放射線可視化技術が求められている。本研究室では、可視化技術の中で生体成分と同等の組成を持つ、部分ケン化ポリビニルアルコール (PVA)、ヨウ化カリウム(KI)、ホウ砂、果糖を原料とするゲル状化学線量計 (ゲル線量計) を開発した^{1,2)}。さらに、PVA-KI ゲル線量計への放射線照射効果の詳細を明らかにするために、従来、測定が困難であった鉛やコンクリートで遮蔽された管理区域内に照射試料と共に設置し、放射線照射中のゲルの光吸収 *in-situ* 測定 (その場測定) を可能とする PVA-KI ゲル線量計に特化した発光ダイオードと RGB カラーセンサを組み合わせたセパレート型 *in-situ* 測定装置を開発した^{3,4)}。本研究では、PVA-KI ゲルの線量計としての特性を明らかにするため、PVA-KI ゲルへの γ 線照射に対して、セパレート型 *in-situ* 測定装置を用いた PVA-KI ゲルの光吸収に伴う受光カウントの時間分解測定と電離箱を使用した吸収線量の時間分解測定を行い、これらの測定結果の比較を行った。さらに、X線照射の結果と比較することにより、PVA-KI ゲルへの γ 線照射の特性を明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

2. 1 PVA-KI ゲル

本研究で使用した KI 濃度 9 wt% の PVA-KI ゲルの作製に使用した薬品について以下に記す。部分ケン化 PVA

* 原稿受付 2023年5月19日

^{*1} 工学部原子力技術応用工学科^{*2} 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学大学院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)^{*3} オンタリオ工科大学 (2000 Simcoe Street North Oshawa, Ontario, Canada L1H 7K4)

E-mail: sunagawa@fukui-ut.ac.jp

(日本酢ビ・ポパール社製 JP20R 重合度 2000 ケン化度 86.5–89.0 mol%), KI (ナカライテスク製 純度 99.5%), ホウ砂(松葉薬品製 ホウ酸ナトリウム $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 粉末), 果糖(日新製糖製 フルーツシュガー), 蒸留水である。PVA-KI ゲルの配合比は, PVA 5.5 wt%, KI 9.0 wt%, ホウ砂 3.6 wt%, 果糖 4.9 wt% である。

2. 2 セパレート型 *in-situ*測定装置

Fig.1 に *in-situ* 測定装置の概要図を示す。本研究では, 発光ダイオードとカラーセンサを組み合わせ, 放射線照射下での PVA-KI ゲルの光吸収に伴う受光カウントの時間分解測定を行う事を目的に本装置を作製した。本装置は 320×240 TFT カラーディスプレイ, microSD カードスロットを備えた SoC 搭載モジュールである M5STACK-BASIC (M5Stack 社製), タイマー基板, 電源からなる制御及び記録部と光源として発光ダイオード (LED) (中心発光波長 500 nm) を設置し, 対面に受光部として RGB カラーセンサ (S11059-02DT/03DS (浜松ホトニクス社製)) を設置した測定部からなる。本研究では, 制御及び記録部と測定部を約 3 m のケーブルで繋げた。Fig.2 に測定部の写真を示す。測定部に設置した RGB カラーセンサの Green, Blue, Red の感度波長は 455–630 nm, 400–540 nm, 575–660 nm である。PVA-KI ゲルは光路長 1cm の PMMA 製の吸光度測定用のディスポセルに封入し, 発光ダイオードとカラーセンサに挟まるように設置した。発光ダイオードの光強度を調整するため可変抵抗を付けた。

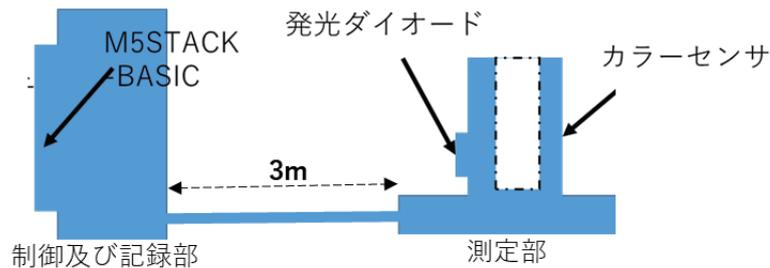


Fig.1 Schematic diagram of separate type *in-situ* measurement device

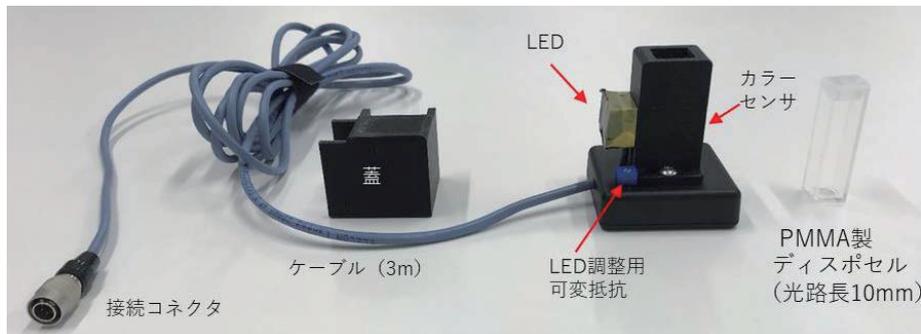


Fig. 2 Photograph of the measurement part of the separate type *in-situ* measurement device

2. 3 γ 線照射

名古屋大学のコバルト 60 γ 線照射室において γ 線照射測定を行った。照射条件は線量率 197 mGy/min で約 20 Gy 照射した。ここで, γ 線の吸収線量は電位計 (EMF521A 型 EMF ジャパン製), 電離箱線量計(TN31013 型 0.3 cm^3 指頭形 ドイツ PTW 社製)を用いて測定した。Fig.3 に照射室内における装置の配置を示す。照射試料は, コバルト 60 γ 線源から 50 cm の位置にセパレート型 *in-situ* 測定装置の測定部に挿入し, 電離箱を並べて設置した。セパレート型 *in-situ* 測定装置による受光カウント測定は 10 秒間隔で, 電離箱は 0.5 秒間隔で測定を行った。セパレート型 *in-situ* 測定装置の制御及び記録部は測定部から 3 m 離し, 鉛ブロックで囲んで遮蔽した。電離箱は接続ケーブルを照射室外へ出し, 電位計に接続して使用した。

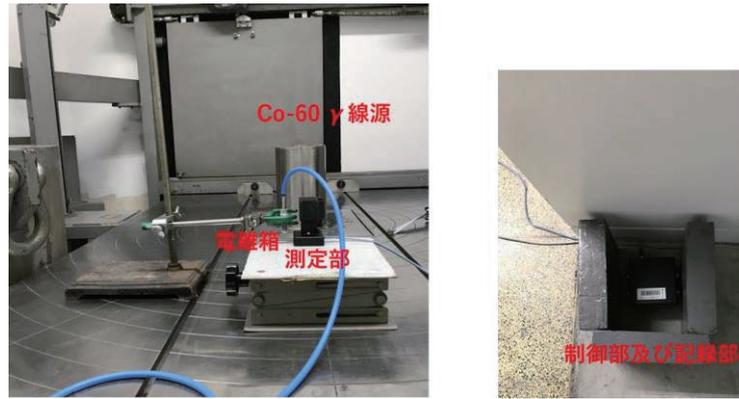


Fig.3 Arrangement of measurement equipment in the gamma ray irradiation room

2. 4 X線照射

試料へのX線照射はX線照射装置（日立社製 MBR-1520R-4）を使用した，照射条件は，フィルタ：Al 0.5 mm + Cu 0.1 mm を使用し，以下の a~c の条件で X線照射装置の装備する電離箱線量計による空気カーマの測定で 20 Gy となる照射を行った． a) 線量率 190 mGy/min，管電圧 120 kV，管電流 5 mA，線源からの距離 550 mm， b) 線量率 310 mGy/min，管電圧 150 kV，管電流 5 mA，線源からの距離 550 mm， c) 線量率 2450 mGy/min 照射条件は，管電圧 150 kV，管電流 20 mA，線源からの距離 400 mm である．本照射において光路長 1cm のディスポセルに PVA-KI ゲルを充填し，*in-situ* 測定装置の測定部に設置し，測定部を寝かせた状態で行った．ここで，150 keV の γ 線照射における水の線減弱係数⁵⁾は 0.149 cm^{-1} であり照射源側と下流側の距離を 1cm とした場合，強度（光子の束密度）は 0.86 倍に減衰する．測定はセル中央の 0.5cm であるため強度（光子の束密度）は 0.93 倍減衰した位置で測定を行った．

3. 結果と考察

3. 1 PVA-KI ゲルの線量計としての特性

PVA-KI ゲルの線量計としての特性を検討するため，*in-situ* 測定と電離箱の測定結果の比較を行った． Fig.4 に γ 線照射での *in-situ* 測定と電離箱における時間分解測定の結果を示す． Fig.4 の左図は *in-situ* 測定結果であり縦軸は受光カウント，横軸は時間である．右図は電離箱により測定した結果で縦軸は吸収線量，横軸は時間である．

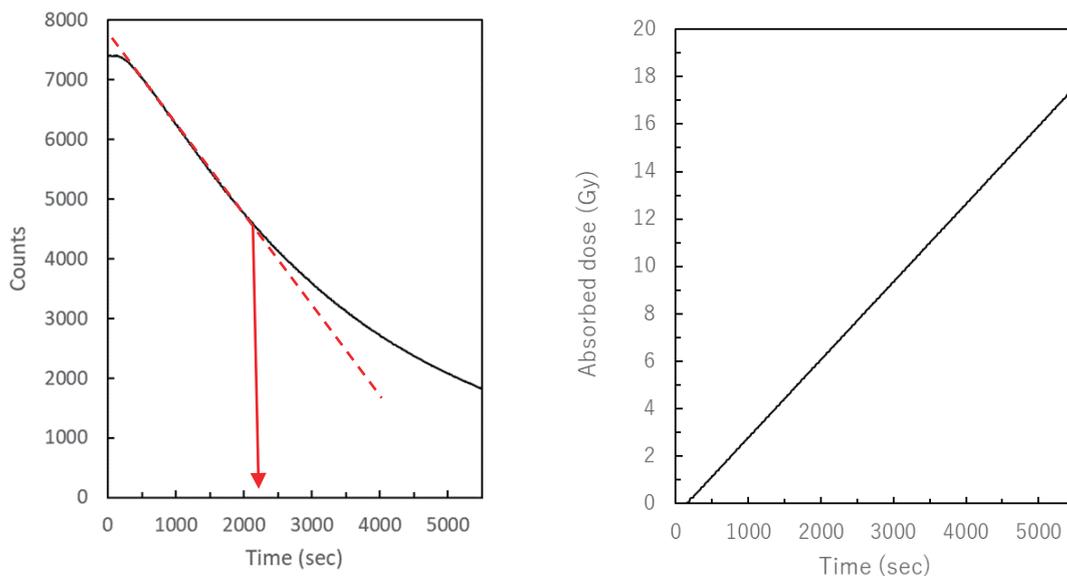


Fig.4 Results of time-resolved measurement for *in-situ* device (left) and ionization chamber (right)

Fig.4 の左図の *in-situ* 測定結果は、時間経過と共に受光カウントが減少し、250–2250 sec の時間領域において、時間に対する受光カウントが線形性 (赤点線) を示している。Fig.4 の右図の電離箱による測定結果は、時間経過と共に吸収線量が増加し、200–5500 sec の時間領域において時間に対する吸収線量が線形性を示している。ここで、コバルト 60 γ 線源は照射開始時約 120 sec かけて照射位置へ約 110 mm 上昇するため、測定における初期時間において測定結果が線形性からずれると考える。

次に、Fig.5 に、Fig.4 における *in-situ* 測定結果と電離箱の結果の各時間における受光カウントと吸収線量を対応させた結果を示す。ここで、Fig.5 の左図は縦軸の受光カウント測定結果を等分目盛で示し、右図は対数値で示している。Fig.5 の左図は 1–7 Gy の吸収線量領域において線形性 (赤点線) を示すが、7Gy 以上吸収線量域に

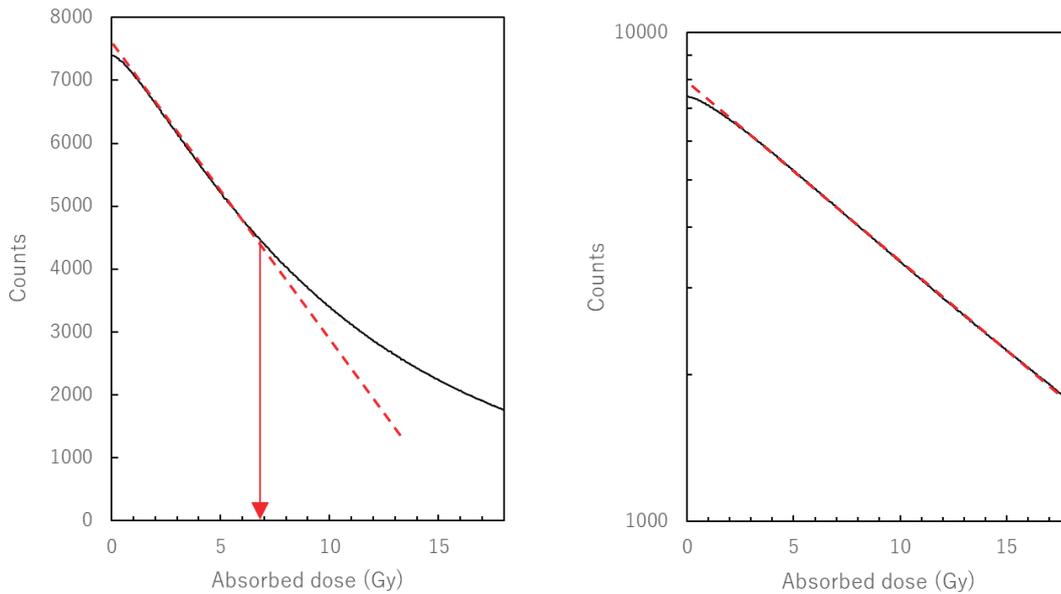


Fig.5 Result of absorbed dose dependence of received light count

において大きく線形性から外れる傾向を示した。そこで、Fig.5 の右図に示すように縦軸を対数値にとり受光カウントと吸収線量との関係を見ると 2 – 18 Gy の領域で線形性 (赤点線) を示す結果が得られた。これらの結果は、本研究室で開発した PVA-KI ゲルと *in-situ* 測定装置の組み合わせにおいて、測定した受光カウントを対数値にとれば、2Gy 以上の吸収線量領域で電離箱と同等の線量測定が可能であることを示唆している。

3. 2 PVA-KI ゲルへの γ 線照射と X 線照射の比較

次に、Fig.6 に PVA-KI ゲルへの γ 線照射と X 線照射効果を検討するため、a~c の異なる X 線照射条件におい

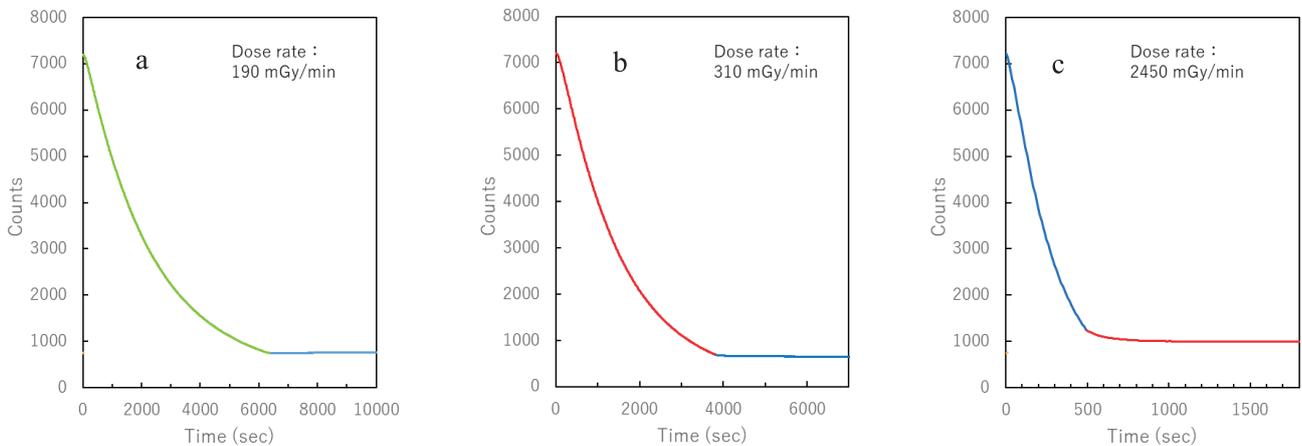


Fig. 6 Results of measurement under different dose rate conditions in X-ray irradiation

て吸収線量 20 Gy 照射したときの測定の結果を示す。ここで、各照射条件は、 γ 照射の線量率が 197mGy/min であるため、X 線照射においても、それに近い線量率である a: 190 mGy/min, b: 310 mGy/min で照射した。また、c は、線量率を約 10 倍高めた 2450 mGy/min で照射した。Fig.6 a において 6315 sec 間 X 線照射している (緑線)、6315sec 以上の時間は X 照射せず測定を行った (青線)、Fig.6 b において 3870 sec 間 X 線照射している (赤線)、3870 sec 以上の時間は X 照射せず測定を行った (青線)、Fig.6 c において 490 sec 間 X 線照射している (青線)、490 sec 以上の時間は X 照射せず測定を行った (赤線)。a~c において X 線照射時は、受光カウントが減少する傾向を示す。X 線照射をしていない時間領域において、a と b は時間に依存せず受光カウントの値は一定であるが、線量率の高い c は、照射終了後も受光カウントが緩やかに減少する傾向を示している。これは、ポリヨウ素と PVA との呈色反応が終わっていないことを示唆している。

次に、Fig.7 左図に Fig.4 の γ 線測定結果と Fig.6 の X 線測定結果を示す。ほぼ同じ線量率である γ 線と X 線の結果を比較すると全ての時間領域で γ 線が最も受光カウントの値が高くなっている。次に Fig.7 右図に Fig.5 の γ 線測定結果と Fig.7 左図の X 線測定値の横軸の時間に各線量率を掛けて吸収線量に変換した結果を示す。ここで縦軸の受光カウントは対数値である。X 線照射において 190 mGy/min と 310 mGy/min の結果は重なり、良い一致を示している。また、1-18 Gy の吸収線量領域において線形性を示している。しかし、2450 mGy/min の受光カウントは 190 mGy/min と 310 mGy/min の結果に比べて高い値を示している。また、全吸収線量領域において線形性からずれる傾向を示している。これは、高線量率での照射において呈色反応が終わる前に X 線照射されたためであると考えられる。同じ線量率における γ 線照射と X 線照射の比較において、 γ 線照射の受光カウント数が大きい。このことは、PVA-KI ゲルが放射線のエネルギーにより測定感度に変化することを意味している。

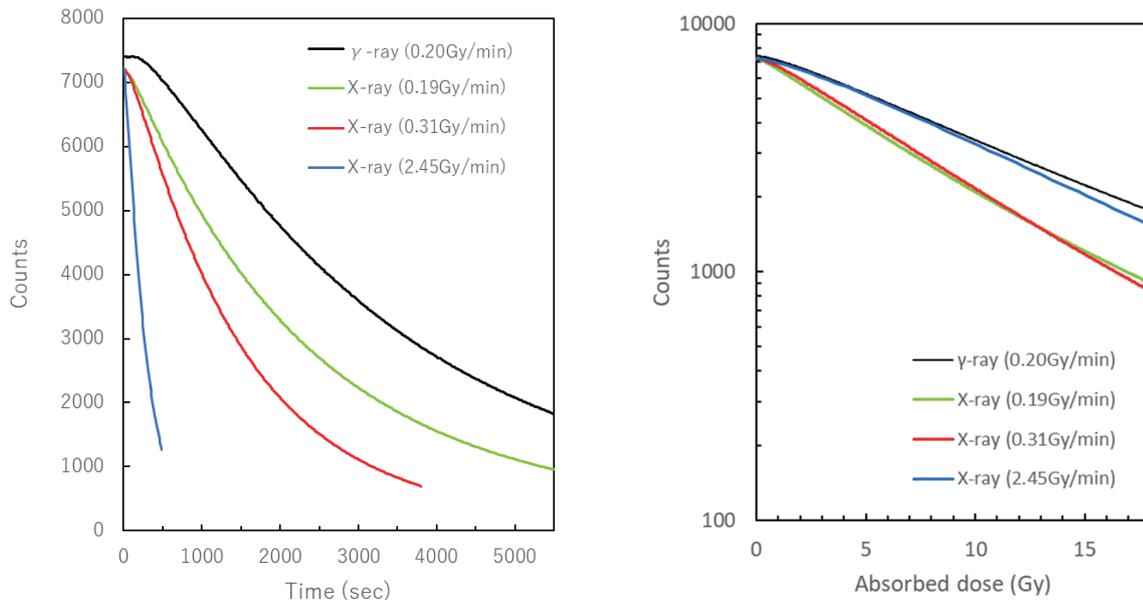


Fig. 7 Comparison of measurement results for γ -ray and X-ray irradiation

4. 結 言

本研究では γ 線照射と同時に受光カウントの測定を可能とするセパレート型 *in-situ* 測定装置を開発した。PVA-KI ゲルの *in-situ* 測定において、測定した受光カウントの対数値が、2Gy 以上の吸収線量領域において電離箱の測定結果と相関関係があることを明らかにした。本結果は、PVA-KI ゲルが放射線がん治療において、容易かつ正確な線量分布評価のための有効な放射線可視化技術になりえることを示唆していると考えられる。

文 献

- (1) 砂川, 青木 「可逆的ラジオクロミックゲル線量計の開発」放射線化学 112 号 (2021) p.p.53-60
- (2) 林慎一郎 「三次元ゲル線量計」放射線科学会誌第 100 号(2015) pp.83-85
- (3) 砂川, HARVEL, 青木 「PVA-KI ゲル線量計への X 線照射における *in-situ* 測定装置の開発」福井工業大学研究紀要, (2021) p.p. 50-55.
- (4) 砂川, HARVEL, 青木, 久米 「PVA-KI ゲル線量計への He イオン照射における *in-situ* 測定装置の開発」福井工業大学研究紀要, (2022) p.p. 34-39
- (5) アイソトープ手帳 11 版 日本アイソトープ協会 (2011)

(2023年8月3日受理)