事 特 集 記

蛍光ゲル線量計の新展開

The gel dosimeters are expected to be a useful quality assurance tool for radiotherapy because of their unique advantages in which they are the only tissue equivalent phantoms that can perform three-dimensional dose measurement. On the other hand, one issue is to improve the sensitivity of the gel dosimeter. Recently, we successfully applied the most highly sensitive aqueous fluorescent chemical dosimeters to gel dosimetry. It is named nanoclay-based radio-fuorogenic gel (NC-RFG) dosimeters prepared from by incorporating a few wt clay nanoparticles into aqueous fluorescent chemical dosimeters. This paper reviews our recent works related to the development of NC-RFG.

Keywords: radio-fluorogenic, nanoclay, fluorescence probe, irradiation, dosimetry, gel dosimeter

1 はじめに

放射線利用技術の高度化において,線量計開発は放 射線化学研究分野においても重要なテーマの一つであ る.放射線誘起の化学反応を線量計に利用する際,そ の調製や分析が容易であることに加えて,下記,特性 が必要となる.

- 1. 照射前後の反応生成物の濃度が通常の使用環境 下で、安定であること.
- 2. 吸収線量に応じて放射線誘起の反応生成物の濃 度が線形的に変化し,線質(線量率,放射線の エネルギー)や温度に非依存であること.
- 3. 測定線量レンジに応じた生成物濃度の範囲にお

Novel trends and recent progress of radio-fluorogenic gel dosimeter

Takuya MAEYAMA (Kitasato University),

〒252-0373 神奈川県相模原市南区北里 1-15-1 TEL: 042-778-8159, FAX: 042-778-8159, E-mail: maeyama@kitasato-u.ac.jp 北里大学理学部化学科 前山 拓哉

いて迅速かつ精度よく定量できること.

また、生体への放射線影響を議論する場合には生体 に近い組成から線量計が構成されている必要がある. 上述の条件を満たしつつ,数 Gy またはそれ以下の線 量を評価したい場合は、より低濃度での生成物の定量 が必要になる.なぜなら、放射線誘起反応の開始剤と なる,たとえば,水分解ラジカルの収率(G値と呼ばれ る)は0.1 µmol/Jのオーダーであり、10 Gy を照射した 場合のラジカルとの反応後の生成物濃度は1 µmol/dm³ のオーダーであるからである. さらに, 0.01 Gy では 1 nmol/dm³ オーダーと極微量の濃度となる. このた め、一般的な化学線量計では1つの水分解ラジカルか ら連鎖的に反応を進行させることによって, 生成物の G値を増加させている。たとえば、フリッケゲル線量 計のG値は水溶液フリッケ線量計の6倍のG(Fe³⁺)= 9.74 µmol/J^{1,2)},ポリマーゲル線量計の重合反応G値 は 10³ µmol/J³)(水分解ラジカル総量の約 10³ 倍)にも なる. ただし, 過剰な連鎖反応の進行には完了までに 数時間程度を要することになり,反応進行中に別の放 射線の影響を受け、感度特性が線量率の影響を受ける ようになる. そこで,連鎖反応を利用しないで,低線 量域を測定可能とする化学線量計として、1958年に蛍 光プローブを用いた化学線量計が提案された4,5). 蛍 光測定法では、一般に1µmol/dm3の定量が限界である 分光光度計に対して、10³ 倍の 1 nmol/dm³ での生成物 の定量が可能となる.代表的なものとしてクマリン水 溶液線量計がある(Fig.1).非蛍光物質であるクマリ ンは、放射線照射により生じる水分解ラジカル (•OH) との反応によって、強い蛍光物質である 7-ヒドロキ



Figure 1. Coumarin fluorescent probe.

放射線化学 第113号(2022)

シクマリンとなる. 蛍光物質の濃度は吸収線量に応じ て増加するため, 蛍光強度と吸収線量は高い直線性を 示す. 蛍光強度の増加量を蛍光分光光度計により評価 し,吸収線量へ換算する.

このような蛍光プローブは生化学分野において広 く利用されており、たとえば文献⁶⁾を参照していた だきたい.その他の蛍光現象を用いた一般的な線量 計としてシンチレーター、TLD (thermo-luminescent dosimeter),OSL (optically stimulated luminescence), RPL (radio-photo luminescence)等が挙げられるが、蛍 光水溶液線量計は主成分である水の放射線分解反応を 利用しており、計量機序は大きく異なる.また、紫外 線励起光で何回も読み取れる点は固体線量計の RPL と類似しているものの、アニーリング処理等による線 量計の再利用はできない.

このような蛍光水溶液線量計に対して、少量のゲ ル化剤によりゲル化させ、3次元的な線量分布評価を 目指したものとして蛍光ゲル線量計 "radio-fluorogenic gel dosimeter"がある。蛍光ゲル線量計の初めての報 告は,放射線化学研究で著名なデルフト工科大学のJ. Warman らによる 2011 年の報告である^{7,8)}. ここでは, 重合性モノマー(tertiary-butyl acrylate 等)と非蛍光物 質の N-(1-pyrenyl)maleimide の重合反応による蛍光物 質生成反応を利用しており、

有機溶媒から作られるゲ ルで水が含まれていないものの,線量に対応する2次 元蛍光画像を報告している。2019年には、線量率に依 存した特性に難点があるが9,3次元測定可能な装置 開発まで報告している¹⁰⁾.また、水を主成分とした蛍 光ゲル線量計としては、2016年に P. Sandwall らがク マリン水溶液線量計をゼラチンにより固化したゲル線 量計を報告している¹¹⁾. ただし, 測定に数 100 Gy も の大線量が必要とされ、水溶液線量計が示すような高 感度な特性を得ることができていない.

このように、蛍光ゲル線量計の研究は比較的、最近に 報告されたものであるが、あまり研究が進んでいない. これに対して、我々は、2018年に新規に無機ゲル化 剤であるナノサイズのクレイを用いた蛍光ゲル線量計 の開発を進め、水溶液線量計と同程度の感度を保った ナノクレイ添加蛍光ゲル線量計 (nanoclay-based radiofluorogenic gel, NC-RFG)の開発に成功した¹²⁻¹⁶⁾. 用 いたナノサイズのクレイは直径 25 nm 厚み 1 nm の円 盤状のクレイ粒子 (合成ヘクトライト: Laponite XLG) である. 層状である無機微粒子は層間に初期に挿入さ れている Na⁺ イオンが水和することによって水溶液中 で安定的に分散し、カードハウス構造の形成によりチ キソトロピックなゲルとなる. 従来のゲル線量計に用 いられているゼラチンなどの有機ゲル化剤と比べて, 水分解ラジカルとの低い反応性ならびに,優れた透明 性を特長としている.また,ゼラチンは温度に依存す る物理架橋ゲルであるが,クレイゲルは温度によらず, 振とうにより粘度が変化するゲルであり,調製時の加 温を必要としない.他のゲル線量計へのナノクレイの 適用についてはこれまでの著者らの報告^{17–20)}をご参 照いただきたい.本記事ではこのナノクレイ添加蛍光 ゲル線量計 NC-RFG の開発について得られている結 果を紹介する.

2 NC-RFG の開発

2.1 多様な蛍光プローブへの応用

NC-RFG ゲル線量計の開発にあたって,まず初めに 水溶液線量計として報告されている蛍光プローブをク レイゲルに加え,網羅的に特性を調査した¹⁵⁾.用いた 蛍光プローブは安息香酸 (BA),テレフタル酸 (TPA), トリメシン酸 (TMA),ピロメリット酸 (PMA),クマ リン-3-カルボン酸 (CCA)等の芳香族化合物であり, どの蛍光プローブも放射線照射によって非蛍光から蛍 光特性を示すようになる.クレイゲル中においても, Fig. 2(a)蛍光強度の増加量の線量応答特性で示すよう に,数 Gy の領域で線量増加にしたがった蛍光強度の 直線的な増加を観測することができ,線量計として機



Figure 2. Dose responses of change in fluorescence intensity of NC-RFGs under X-ray irradiation. Comparison of (a) several fuorescent probes and (b) several gelling conditions. (Reprinted from Ref. 15, Copyright (2018), with permission from Elsevier)

放射線化学

能することがわかった. そこで, CCA を用いて, ゲル 化剤の違いについて詳細に検討した。その具体的な方 法は, 文献¹⁵⁾ に記載されている. Figure 2(b) に結果の 一部を示すように、固化に必要な通常のゼラチンの濃 度 2.5 wt% を用いると 40 Gy 以上を照射しても蛍光強 度の増加を観測できなかった.これは、一般にゼラチ ンなどの有機ゲル化剤は•OH と高い反応性を示すた め、 蛍光プローブと •OH の反応を阻害し、 蛍光物質が 生成しなくなるためである. ゼラチン濃度を 0.01 wt% まで減らすことで、ある程度の線量応答性を確認する ことができたものの、水溶液の状態であった.これに 対して、クレイゲル化剤ではクレイ濃度にあまり依存 せず,感度良く優れた線形性を得ることができた。無 機ゲル化剤では•OHと低い反応性を有しており、蛍光 物質生成反応の阻害が起こりにくく、高感度な線量計 として機能する. この CCA を用いた蛍光ゲル線量計 は CCA 水溶液線量計とほぼ同じ感度を有しているこ ともわかっている.

2.2 2次元測定への試み

蛍光ゲル線量計の2次元以上の評価手法はこれまで 確立されていなかったが,生化学分野で用いられる市 販の電気泳動ゲル用の蛍光スキャナー(GELSCAN-3, iMeasure, Japan)を転用することによって容易に画像 化・定量化でき2次元の線量分布評価を行えることが わかった.一方,線量の空間情報を読み取る際には, ゲル線量計への放射線照射後に生じる生成物の拡散の 影響について検討する必要がある.

そこで,前項で示した全ての蛍光プローブを用い画 像化を試みた.結果,クレイゲル中で経時的な生成物 の拡散を観測した.拡散定数の評価には,照射中とそ の直後からの時間を考慮した測定が必要になるが,照 射施設のすぐ近くにスキャナーを持っていき,おのお のの蛍光ゲルサンプルに対して繰り返しの測定を行 うことが困難なことからより詳細な検討ができなかっ た.そこで,生成物の拡散がない蛍光プローブの検討 を進めた.ここでは,ナノクレイゲルのもう一つの利



Figure 3. Dihydrorhodamine 123 fluorescent probe.

点を用いることで達成することを考えた. それは、ナ ノクレイゲルがクレイ層間に陽イオンを吸着し保持す ることができるという性質である。より詳細には、ク レイ層間に初期に挿入されている水和したナトリウ ムイオンとクレイゲル中に加えるカチオン性の放射 線感受性化合物との陽イオン交換反応により、化合物 が固定化または、吸着され、拡散が抑制される現象で ある²¹⁾.したがって、カチオン性の蛍光プローブを新 規に検討する必要があるが、文献を調べたところ、水 溶液線量計としての報告はなかった. ここでは, 拡散 が抑制された例として、生化学分野の研究を参考にし て、ジヒドロローダミン 123 (DHR123) を用いた結 果を示す. DHR123 (Fig. 3) は初期に無色, 非蛍光で あり, •OH による中心の水素引き抜き反応後に, π共 役系の伸長にいたり、450 nm に吸収ピークを示す強い 蛍光物質ローダミン 123 (RD123) となる。細胞内の H₂O₂の定量のための蛍光プローブとして広く用いら れている.

Figure 4 には, DHR123 100 µmol/dm³ に 2.5 wt% の ナノクレイゲルを加えた DHR123 蛍光ゲル線量計の拡



Figure 4. (a) Fluorescence image of DHR123 NC-RFG after irradiation of X-ray 3 Gy. (b) Normalized fluorescence intensity profile of irradiated gel for five different post–irradiation times. (Reprinted from Ref. 14, Copyright (2019), with permission from Elsevier)



Figure 5. Complex dose distribution planning (left) and fluorescence image of DHR123 NC-RFG (right). (Reproduced from Ref. 13, with permission from the Royal Society of Chemistry. Radiation therapy planning image courtesy of VarianMedical Systems, Inc. All rights reserved.)

散の影響を評価した結果を示す. Figure 4(a) は分光セ ルに封入した DHR123 蛍光ゲル線量計の照射後の2次 元画像を示している.ここでは,セルのキャップ上側 半分に X 線を照射している. Figure 4(b) には照射後か らの蛍光強度分布の経時変化を示している.この図か ら,73 日後もはっきりした照射領域の境界面を確認す ることができ,生成物の拡散を抑制できていることが わかる.

以上より,2次元スキャナーを用いた詳細な特性評価が可能となった.2次元画像における詳細な線量応 答特性等は文献を参照されたい¹⁴⁾.また,放射線治療 分野への応用例として,強度変調放射線治療(IMRT) からの複雑な治療計画を立案後に蛍光ゲル線量計に照 射し,蛍光ゲルスキャナーより読み取った画像をFig.5 に示す.

さらに,密封小線源治療への応用も行っている^{22,23)}. 詳細は,本誌別稿「三次元ゲル線量計による高線量率 小線源治療の線量分布測定(渡邊祐介著)」で解説さ れているので,そちらをご参照いただきたい.

2.3 DHR123 蛍光ゲルの高機能化

DHR123 蛍光ゲル線量計を用いた 2 次元的な線量分 布評価を進める上で,現段階では数 Gy 以下の線量評 価においては,ノイズの影響が大きく,蛍光強度分布 が不安定であることがわかった.そこで,蛍光ゲル線 量計の高機能化を検討した.まず,感度特性に影響す るパラメータについてまとめる.高感度な特性とは吸 収線量に対する蛍光強度の増加分 *I*_{FL}/dose が大きいこ とを意味する. この I_{FL} /dose は放射線化学収率 G, モ ル吸光係数 ϵ , 励起光強度 I_0 , 蛍光量子収率 ϕ , 密度 ρ , 露光時間 time を用いて下記関係式 (1) で表される.

$$I_{\rm FL}/{\rm dose} \propto \Phi \times G \times I_0 \times \epsilon \times \rho \times {\rm time}$$
 (1)

蛍光測定法が高感度である理由の一つでもあるが, 励起光と観測光の波長が異なるため,励起光強度 I₀や 露光時間 time を上げることで,容易に感度を上げるこ とができる.一方で,蛍光物質である生成物が放射線 照射以外の周辺環境に安定的である必要がある.次節 では,放射線化学収率や蛍光量子収率ならびに蛍光物 質の光安定性の向上を図ることによってさらなる高機 能化を進めた結果についてまとめる.

2.4 ハロゲンラジカルの添加効果

DHR123 と類似した反応系を有するロイコ色素 Leuco Malachite Green や Leuco Crystal Violet は放射 線照射により生じる •OH の水素引き抜き反応により 発色する.この反応を用いた色素ゲル線量計やフィル ム状の線量計が報告されており、また、ハロゲン化物 の添加により線量計の感度が増加することが知られて いる. そこで、蛍光ゲル線量計においてもハロゲン化 物の放射線増感作用を検討した。用いたハロゲン化物 はトリクロロ酢酸 (TCAA, p $K_a = 0.09$), トリブロモ酢 酸 (TBAA, p $K_a = 0.22$), 2,2,2-トリクロロエタノール (TCE, $pK_a = 12.7$) である²⁴⁾. クレイゲルは酸濃度増加 によって凝集し、白濁や離水するため、TCAAやTBAA は最大 5 mmol/dm³ まで,TCE は最大 50 mmol/dm³ ま で変化させた.結果は期待したように、蛍光ゲル線量 計の感度が増加し,無添加の系に対して最大で2倍 になった.また、 増感作用はハロゲン化物の種類によ らず 0.5 mmol/dm³-1 mmol/dm³の添加が最も感度が良 く、それ以上のハロゲン化物の添加は感度を下げる傾 向にあった¹³⁾. DHR123 を RD123 に酸化するのは主 に水分解ラジカルの • OH であるが, この • OH は酸化 力が強く、非選択的に DHR123 の任意の位置に付加反 応を引き起こす. これによって, DHR123 と•OH との 反応後の一部のみが RD123 となる²⁵⁾. これに対して, •OHとハロゲン化物が反応後のハロゲンラジカルは酸 化力の低下と共に,中心の水素引き抜き反応の選択性 が増加することによって放射線化学収率の増加にいた ると考えられた.

2.5 界面活性剤の添加効果

界面活性剤は水溶性の低いロイコ体の溶解剤として 色素ゲル線量計に用いられている.DHR123 も LCV



Figure 6. Problem of low detection limit.

ほどではないが溶解度が低く, 蛍光ゲル線量計にお ける界面活性剤の影響を調査した¹³⁾.用いた界面活性 剤はカチオン性の臭化ヘキサデシルトリメチルアン モニウム (CTAB), アニオン性のドデシル硫酸ナトリ ウム (SDS), 非イオン性の Triton X-100 (Tx100)の 3 種類である。CTAB においては臨界ミセル濃度以下 の 0.5 mmol/dm³ においてクレイゲルの白濁・離水が生 じたため、特性評価が困難であったが、SDS と Tx100 は 0.25 mmol/dm³ から数十 mmol/dm³ まで溶解可能で あった. 結果, Tx100 や SDS の添加により, 感度が 6 倍-10 倍も増加することが明らかになった. この感 度増加の寄与はハロゲン化物の添加による増感作用と 干渉せず、界面活性剤とハロゲン化物の両方の添加に よって,最大で16倍に増感することもわかった.そ こで、界面活性剤による感度増加効果の要因を調べる ために、濃度既知のRD123を用い相対蛍光量子収率を 測定した.結果,20倍-30倍もの相対量子収率の増加 を観測した、つまり、界面活性剤添加による感度の増 加は蛍光物質である RD123 の生成効率が増えるので はなく、同量の RD123 がより効率的に蛍光を発する ことによって、引き起こされていることがわかった. さらに調べていくと、RD123よりも過剰量に含まれる 未反応の DHR123 がクレイゲル中では RD123 の消光 剤として働いていていることもわかっており, 界面活 性剤は RD123 と DHR123 を分散することで消光現象 を抑制していることが示唆された.

2.6 光安定性の追加

高感度な線量計を開発するという観点からは,感度 の増加は好ましいが,放射線以外の作用による蛍光物 質の生成の影響を無視できなくなるという課題が出て きた (Fig. 6).特に,読み取り操作時に用いる励起光に 対する光安定性は水溶液線量計と比べて低い様子が確 認され,0.1 Gy オーダーでの測定においては,励起光 による擬反応の影響が無視できないことがわかった.



Figure 7. Effect of dispersant on light stability of DHR123 NC-RFG

そこで,我々は,光化学反応を抑制し,放射線に対 してのみ選択的に反応を進行させることを検討した. 文献を調べたところ,蛍光プローブの光安定性の問題 は細胞内のラジカルの定量においても問題となり,実 験条件を制限させていた²⁶⁾.また,これまでにゲル線 量計の光安定性に関する報告がなかったため,まずは 既存の組成条件を変更した際の光安定性を定量的に評 価することから進めた.

結果,界面活性剤が光安定性の向上に有効である ことが示唆された.そこで,界面活性剤特有の効果か 分散による効果なのかを判別するために,界面活性 剤以外の溶解剤の添加を検討した.用いた分散剤は ポリマーゲル線量計の可溶剤としても知られている *N*-Vinylpyrrolidone (NVP)や色素の定量の分野で用い られている分散剤ピリジン (Py)である.結果はFig.7 に示すように,スキャナーでの撮像による蛍光強度の 増加分が 0.29 Gy/number of scan であったものが,分 散剤の導入によって十分の一以下に抑えることできる とわかった¹²⁾. Gy/number of scan は1回のゲルの撮像 によって増加する蛍光強度がどれぐらいの線量に対応 するかを示した値である.

一般に,界面活性剤がミセル構造をとって分散効果 を示すのに対して,NVPやPyでは水素結合やπ-πス タック構造をとると考えられる.蛍光プローブの分散 の化学的構造の違いに関係なく,光に対する安定性を 付与することができていることは,つまり,DHR123 やRD123 が分散されていることが,光安定性におい て重要であることを意味している.また,これらの分 散剤は界面活性剤と同様に蛍光量子収率も増加させて いた.

消光現象には、フォルスターメカニズムとデクス ターメカニズムに分かれるが、DHR123の吸収波長と RD123の蛍光波長は大きくことなることから、二つの 化合物の距離が非常に近い場合に生じるデクスターメ カニズムにより、消光現象が起きていることが考えら れ、このエネルギー移動にともない、DHR123の光安 定性が悪化していると推測している.また、このよう な現象が水溶液中ではあまり観測されずクレイゲル中 で顕著におきていることからもクレイゲル特有の効果 であると考えている.

3 まとめ

本研究では新しい種類のゲル線量計として蛍光プ ローブを用いたゲル線量計を紹介し、これまでに得ら れている結果をまとめた.水を主成分とした材料中で の3次元線量分布が評価可能なゲル線量計は, 主に放 射線治療などで立案される3次元線量分布の品質保証 への応用が検討されているが、他の化学ゲル線量計と 比して蛍光ゲル線量計は低線量域の測定を得意として おり、また、高感度であるが故に、高分解能な測定に も適している。本稿では蛍光ゲル測定装置の詳細は記 載しなかったが、全て市販品を用いて評価した結果で ある、測定の簡便さは優れているが、今後の最適な励 起波長の励起光や波長カットフィルターを用いた蛍光 の観測、検出感度等を調整することで、さらなる高感 度な特性が得られると期待される。また、次なる課題 として,現在,我々は本蛍光ゲル線量計の重粒子線へ の適用を進めている。数 Gy オーダーでの重粒子線線 量分布測定が可能な様子が得られており、次の機会に 記載したいと考えている.

最後に、本稿をきっかけに調製や分析が容易な新規 蛍光ゲル線量計を用いた放射線治療分野やその他放射 線利用分野への応用研究が進むことを願っている。

〈謝 辞〉

本稿の執筆および本稿で解説した蛍光ゲル線量計の 開発を進めるにあたり多大なご協力をいただきました 理化学研究所の高梨宇宙氏,北里大学医療衛生学部の 渡邉祐介講師,水上慎也助教に深く感謝いたします. 本研究は2017年-2022年の間に行った研究結果の一 部であり,試行錯誤を繰り返しながら,多くの実験を 遂行していくにあたり,ご協力いただいた研究北里大 学理学部化学科の学生(長谷真之介,望月杏莉,佐藤 直樹,加藤 歩実,清水 大地,磯村 りお,吉田 和輝,田 中 雅浩,長谷川洋)ならびに,北里大学医療衛生学部 の学生・院生諸兄に深く感謝致します.また,本研究 の一部は,科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号 17K07013,21K12524)によって行われました.

〈参考文献〉

- L. E. Olsson, A. Appleby, J. Sommer, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A, Appl. Radiat. Isot., 42 (1991) 1081.
- 2) L. J. Schreiner, J. Phys.: Conf. Ser., 3 (2004) 9.
- M. Lepage, A.K. Whittaker, L. Rintoul, C. Baldock, J. Appl. Polym. Sci., 79 (2001) 1572.
- 4) W. A. Armstrong, D. W. Grant, Nature, 182 (1958) 747.
- R. W. Matthews, Int. J. Appl. Radiat. Isot., 33 (1982) 1159.
- A. Gomes, E. Fernandes, J. L. F. C. Lima, J. Biochem. Bioph. Methods, 65 (2005) 45.
- J. M. Warman, L. H. Luthjens, M. P. de Haas, Phys. Med. Biol., 56 (2011) 1487.
- J. M. Warman, M. P. de Haas, L. H. Luthjens, L. H. P. Murrer, Adv. Mater., 23 (2011) 4953.
- J. M. Warman, M. P. de Haas, L. H. Luthjens, T. Yao, J. Navarro-Campos, S. Yuksel, J. Aarts, S. Thiele, J. Houter, W. In Het Zandt, Polymers, 11 (2019) 1729.
- T. Yao, 3D Radiation Dosimetry Using a Radio-Fluorogenic gel, Delft University of Technology, 2017 (Doctor Thesis).
- P. A. Sandwall, H. B. Spitz, H. R. Elson, M. A. S. Lamba, W. B. Connick, H. Fenichel, J. Radioanal. Nucl. Chem., 307 (2016) 2505.
- 12) T. Maeyama, K. Yoshida, Y. Watanabe, H. Inui, J. Photochem. Photobio. A, 418 (2021) 113423.
- A. Mochizuki, T. Maeyama, Y. Watanabe, S. Mizukami, RSC Advances, 10 (2020) 28798.
- 14) T. Maeyama, A. Kato, A. Mochizuki, N. Sato, Y. Watanabe, S. Mizukami, Sens. Actuators A Phys., 298 (2019) 111435.
- 15) T. Maeyama, S. Hase, Radiat. Phys. Chem., 151 (2018) 42.
- 16) T. Maeyama, A. Mochizuki, T. Takanashi, J. Phys.: Conf. Ser., 1305 (2019) 12045.
- 17) T. Maeyama, Radioisotopes, 68 (2019) 267.
- 18) T. Maeyama, Y. Ishida, Y. Kudo, K. Fukasaku, K.L.

Ishikawa, N. Fukunishi, Radiat. Phys. Chem., 146 (2018) 121.

- T. Maeyama, N. Fukunishi, K.L. Ishikawa, K. Fukasaku, S. Fukuda, J. Radiat. Res., 57 (2016) 318.
- 20) T. Maeyama, N. Fukunishi, K.L. Ishikawa, K. Fukasaku, S. Fukuda, J. Phys. Chem. B, 121 (2017) 4238.
- T. Maeyama, N. Fukunishi, K. L. Ishikawa, T. Furuta, K. Fukasaku, S. Takagi, S. Noda, R. Himeno, S. Fukuda, Radiat. Phys. Chem., 96 (2014) 92.
- 22) Y. Watanabe, T. Maeyama, A. Mochizuki, S. Mizukami, S. Hayashi, T. Terazaki, H. Muraishi, H. Takei, T. Gomi, T. Shimono, Phys. Med. Biol., 65 (2020) 175008.
- 23) K. Inoue, Y. Watanabe, T. Maeyama, S. Mizukami, S. Hayashi, T. Terazaki, H. Muraishi, T. Gomi, T. Shi-mono, J. Phys.: Conf. Ser., 2167 (2022) 012032.

- 24) Scifinder; http://www.cas.org/products/scifinder.
- 25) M. Wrona, K. Patel, P. Wardman, Free Radic. Biol. Med., 38 (2005) 262.
- 26) P. Djiadeu, D. Azzouz, M.A. Khan, L.P. Kotra, N. Sweezey, N. Palaniyar, Pharmacol. res. perspect., 5 (2017) e00303.

〈著者略歴〉

前山拓哉:2011年東京大学大学院博士課程修了・博士 (工学).2011年4月-2016年3月まで理化学研究所仁 科加速器研究センター加速器基盤研究部運転技術チー ムにてゲル線量計に関連した研究を進めた.2016年 4月より北里大学理学部化学科助教.研究テーマ:ゲ ル線量計の開発,重粒子線の線量評価・放射線分解反 応の評価.趣味:ヨットと音楽鑑賞.