

# 放射線化学

# 2024 No. 117

## RADIATION CHEMISTRY

### 日本放射線化学会

### JAPANESE SOCIETY OF RADIATION CHEMISTRY

<https://www.radiation-chemistry.org/>

#### 〈巻頭言〉

「私の居場所」

#### 〈とびっくす〉

放射線から簡便に発電する方法を開発  
環境に優しいソフトコンタクトレンズ

#### 〈放射線利用紹介〉

近畿大学原子炉 UTR-KINKI の紹介

#### 〈討論会の話題から〉

銀添加 Na-Al ホウ酸塩ガラスへの X 線照射による銀の価数変化及びクラスター形成  
正電荷ペプチド (PCP) を構成するヒスチジンがフリーラジカル消去と化学修復に及ぼす影響  
炭酸ラジカルをプローブとした新規線量計の開発 - 炭酸アパタイトの合成と線量応答性評価 -

#### 〈ニュース〉

第 67 回放射線化学討論会のお知らせ

#### 〈会員のページ〉

伊藤 泰男先生の思い出

追悼：伊藤 泰男先生

#### 〈本会記事〉

#### 〈賛助会員名簿〉







**Houshasenkagaku (Radiation Chemistry)**  
(117)1–37(2024)

---

Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry  
“Radiation Chemistry”  
No.117, April 2024

---

Preface

Where I am: Academic Society ..... Mitsumasa Taguchi ... 1

Topics

Development of simple electricity generation technology with radiation  
..... Kaname Tsutsumiuchi ... 3

Environmentally friendly soft contact lenses based on cellulose-derived gels  
..... Akihiro Hiroki ... 7

Applications

Introduction to Kindai University Reactor, UTR-KINKI ..... Genichiro Wakabayashi ... 13

Highlights of the 66<sup>th</sup> Annual Meeting

Valence change and cluster formation via X-ray irradiation in Ag-doped Na–Al borate glasses  
..... Hiroki Kawamoto ... 17

Effect of Histidine Consisting of Positively Charged Peptides (PCPs) on the Free Radical Scavenging  
and Chemical Repair  
..... Chaozhong Tian, Yui Obata, Shinichi Yamashita, Atsushi Kimura, Hao Yu and  
Mitsumasa Taguchi ... 23

Development of a new dosimeter by probing carbonate radicals –Synthesis of carbonate apatite and  
evaluation of dose response–  
..... Eri Yokozuka, Hajime Seito, Naotsugu Nagasawa, Toshitaka Oka and  
Yoshihiro Kitatsuji ... 25

News

Notice of the 67th Radiation Chemistry Symposium ..... JSRC Office ... 29

From Members

A memory of Dr. Yasuo Ito. .... Yosuke Katsumura ... 30

In memory of Professor Ito ..... Masanori Koshimizu ... 31

Announcements

List of Support Members

## 「私の居場所」

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所

田口 光正\*



2024年1月1日の能登半島大地震は非常に悲惨な出来事でした。地震が引き起こす被害は、その影響が広範囲かつ長期間に及び、多くの人々の生活に深刻な影響を与えています。被災地の方々への心からのお見舞いと、亡くなられた方々への哀悼の意を捧げたいと思います。これらの災害は、私たちにその予測不可能な自然現象と、人類社会の脆弱性、科学の非力さを感じさせます。

巻頭言を通じて、「私の居場所」、つまり学会活動が個々のメンバーにとってどれほど重要であるか、その意義や存在価値を再確認し、共有したいと考えます。ご存知のように、放射線化学は、放射線と物質との相互作用を研究する学問領域です。その役割は多岐にわたりますが、産業、診断、治療、生命、電子機器、エネルギー、環境材料などさまざまな分野の基礎および応用技術の向上に貢献し、私たちの社会や健康、環境の向上に寄与しています。得られた知識を共有し、他の研究者と刺激的な議論を交わす、協働の機会を得るのが学会の場であり、その存在意義は計り知れません。一方で、多忙な日常業務や研究活動、高齢化により、会員の皆様が学会活動に参加しにくくなっているようにも見えます。しかし、学会は私たちが専門知識を深め、異なる視点との交流を通じて成長し、尊敬する先生や仲間と議論し、新しいアイデアに触れ、共に研究の領域を広げるための場であり、まさに「私の居場所」です。一方で、持続的な学会活動を続けていくためには、現在の活動に満足せず、挑戦と変革が必要とも思います。現状の討論会や年に2回の理事会で十分に議論出来ているだろうか？学会誌は？まず、我々が抱え

る課題を直視し、その中で可能性と未来への一歩を見出すことが重要でしょう。学会活動に完成形はなく、常に進化し続ける必要があると認識しています。今を見直すチャンス。現在の状況を冷静に分析し、従来のやり方にとらわれない柔軟な発想で新たな行動を起こすことが重要です。学会のあり方や活動の形を見直すことで、新たなメンバーの参加、賛助会員の増加、参加意欲の向上、学会の進化が期待できます。

筆者は最近、手のひらサイズの基板に微細な流路が刻まれたマイクロ流体チップ内で細胞を培養し、その薬剤応答を評価可能なバイオデバイス、生体模倣システムに関するアライアンスを立ち上げました。放射線の引き起こす化学反応を利用してデバイスを創出し、医療、創薬、診断分野に貢献したいと考えており、同じ志を持つ、多数のアカデミアや企業の研究者、開発者と情報を交換し、熱い議論を交わすとともに、協働しています。これも「私の居場所」です。

繰り返しになりますが、学会とは「私の居場所」と感じています。日本放射線化学会も、皆様の熱意と積極的な参加があってこそ成り立つもので、皆様の意見や提案が学会をより良くしていく原動力となります。ぜひとも、ご自身の学会への期待や意義、価値を再確認し、それが日本放射線化学会をより良くしていく一助となることを期待しています。

Where I am: Academic Society  
Mitsumasa TAGUCHI\* (National Institutes for Quantum Science and Technology, Takasaki Institute for Advanced Quantum Science),  
〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233  
TEL: 027-335-8621, E-mail: taguchi.mitsumasa@qst.go.jp



## 放射線から簡便に発電する方法を開発

中部大学 応用生物学部応用生物化学科 堤内 要

We have developed a new electricity generation technology by radiolysis of water in the presence of iron oxide particles and filed for a patent. Most of spent nuclear fuel is stored without reusing due to the high cost required for reprocessing. Especially,  $\gamma$ -rays of the radioactive waste are harmful and difficult to shield, but they have enormous energy. Therefore, we focused to develop electricity generation technology from  $\gamma$ -rays. In a previous study,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles were used to promote hydrogen production from water with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays. We expected that iron oxide particles (IOPs) also contributed to  $\text{H}_2$  production; however, IOPs preferred reduction of  $\text{Fe}^{\text{III}}$  to  $\text{Fe}^{\text{II}}$  under high concentration of IOPs in water. We considered that the IOPs trapped some electrons produced from radiolysis of water. The  $\gamma$ -rays-irradiated IOPs were applied for electricity generation. We could confirm electromotive force (1 V) when the IOPs were attracted to an electrode side by magnet in the dispersion with two electrodes.

**Keywords:**  $\gamma$ -rays, iron oxide, radiolysis, electricity generation

## 1 はじめに

2024年1月20日0時20分、JAXA（宇宙航空研究開発機構）の小型月着陸実証機「SLIM」が月面への着陸をした。私はその様子をJAXAのホームページからライブ配信で視聴していた。全て順調そうに進行し無事着陸したように見えたが、その後JAXAが着陸成功を発表するまで2時間近くを要した。そこで判明した

のは“SLIM本体の太陽電池が発電できておらず、着陸時の姿勢が予定通りでなかった可能性がある。数時間はバッテリーを動かして、飛行ルートデータを優先的に地上で受信した。”という事実であった。プレスリリースによれば同日2時57分に地上からのコマンドにより探査機の電源をオフにしたとのことである<sup>1)</sup>。人工衛星の電源は太陽電池で安定的に供給されるものかと思いついていたが、確かに宇宙空間にも影はあるし、月面などでは今回のようなことも起こりうる。この事実を知った時、真っ先に脳裏に浮かんだのが『放射線からの発電』であった。この研究開発が順調に進めば、小型で長寿命の安定電源が確保でき、宇宙船に太陽電池設備を設けなくても、安定した電力を確保できる。人類の宇宙開発は飛躍的に進歩するに違いない。本稿では、我々が特許出願した『放射線を用いた発電方法及び発電システム』について紹介したい<sup>2)</sup>。

## 2 ガンマ線から発電することの意義

使用済み核燃料は再処理に高いコストがかかるため、ほとんどが再利用されず貯蔵されている。それらは核分裂が緩慢になり、水蒸気を生み出す熱源としては利用しにくい。核燃料としては“使用済み”であるが、遮蔽が困難なガンマ線を発することから、厳重な管理が必要となっている<sup>3)</sup>。ガンマ線は太陽光より5桁ほど高いエネルギーを持っており<sup>4)</sup>、このガンマ線から安全に効率よく電気エネルギーを取り出すことができれば、使用済み核燃料は危険な「負の遺産」から貴重なエネルギー源に生まれ変わるはずである。しかし、そのようなデバイスはこれまでほとんど報告されていなかったのはご存じの通りである。

## 3 放射線からのエネルギー生産を目指した経緯

筆者の専門は化学合成であり、酸化鉄ナノ粒子 (iron oxide nanoparticles, IONPs;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  として調製していますが、実際は組成式よりも3価の鉄が多く、8-9割を占めています) の表面にがん細胞を認識する抗体を結合させて、静脈注射により体内を循環する間に腫瘍

Development of simple electricity generation technology with radiation

Kaname Tsutsumiuchi (Department of Biological Chemistry, College of Bioscience and Biotechnology, Chubu University), 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200 TEL: 0568-51-6295, FAX: 0568-52-6594  
E-mail: tsutsu@isc.chubu.ac.jp

組織に集積する材料を開発している<sup>5)</sup>。IONPs は交流磁場や光といった外部エネルギーで発熱するため、熱に弱い性質をもつ腫瘍を縮退させることができる<sup>6)</sup>。それを『がん温熱療法』という。我々の目指す材料が開発できれば、これまで困難であった体の深部のがんも治療することができる。そんな私が本研究を開始することになったのは、本学に来日していたウクライナからの研究者 Y. Chernysh との出会いであった。彼女は廃水から微生物を利用してリン酸石膏を生成する研究をしていたが<sup>7)</sup>、ともに母国で原子力発電所における大きな事故を経験し、大きな苦しみを社会として抱えているという共通の話題を持っていた。何か貢献できることはないかと議論をしていたところ、放射性物質の除去に IONPs の磁気分離が利用できるかもしれないと考えるようになり、さらに調べると金属酸化物粒子存在下で水の放射線分解をすると水素の発生効率が向上するという先行研究にたどりついた<sup>8)</sup>。

水素ガスは燃料電池で電気エネルギーに変換できるため、ガンマ線のエネルギーを電気に変換できることになる。興味深いことに、2007 年の吉田らの報告では酸化アルミニウム微粒子を水に加えると水素ガスの生成が促進され、粒子径が小さいほどその効果は大きくなるとあった (3  $\mu\text{m}$  まで検討済)<sup>9)</sup>。その後、山田らによって酸化アルミニウムの結晶構造などについても検討され、結晶構造に依存した粒子から水への電子供給特性の違いや、粒子表面での OH ラジカルの吸着が水素生成に影響していると考えられた<sup>10)</sup>。

一方、筆者の研究室では、がん温熱療法の発熱素子として酸化鉄粒子 (IOPs) を調製しており、1 次粒子の粒子径は 5 nm 程度まで小さくできていた。アルミニウムと鉄の違いがあるが、水の放射線分解に対する挙動は同様であることを期待し、粒子径が小さくなったことによる効果を期待して実験に挑んだのである。

#### 4 予想外の結果から新発電システムの開発へ

筆者はこの研究分野は全くの素人であったため、思い切って勝村 庸介 東京大学名誉教授にご相談をした。すると、全くの門外漢にもかかわらず快く相談にのっていただき、大阪大学産業科学研究所 室屋 裕佐准教授をご紹介いただいた。両先生のご支援のおかげでガンマ線の照射実験を行うことができたことは、本当に幸運であった。早速 100 mg/mL の IONP 分散液というかなり濃い試料溶液を大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設に持参し、<sup>60</sup>Co の線源を用いて 60 分間の照射実験を行った。6.64 kGy の照射を

行った試料からヘッドスペースのガスを採取し、パルス放電イオン化 (PDD) 検出器を装備したガスクロマトグラフィーで水素ガスを定量したところ、驚いたことに全く生成が認められなかった。室屋先生と一緒に驚いたことを今でも鮮明に覚えている。『何か面白いことが起こったに違いない!』そう思って IONPs の分析を行ったところ、*o*-フェナントロリン比色定量法で 2 価の鉄が増え、3 価の鉄が減少していることを見出した。このことから我々は、ガンマ線によって水分子から弾き出された電子が IONPs に取り込まれたと推測した。直後に頭をよぎったのは磁石による IONPs の磁気分離である。IONPs は磁石で引き寄せることができるので、電子を受け取った IONPs を磁石近傍に局在化させることができる。『電子を受け取った IONPs と電子を失った水の間電極を挿入すれば電気が流れるのではないか』。素人発想ではあるが、この現象を利用して直接電気を取り出せば、水素を発生させて燃料電池で発電するより効率的に放射線のエネルギーを電気エネルギーに変換できるはずである。そこで我々はこの現象を詳しく調査するとともに、還元した IONPs から直接発電する検討も開始した。

#### 5 放射線照射にともなう酸化鉄の還元反応

本研究の最も注目すべき点は放射線の電離作用に伴って水分子から弾き出された電子が IONPs の鉄を 3 価から 2 価に還元した点にある。通常、水の放射線分解では初期の物理過程を経て、物理化学過程でヒドロキシラジカルと水素ラジカルが生成し、水素分子や過酸化水素、その他の活性酸素種となる<sup>11)</sup>。つまり、当初の予定では水素ガスの発生と酸化鉄のさらなる酸化が起こると予想されていた。しかし、酸化鉄の還元が起こったのである。我々は不思議に思い、酸化鉄の濃度を低くして実験をした。すると、水素が生成し、IONPs の鉄は 2 価が減り、3 価が増えた。酸化したのである。つまり、水の放射線分解における物理過程で飛び出した電子が水より先に IONPs と出会えば酸化鉄を還元し、水分子と出会えば水分子を還元し、水素ガスを生成するとともに活性酸素種を生成すると考えた。のちに判明したことであるが、たまたま我々が最初の実験で用いた濃度で実験していなければ、この現象には気づかなかつたと思われる。そういう意味では筆者は非常に幸運であった。

## 6 酸化鉄粒子を用いた発電システムの検討

『ガンマ線を照射した IONP 分散液から IONPs を磁力で局在化させ、電子を受け取った IONPs と電子を失った水それぞれに電極を挿入すれば電気が流れる』。そう思った筆者は放射線の照射とは別に発電の実験を試みた。しかし、我々の IONPs は粒子径が 70 nm 程度で分散性が極めて高いため、磁力で局在化させるのに時間がかかり、電極を差し込むと粒子が舞い上がってしまい、実験にならなかった。そこで我々はナノサイズではなく、ミクロンサイズの粒子（粒径  $0.5\ \mu\text{m}$ – $50\ \mu\text{m}$ ）を使うことにした。ナノ粒子ではないので IOPs である。このサイズの粒子はがん温熱療法の粒子調製で不用となる粒子であるため、これまででは廃棄していた画分である。ある程度の分散性を確保し、磁気分離も容易にできる粒子を実験に用いてみたところ、Fig. 1 のような極めて簡単なシステムで 1 V 程度の起電力を確認できるようになった。

## 7 新発電システムにおける活性種

この発電における電子の授受はどんな化学種によって行われているのか、この研究をさらに進めるためにはその点を明らかにしなければならない。陰極側は 2 価の酸化鉄であるが、陽極側が過酸化水素かラジカル種かが判明していなかった。そこで、IOPs 分散液に  $^{60}\text{Co}$  からの放射線を照射し、磁気分離をしてその水画分を分析した。凍結法やスピントラップ剤に 5,5-ジメチル-1-ピロリン-N-オキシド (DMPO) を用いて電子スピン共鳴 (ESR) スペクトルを測定したが、放射線照射後の IOP 分散液の水画分からはほとんどラジカルの存在を確認することはできなかった。一方、硫酸チタン比色法による過酸化水素の定量では IOPs の存在下で過酸化水素濃度が  $0.37\ \text{mmol/L}$  まで上昇しており、IOPs の有無で濃度が 20 倍も変化することが示唆された。ゆえに、陽極の主な活性種は過酸化水素であると考え、主要な発電機構を Fig. 2 のように考えた。これ

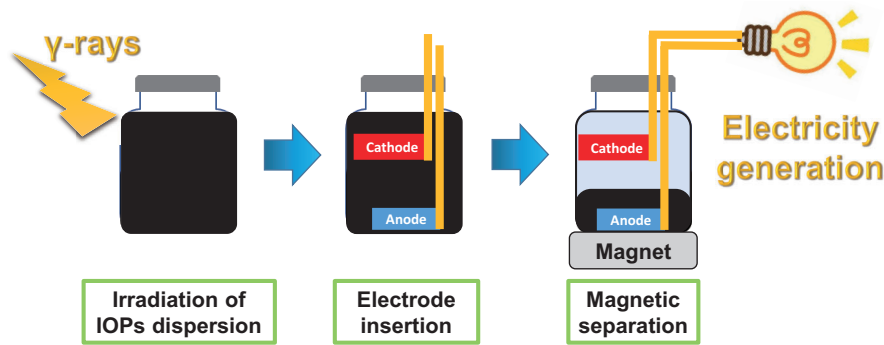


Figure 1. Schematic diagram of electricity generation with ionizing radiation.

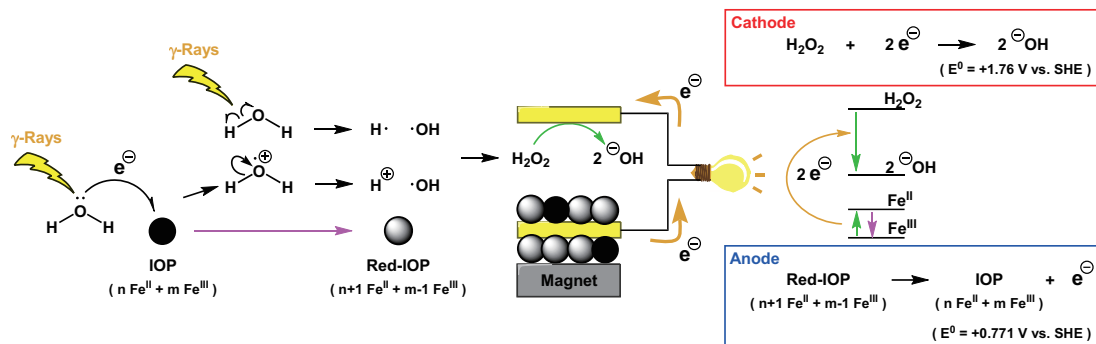


Figure 2. Major mechanism of electricity generation by radiolysis of water in the presence of IOPs.

らの反応を考えると、実験で観測された1Vの起電力も説明できる。

この発電システムの良いところは、原子力発電のように大掛かりな装置を必要とせず、臨界状態を維持管理する必要もない。さらに、水素ガスを発生させると副生成物として過酸化水素などが蓄積するので、水を交換する必要があるが、この発電システムでは放電に伴い酸化した水と還元した酸化鉄が元の状態に戻るため、そのまま再び放射線照射による充電（水の酸化と酸化鉄の還元）ができる。また、発電しなかった場合はIOPsと過酸化水素の間で直接反応して元の状態に戻ることができるので、エネルギー変換効率はそこまで高くないかもしれないが、過充電で制御不能になるような心配はないのではないかと考えている。まだ十分な基礎データが集まっていないが、新たな発電技術としての有用性が期待されたため、急ぎ特許申請をした次第である<sup>2)</sup>。

## 8 おわりに

人工知能(AI)や宇宙開発が進展し、未来の社会はますます面白くなりそうだが、それらには膨大なエネルギーが必要とされている<sup>12)</sup>。再生可能エネルギーの開発でそれらを賄うことができれば素晴らしいが、これまで十分に利用できていなかった放射線をうまくエネルギー源とすることができれば、人類は飛躍的な進歩を遂げると期待している。エネルギー問題が解決すれば、社会にゆとりができて、争いごとなくなるであろう。そんな輝かしい未来のために、少しでも貢献できれば幸いである。現在、学術論文としては未発表であるため、定性的な話がほとんどになってしまったが、ご容赦いただきたい。筆者の力では遅々として進まないため、できるだけ多くの方々と共同研究をさせていただき、本研究分野で日本が世界を主導できるようご指導をお願いする次第である。

## 〈謝 辞〉

本研究に際して多大なご協力をいただいた勝村庸介先生、室屋裕佐先生、大阪大学産業科学研究所の関係者の皆様、中部大学の橋本真一先生、研究室の学生の皆様に深く感謝致します。

## 〈参 考 文 献〉

- 1) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 小型月着陸実証機(SLIM)の月面着陸の結果・成果等について, プレスリリース(2024年1月25日). [https://www.jaxa.jp/press/2024/01/20240125-1\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2024/01/20240125-1_j.html)
- 2) K. Tsutsumiuchi, S. Hashimoto, M. Shimaoka, S. Ueno, Y. Muroya, Power generation method and power generation system, World Intellectual Property Organization, (2023) WO2023171524.
- 3) 日本原子力研究開発機構, 使用済み燃料の放射能と対策, 資料集. <https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material020108.pdf>
- 4) R. Virta, T. A. Bubba, M. Moring, S. Siltanen, T. Honkamaa, P. Dendooven, Sci Rep, 12 (2022) 12473.
- 5) K. Sasaki, Y. Miki, M. Mori, R. Imai, A. Kikuchi, E. Mishiro, N. Kawai, K. Tsutsumiuchi, Therm. Med. Suppl., 39 (2023) 110.
- 6) T. Nagai, N. Kawai, M. Gonda, K. Iida, T. Etani, D. Kobayashi, T. Naiki, A. Naiki-Ito, R. Ando, S. Yamaguchi, Y. Sugahara, S. Ueno, K. Tsutsumiuchi, T. Imae, T. Yasui, Pharmaceutics, 15 (2023) 626.
- 7) Y. Chernysh, M. Balintova, L. Plyatsuk, M. Holub, S. Demcak, Int. J. Environ. Res. Public Health, 15 (2018) 1269/1.
- 8) Y. Chernysh, I. Plyatsuk, S. Azarov, K. Tsutsumiuchi, I. Kotova, J. Eng. Sci., 7 (2020) H1.
- 9) T. Yoshida, T. Tanabe, N. Sugie, A. Chen, J. Radioanal. Nucl. Chem., 272 (2007) 471.
- 10) R. Yamada, Y. Kumagai, Int. J. Hydrogen Energy, 37 (2012) 13272.
- 11) Y. Muroya, Radioisotopes, 66 (2017) 425.
- 12) M. Koot, F. Wijnhoven, Appl. Energy, 291 (2021) 116798.

## 〈著 者 略 歴〉

堤内要: 1997年3月名古屋大学大学院農学研究科博士後期課程修了(博士(農学)), 1997年4月名古屋大学日本学術振興会特別研究員PD, 2000年4月豊田工業大学博士研究員, 2001年4月中部大学応用生物学部講師, 2004年10月中部大学応用生物学部助教授, 2007年4月-9月スウェーデン王立工科大学客員研究員, 2016年4月中部大学応用生物学部教授, 現在にいたる。

## 環境に優しいソフトコンタクトレンズ

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 廣木 章博\*

Recently, an environmental pollution caused by disposable soft contact lenses has been worried. To reduce the environmental burden, biodegradable soft contact lens materials are required. In this study, cellulose derivative-based gels were prepared through cross-linking and polymerization reactions occurred by electron beam irradiation. We obtained the gels that has the transparency, oxygen permeability, mechanical properties, protein adsorption, and biodegradability required for soft contact lens materials by optimizing the irradiation dose, the type of monomers and so on. The developed gels are expected to be used as a soft contact lens material that is friendly to people and the environment.

## 1 環境問題とソフトコンタクトレンズ

我々の身の回りにはプラスチック製品があふれている。プラスチックは、加工しやすく軽くて丈夫、そして安価であるため、我々の生活に広まり、今ではなくてはならないものになっている。しかし、丈夫であるが故に、自然界で簡単には分解されないため、海洋プラスチックゴミ汚染や海洋生態系破壊など地球規模の環境問題を引き起こしている。近年は、持続可能な社会の実現に向けた環境問題に対する意識の高まりにより、使い捨てプラスチック製品、たとえば、レジ袋やストローなどは、廃止あるいは環境に配慮した素材への代替が急速に進展してきている。

日々の生活で使い捨てにしている「身近な」プラスチック製品として、ソフトコンタクトレンズ (SCL)

がある。最近、この SCL が、海洋汚染の要因となっている可能性があることが、アメリカのアリゾナ州立大学の研究チームにより報告された<sup>1)</sup>。報告によれば、アメリカ国内の SCL 利用者 (約 4500 万人) の 5 人に 1 人が、使い終わった SCL をトイレや流しに捨てており、下水処理施設に流れ込んだ年間数十億枚 (少なくとも年間 20 トン) もの SCL が分解されずに下水処理後の汚泥に含まれていると試算している。下水処理施設から排出された汚泥は、農地の土壌に使用されたり、沿岸水域に処分されたりするため、その後 SCL は流出して、海洋マイクロプラスチック汚染の一因となる。このような状況は、決してアメリカに限ったことではない。日本コンタクトレンズ協会の調べによれば、日本国内でも約 5 人に 1 人が「いつもゴミ箱以外の場所 (自宅の洗面所や流しなど) に捨てている。」と報告している<sup>2)</sup>。

地球上で最も豊富な多糖類であるセルロースは、植物由来のため、生分解性があり、環境に優しい素材である。セルロース誘導体は、増粘剤などに利用されている。セルロース誘導体の濃厚水溶液 (ペースト状) に、電子線やガンマ線などの放射線を照射すると、分解より架橋反応が優位に進行し、高吸水性ゲルが得られる。これまでに、セルロース誘導体の高吸水性ゲルは、創傷被覆材やポリマーゲル線量計など、さまざまな用途に応用されてきた<sup>3,4)</sup>。筆者らは、セルロース誘導体ゲルのもつ吸水性と生分解性に着目し、環境中でも分解される SCL 用材料を提案した。開発では、さまざまな水溶性セルロース誘導体の中から、タンパク質の吸着しにくい非イオン性で、かつ透明なゲルが得られるヒドロキシプロピルセルロース (HPC) を主成分に選定した。さらに、メタクリル酸エステルモノマーを少量添加し、重合と架橋反応を同時に起こすことで、SCL に必要な機械的特性の向上を図った<sup>5,6)</sup>。本稿では、SCL に必要な諸特性 (透明性、酸素透過性、機械的特性、タンパク質吸着性)、そして生分解性を兼ね備えた環境に優しいソフトコンタクトレンズ用材料について、紹介する。

Environmentally friendly soft contact lenses based on cellulose-derived gels

Akihiro HIROKI\* (National Institutes for Quantum Science and Technology),

〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

TEL: 027-335-8684, E-mail: hiroki.akihiro@qst.go.jp

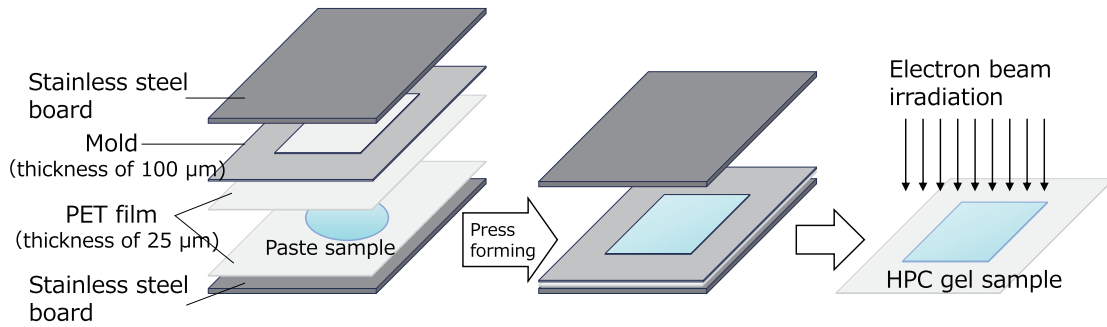


Figure 1. The scheme of the preparation of the HPC gel samples.

## 2 HPC ゲルの作製と特性評価

HPC とモノマー水溶液を混練りしてペースト状にしたサンプルを厚さ 25  $\mu\text{m}$  の PET フィルムで挟み、厚さ 100  $\mu\text{m}$  の型枠・スペーサーを乗せたあと、ステンレス板で挟みプレスすることで、成膜した (Fig. 1). ここで、モノマーには、2-ヒドロキシエチルメタクリレート (HEMA)、メトキシエチルメタクリレート (MEMA)、メチルメタクリレート (MMA)、トリコサエチレングリコールジメタクリレート (23G) を用いた。次に、PET フィルムで挟んだ状態のシート状サンプルに、電子線 (2 MeV, 2 mA) を所定線量照射することで、ゲルを得た。

照射したサンプルを適当な大きさにカットした後、PET フィルムを剥がしてから、真空乾燥した。乾燥ゲルを水に浸漬して膨潤させ、未架橋の HPC やホモポリマーを除去したあと、再び真空乾燥した。水洗浄前後の乾燥ゲル重量からゲル分率を求めた。洗浄後の膨潤時と乾燥時のゲル重量から、膨潤度 (含水率) を算出した。

水で膨潤したゲルを幅 5 mm, 長さ 30 mm にカットした後、島津製作所製卓上型万能材料試験機 EZ-L200N を用いて引張試験を実施し、HPC ゲルの機械的特性を評価した。

酸素透過性の評価には、H 型ガラス器具と溶存酸素計などを用いて自作した簡易の酸素透過性評価装置を使用した (Fig. 2). H 型ガラス器具の中央に HPC ゲル膜をセットしたあと、両側の水を窒素バブリングし、溶存酸素を除去。ついで、左側：酸素バブリングを開始、右側：溶存酸素濃度をモニタリングすることで、HPC ゲルの酸素透過性を評価した。

タンパク質吸着性については、リゾチーム含有リン酸緩衝生理食塩水に HPC ゲルを所定時間浸漬し、吸

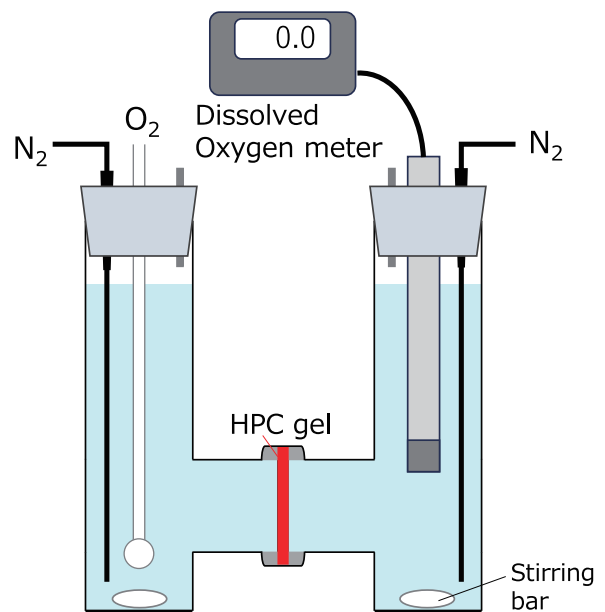


Figure 2. Evaluation apparatus for oxygen permeability of the HPC gels.

光度測定@280 nm から、リゾチームの吸着量を算出した。

生分解性については、HPC ゲルをセルロース分解酵素 (Aspergillus niger) を含む酢酸-酢酸ナトリウム緩衝液 (pH5.0) に浸漬し、37  $^{\circ}\text{C}$  で所定時間酵素分解させ、ゲルの重量減少から評価した。

## 3 HPC ゲルの諸物性

HPC/(HEMA, MEMA, or MMA)/23G (それぞれ 20 wt%, 2 wt%, 0.2 wt%) の濃厚水溶液に電子線照射して作製した HPC ゲルのゲル分率と膨潤度を Fig. 3

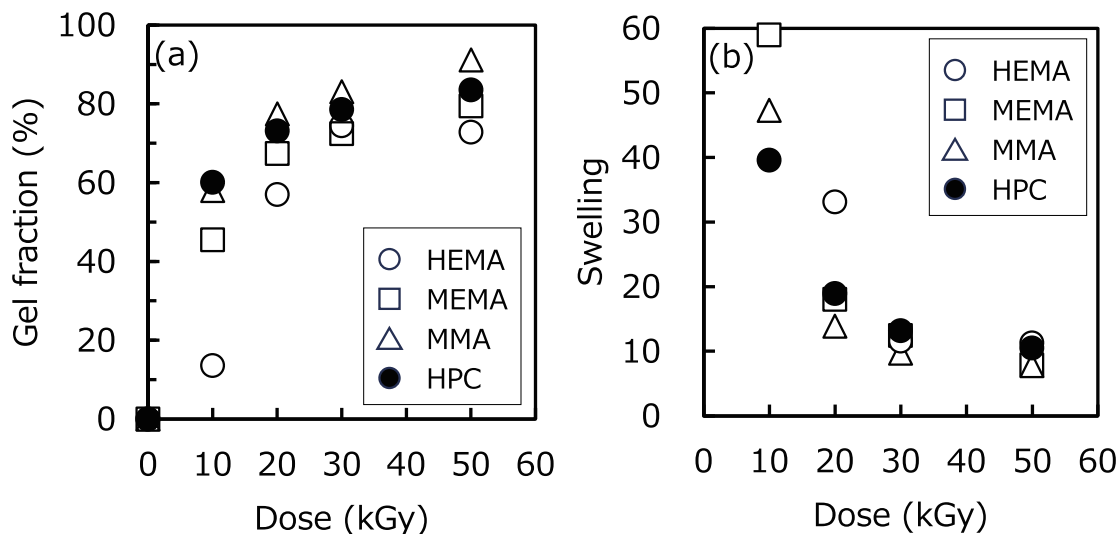
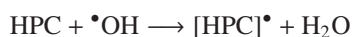


Figure 3. (a) Gel fraction and (b) Swelling of hydroxypropyl cellulose (HPC) gels with methacrylate monomers (HEMA, MEMA, MMA) as a function of the dose. Reprinted from Ref. 6, Copyright (2023), with permission from Elsevier.

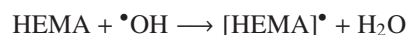
に示す。ゲル分率は線量増加とともに増加し、50 kGyで最大95%に達した。一方、膨潤度は、線量増加とともに減少し、約10を示した。これは、線量の増加とともに架橋反応が進行し、形成したゲルの網目構造が緻密になっていることを示している。モノマー存在下で作製したHPCゲルは、モノマー未添加のHPCゲル（ゲル分率83%、膨潤度10）よりも高いゲル分率と低い膨潤度を示した。また、水洗浄・乾燥後のゲルのFT-IR測定の結果、モノマー存在下で作製したHPCゲルでは、約 $1730\text{ cm}^{-1}$ 付近にモノマーのエステル基（ $\text{C}=\text{O}$ 伸縮振動）に由来するピークが現れた。これは、ゲル中にメタクリル酸エステルの重合体が存在していることを示している。また、得られたHPCゲルは、モノマー未添加のゲルと同様にいずれも透明で、可視光領域で96%以上の高い透過率を示した。

ここで、モノマー存在下でのHPCゲル形成メカニズムを改めて整理する。HPC水溶液に対するパルスラジオリシス実験から、水の放射線分解により生成したOHラジカルと $\text{H}_2\text{O}^{\bullet+}$ がHPCの三級炭素から水素原子を引き抜き、ヒドロキシプロピル基上にラジカルを生成することが示されている<sup>7)</sup>。この生成したラジカルが互いに結合することで、架橋構造が形成される<sup>8)</sup>。

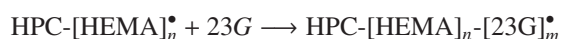


OHラジカルは、HEMAなどのモノマーとも反応し

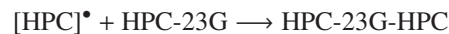
て、ラジカルを生成、そして重合反応により、HEMAのポリマーを生成する。



HPCラジカルは、HEMAなどのモノマーとも反応、重合反応が起こり、HEMAのグラフトポリマーを生成する。HEMAと23Gの共存下では、共重合反応が起こる。



生成したラジカルが、23Gのもう一方の末端ビニル基と反応することで、架橋構造が形成される。



上記のラジカル重合は、ラジカル同士の再結合や不均化反応、あるいは反応系中に存在する酸素との反応によって停止する。したがって、上記の反応機構により、HPCとメタクリル酸エステルモノマーからなるペースト状サンプル中では、放射線照射により発生したOHラジカルがHPCやモノマーを攻撃し、ポリマー鎖やモノマー上にラジカルを生成、続いて、ポリマー鎖と重合したモノマーが架橋することで、三次元相互侵入網目構造のゲルが生成される。

SCL を目に装着する際、指先でつまみ上げたりすることから、SCL には、適度な機械的特性が求められる。我々は、ゲルの引張試験を行い、破断強度や伸長率などの機械的特性を評価した。破断強度は、線量の増加とともに増加した。一方、伸長率は、線量の増加とともに低下した。これは、線量の増加に伴うヒドロゲルの架橋密度の増加によるものと考えられる。50 kGy 照射により作製したさまざまなゲルの破断強度を Fig. 4 に示す。モノマー未添加の HPC ゲルは、破断強度 0.1 MPa、伸長率 70 % と低く、破けやすかった。しかし、モノマーを添加して作製した HPC ゲルは、破断強度が増加し破れにくくなった。中でも、ハードコンタクトレンズの素材にも使用されている MMA の存在下で作製したゲルは、破断強度 0.23 MPa、伸長率 80 % と最もバランス良く高い値を示した。このように、HPC の網目構造内にモノマー由来の網目構造が形成され、さらに部分的に HPC と生成したポリマーが化学結合することにより、HPC ゲルの機械的特性を向上することができた。

SCL を装着しているときも、目の角膜が酸欠状態にならないよう、常に酸素を供給する必要があるため、SCL には、酸素透過性が求められる。50 kGy 照射により作製した高強度 HPC ゲルの酸素拡散速度は、HEMA 含有 HPC ゲルで  $4.0 \times 10^{-2}$ 、MMA 含有 HPC ゲルで

$5.2 \times 10^{-2} \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$  であった。各 HPC ゲルは、含水率がそれぞれ 92 %、89 % であり、ほぼ水で構成されているため、水中の酸素分子の移動速度に近く、角膜に十分な酸素供給が可能となる。

涙液の中に多く含まれているタンパク質のリゾチームが、ソフトコンタクトレンズ表面や内部に吸着すると、有害で不快感を引き起こす<sup>9)</sup>。このため、タンパク質の吸着性は、上記の特性に加えて、SCL としての使用に影響を与えるゲルの重要な特性である。モノマー存在下で作製した HPC ゲルに対するリゾチームの吸着量を調べた結果、ゲルに吸着したリゾチームの量は、6 日目で約  $55 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった (Fig. 5)。メタクリル酸を含むイオン性や N-ビニルピロリドンを含む非イオン性のポリ HEMA ベースのソフトコンタクトレンズ材料では、吸着量はそれぞれ 125,  $77 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  と報告されている<sup>9,10)</sup>。したがって、HPC ゲルは、非イオン性の高含水 SCL 材料と同等のリゾチーム吸着性を示すことがわかった。

セルロースとその誘導体は、セルラーゼにより分解される。セルロース誘導体の分解速度は、置換度や置換基のサイズ、セルラーゼの種類や濃度などの影響を受けることが知られている<sup>11,12)</sup>。作製した高強度の

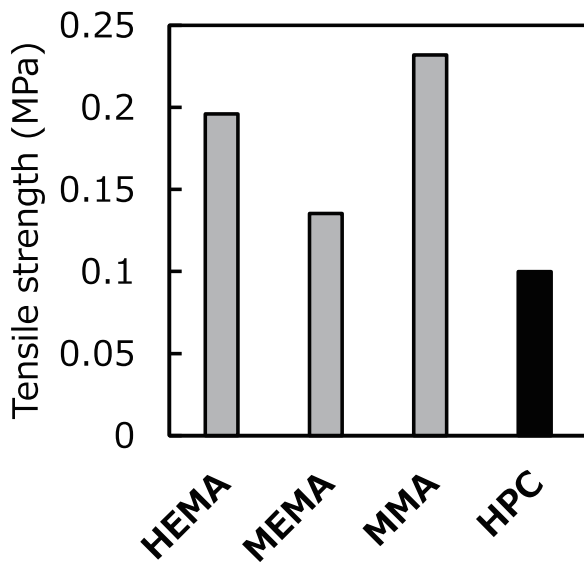


Figure 4. Tensile strength of the HPC gels with methacrylate monomers (HEMA, MEMA, MMA). Reprinted from Ref. 6, Copyright (2023), with permission from Elsevier.

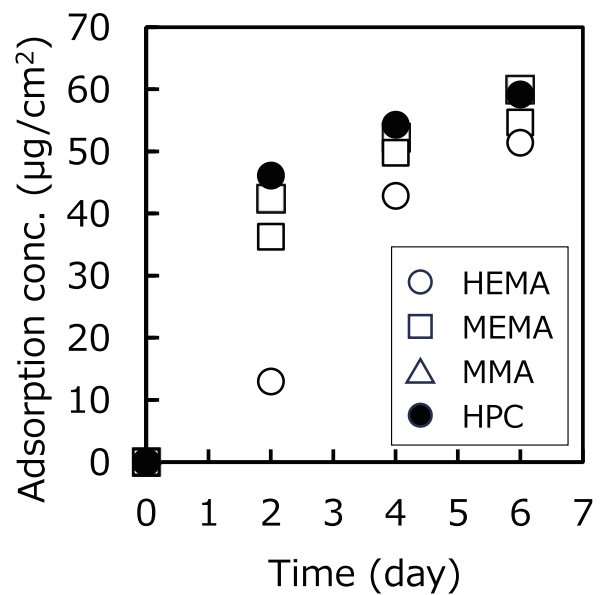


Figure 5. Time dependence of the concentration of protein adsorbed on the HPC gels with methacrylate monomers (HEMA, MEMA, MMA). Reprinted from Ref. 6, Copyright (2023), with permission from Elsevier.

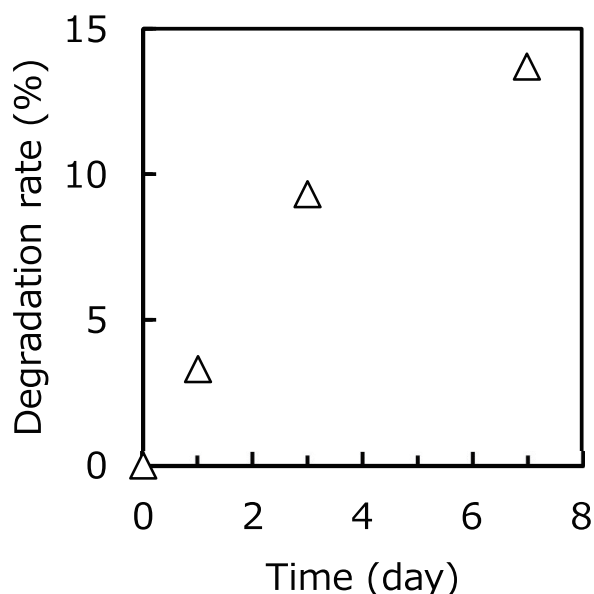


Figure 6. Time dependence of the biodegradability of the HPC gels with MMA. Reprinted from Ref. 6, Copyright (2023), with permission from Elsevier.

MMA 含有 HPC ゲルの分解率は、酵素処理時間とともに増加し、7 日後には、約 14% に達した (Fig. 6)。また、線量を変えて作製した MMA 含有 HPC ゲルの分解速度は、低線量ほど速く、10 kGy のゲルの分解率は 3 日間で約 57% であった。これは、HPC と生成したポリマー間の反応や絡み合いが少なく、三次元網目構造の主骨格である HPC が分解しやすかったためと考えられる。そして線量が増加するほど、ゲル分率が増加し HPC と生成ポリマーの絡み合いが強くなったことで、分解速度は低下したと考えられる。50 kGy 照射で作製した HPC ゲルの分解率は、72 時間で約 5% であることが、Wach らにより報告されている<sup>13)</sup>。今回作製したモノマー含有 HPC ゲルもモノマーを含まない HPC ゲルと同等の生分解性を示し、HPC と生成したポリマーからなる三次元網目構造でも、生分解性が保持されていることを明らかにした。したがって、MMA 含有 HPC ゲルで作製した SCL を環境中に廃棄すると、最終的には堆肥内の微生物分解によって二酸化炭素と水に変換されることが十分に期待される。

#### 4 まとめ

電子線照射により作製した HPC ゲルは、高含水性で SCL に必要な透明性、酸素透過性を示した。HPC と

生成したポリマーが化学的に結合または物理的に絡み合った構造を形成することで、単体の HPC ゲルに比べ、高い強度をもつゲルであることがわかった。涙液中の主要なタンパク質であるリゾチームの吸着性は、市販のポリ HEMA 系 SCL と同等であった。さらに、セルラーゼにより分解可能なセルロースを主成分に用いたため、作製した HPC ゲルは一般的な SCL に求められる特性のみならず、生分解性を兼ね備えていた。今回開発した生分解性を示す HPC を主成分としたゲルを用いることで、環境に優しい SCL の実用化が期待される。従来の合成高分子を基材とした SCL からの代替が進むことで、環境汚染の低減、持続可能な開発目標の達成に貢献できるだろう。

#### 〈参考文献〉

- 1) C. Rolsky, V. P. Kelkar, R. U. Halden, *Environ. Sci. Technol.*, 54 (2020) 12102.
- 2) 日本コンタクトレンズ協会ホームページ, <https://www.jcla.gr.jp/disposal/index.html>.
- 3) M. Wang, L. Xu, H. Hu, M. Zhai, J. Peng, Y. Nho, J. Li, G. Wei, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 265 (2007) 385.
- 4) A. Hiroki, S. Yamashita, A. Kimura, N. Nagasawa, M. Taguchi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 365 (2015) 583.
- 5) A. Hiroki, M. Taguchi, *Appl. Sci.*, 11 (2021) 9168.
- 6) A. Hiroki, A. Kimura, M. Taguchi, *Radiat. Phys. Chem.*, 213 (2023) 111257.
- 7) S. Yamashita, J. Ma, J. L. Marignier, A. Hiroki, M. Taguchi, M. Mostafavi, Y. Katsumura, *Radiat. Res.*, 186 (2016) 650.
- 8) R. A. Wach, G. Palmeri, A. Adamus-Wlodarczyk, B. Rokita, A. K. Olejnik, C. Dispenza, P. Ulanski, *Appl. Sci.*, 12 (2022) 11764.
- 9) Q. Garrett, R. W. Garrett, B. K. Milthorpe, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 40 (1999) 897.
- 10) N. B. Omali, L.N. Subbaraman, C. Coles-Brennan, Z. Fadli, L. W. Jones, *Optom. Vis. Sci.* 92 (2015) 750.
- 11) N. Pekel, F. Yoshii, T. Kume, O. Güvena, *Carbohydr. Polym.*, 55 (2004) 139.
- 12) E. T. Reese, *Ind. Eng. Chem.*, 49 (1957) 89.
- 13) R. A. Wach, H. Mitomo, F. Yoshii, T. Kume, *Macromol. Mater. Eng.*, 287 (2002) 285.

〈著 者 略 歴〉

廣木 章博：2001年群馬大学大学院博士後期課程修了，  
博士（工学）取得。同年米国ノートルダム大学放射線  
研究所博士研究員。2003年日本原子力研究所高崎研

究所博士研究員。2006年日本原子力研究開発機構に  
入社。2016年国立研究開発法人の移管統合にともな  
い量子科学技術研究開発機構に移籍，現在にいたる。  
専門：高分子材料，放射線化学。

## 近畿大学原子炉 UTR-KINKI の紹介

近畿大学原子力研究所

若林 源一郎\*

## 1 はじめに

近畿大学の東大阪キャンパスには、教育訓練用原子炉 UTR-KINKI がある。大学での原子力教育を目的として設計・製造された、定格熱出力わずか 1 W の米国製原子炉で、きわめて安全性が高いことが特長である。かつてわが国には 5 大学に 6 基の原子炉があり、教育訓練や学術研究に活用されていたが、現在では近畿大学の UTR-KINKI と京都大学の KUR (5 MW)、KUCA (100 W) が残るのみとなった。このうち KUR は 2026 年に運転を停止することが決まっているので、近い将来に大学原子炉は UTR-KINKI と KUCA だけになる予定である。

近畿大学の原子炉は、1961 年に運転を開始してから 60 年以上経った現在も教育・研究に大いに活用されている。福島第一原子力発電所の事故後に厳格化された規制の影響や施設の高経年化によって国内の研究炉の廃止が進み、日本に残された数少ない研究炉として教育や研究における役割が年々増している。今後でもできるだけ長く運転を続けて期待に答えていきたいと考えているが、課題も多いのが現状である。

本報告では、近畿大学原子炉の沿革、特性、教育及び研究利用の現状について紹介する。

## 2 原子炉の沿革

近畿大学原子炉は、もともと 1959 年に開催された第 3 回東京国際見本市に米国原子力委員会が出展した原子炉である。今では考えられないことであるが、見本市の目玉として東京の晴海ふ頭で教育訓練用原子炉 UTR が 18 日間運転された。当時は大きな話題となり、昭和天皇もご視察されたほどで、多くの人が見学

に訪れたそうである。「科学を実践に移すべし」を持論とし、原子力技術者の育成が急務と考えていた近畿大学初代総長・世耕弘一もこの原子炉を見て、近畿大学で原子力技術者を育成することを決心して購入を「即決」と伝えられている。

翌年 (1960 年) には UTR 設置に向けて近畿大学に原子力研究所が設立され、設置のための工事が始まった。当時は原水爆禁止運動が大いに盛り上がり、近隣住民だけでなく学内からも大きな反対運動があったそうだが、世耕が反対派を自ら説得して回り、様々な困難を乗り越えた末、ついに 1961 年 11 月 11 日 20 時 53 分、原子炉が初めての臨界に達し、日本初の民間原子炉・大学原子炉として運転を開始した。運転開始時の定格熱出力は 0.1 W であったが、1974 年に 1 W に増強された。

その後は大きなトラブルもなく半世紀以上にわたって順調に運転を続け、教育・研究に活用されていたが、2011 年に発生した福島第一原子力発電所の事故を受けて発足した原子力規制委員会により、2013 年に試験研究用原子炉に対する新規制基準が施行された。これにより、近畿大学原子炉も新規制基準に合格するまで運転できないことになり、2014 年から運転を停止して新規制基準への適合性審査を受けることになった。原子力発電所をベースとした厳しい審査への対応には約 3 年の歳月を要し、私立大学にとって大きな経済的負担となったが、学内外の支援を受けて何とか難局を乗り越え、2017 年に運転を再開することができた。

## 3 原子炉の特性

近畿大学原子炉は、米国アルゴンヌ国立研究所が開発したアルゴノート型原子炉を原型として、アメリカン・スタンダード社が大学における教育訓練用として製造した原子炉 UTR (University Teaching and Research reactor) のうちの 1 基である。

原子炉の特性を Table 1 に示す。熱出力が極めて小さいゼロ出力炉であり、運転中も原子炉内は常温・常圧に保たれるため、冷却する必要がなく、冷却機能を

Introduction to Kindai University Reactor, UTR-KINKI  
Genichiro WAKABAYASHI\* (Atomic Energy Research Institute,  
Kindai University),  
〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1  
TEL: 06-4307-3095, E-mail: genichiro@kindai.ac.jp

Table 1. The characteristics of UTR-KINKI.

定格熱出力	1 W
温度/圧力	室温/大気圧
最大積算運転時間	1200 時間/年
減速材	軽水
反射材	黒鉛
燃料材	ウラン・アルミニウム合金
原子炉燃料体数	12 体
炉心部寸法	約 142 cm × 112 cm × 145 cm
起動用中性子源	Pu-Be 中性子源
最大熱中性子束	$1.2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

持たない。そのため構造が非常にシンプルで、原子炉として最小限の構成要素（燃料、制御棒、減速材、反射材、遮蔽材、核計装など）から構成されており、原子炉の原理を学ぶための基礎的な実験に適している。また、1 W の熱出力で消費されるウラン燃料は 1 日あたり約 1  $\mu\text{g}$  とごくわずかなので、これまでに消費した燃料の積算量もまだ 1 mg 程度であり、燃料交換の必要がない。そのため、1961 年の運転開始時に装荷した燃料を現在も使い続けている。さらに、燃料体中に蓄積する核分裂生成物の量もごくわずかで、内蔵される放射能が極めて少ない上、漏洩放射線量も少なく、運転中でも原子炉の周辺で作業をすることができる。このように、近畿大学原子炉は極めて安全性が高く、保守点検が容易で、放射性廃棄物もほとんど発生しない、大学での教育・研究用として優れた特長を持つ原子炉である。

Figure 1 に近畿大学原子炉の外観を示す。原子炉の炉心部は生体遮蔽タンクと呼ばれるタンクの中央に設置されている。生体遮蔽タンクの大きさは直径約 4 m、高さ約 2 m で、その中には湿砂が満たされており、炉心部からの放射線の漏洩を防ぐ役割を果たしている。原子炉の運転時には、炉心部の上部をコンクリート製の遮蔽用上蓋で閉鎖して、上方への放射線を遮蔽する。また、通常の遮蔽用上蓋の代わりに、「炉心上部照射実験設備」を設置することも可能で、A 設備（小動物照射用）、B 設備（中性子ラジオグラフィ用）、C 設備（実験物挿入用）の 3 種類の設備の中から実験の目的に応じて選んで使うことができる。

Figure 2 に原子炉の炉心部の写真を示す。炉心は二分割炉心となっていて、二つの燃料タンクの間には黒鉛反射体の広い照射領域が設けられている。黒鉛反射体の中央には「中央ストリンガー孔」と呼ばれる照射孔があり、ここに試料や検出器を設置して照射実験を行う。また、黒鉛反射体内部のいくつかの部分でも試料照射や測定ができるような構造になっていて、例えば原子炉内の中性子束分布測定などの実習がしやすいよう、教育的な配慮が随所になされた構造になっている。制御棒は 4 本設置されていて、中性子吸収材にはカドミウムが用いられている。



Figure 1. The overall view of UTR-KINKI. © 近畿大学原子力研究所. All rights reserved.

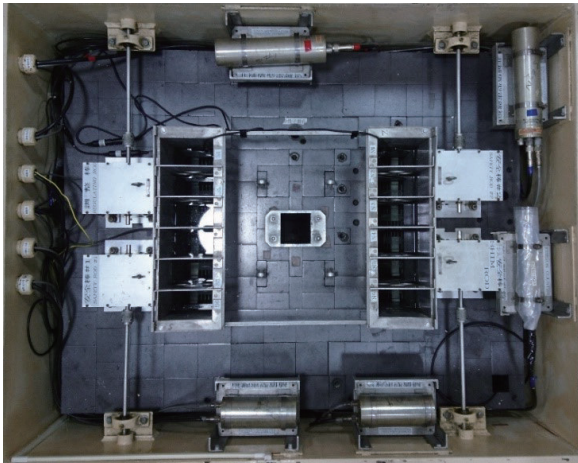


Figure 2. The reactor core of UTR-KINKI. © 近畿大学原子力研究所. All rights reserved.

#### 4 研究利用

近畿大学原子炉は、学内の教員・学生による利用だけでなく、設置当初から広く学外の研究者による利用も受け入れてきた。1981年からは、原子炉を利用した照射実験を推進することを目的として「近畿大学原子炉等利用共同研究」が始まり、全国の研究者が近畿大学原子炉を利用できる仕組みが整備された。この制度は現在も形を変えながら続けられていて、利用の申し込み資格は「国・公・私立大学、国・公立研究機関及び独立行政法人機関の教員・研究者またはこれに準ずる者」となっている。毎年研究課題の募集が行われていて（10月頃募集開始、12月頃募集締め切り）、近畿大学原子炉等利用共同研究運営委員会による審査を経て採択課題が決定される。採択された課題には申請内容に応じて原子炉のマシントimeが割り振られる。また、近畿大学原子力研究所が所有する各種放射線源、放射線測定器やX線照射装置などの設備も合わせて利用可能である（ご利用お待ちしております）。

Figure 3に最近10年間の採択課題数の推移を示す。研究課題は、物理系、化学系、生物系の三分野に分かれていて（2020年–2021年は教育系もあり四分野）、現在の採択課題数は年間15課題程度である。物理系の課題では、最近では中性子測定技術・検出器開発（シンチレーション検出器、半導体検出器、ファイバー検出器、熱蛍光線量計、ゲル線量計など）に関する課題が最も多く、原子炉物理実験や原子力・放射線教育のための教材開発に関する課題もある。化学系の課題は最

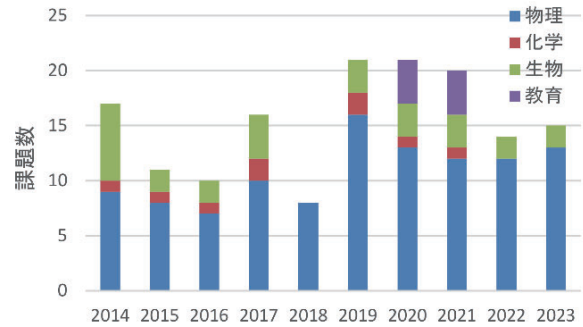


Figure 3. The number of approved research proposals to the program “Cooperative Researches at Kindai University Reactor” over the last 10 years.

近少なくなっているが、以前は原子炉を利用した放射化学分析が継続的に行われていた。生物系の課題では、常温・常圧環境下で中性子を照射できるユニークな照射場を利用して、植物の種子や動物の培養細胞、マウスの照射など、中性子線の生物影響の研究が行われている。

近畿大学原子力研究所のホームページに掲載されている「近畿大学原子炉等利用共同研究の手引き」<sup>1)</sup>には、照射場に関する詳しい情報、過去の実験例や採択課題、典型的な実験手順等が記載されている。近畿大学原子炉の研究利用にご関心をお持ちの方にはぜひご覧いただきたい。

#### 5 教育利用

原子力技術者・研究者の育成には原子炉を利用した実習が不可欠である。しかし、国内で教育に供される原子炉のほとんどが廃止または運転停止中となり、近畿大学原子炉は国内に残された貴重な教育訓練用原子炉として学内外の原子力専攻学生の教育に大いに活用されている。原子炉実習は、これまで近畿大学原子炉のほかに京都大学 KUCA でも大学院生向けの炉物理実習が行われていたが、現在 KUCA が運転停止中のため、近畿大学原子炉が国内でほぼ唯一の学生実習の場となっている。

近畿大学原子炉はきわめて安全性が高いので、学生が自ら原子炉を運転し、座学で得た原子力・放射線の知識を本物の原子炉施設で実践して理解を深めることができる。教育効果が高いことに加え、原子力や放射線の科学・技術の面白さを体験し、関心を高める効果

もある。最近では工学系の学生に加えて、医療系の学生も実習に参加するようになり、参加者の幅が広がっている。

近畿大学には残念ながら原子力専門の学科はないが、理工学部電気電子工学科、エネルギー物質学科の学生実験の項目の中に原子炉を使った実験項目が含まれていて、年間約 100 名の学生が利用している。学外からは、令和 5 年度には 12 大学・4 高専から 163 名の学生が実習に参加した。学外から参加する学生には、文部科学省の補助金（国際原子力人材育成イニシアティブ事業）によって旅費が支給されている。

実習の内容は、原子炉物理、放射線計測、放射線利用に関する基礎的な実験に加えて、専門的な原子炉物理実験も実習プログラムとして提供している。基本的には学生が自ら制御棒を操作して、原子炉の起動から臨界到達、出力変更、原子炉停止までの一連の運転操作を行い、その過程で制御棒価値の測定や放射化法による中性子束測定など、原子炉を利用した様々な実験を行うプログラムとなっている。

中等教育へのアウトリーチ活動も重要な教育活動として位置付けていて、主な活動として理科教員や中学生・高校生を対象とした原子炉実験研修会がある。原子炉の運転体験や簡単な放射線測定実験を通じて、原子力や放射線についての科学的な知識を習得してもらうことや、原子力や放射線の科学に対する次世代の興味・関心を喚起することを目的としている。年に数回開催しているが、毎回定員を大きく超える応募があり大変好評である。

最近では、世界的なエネルギーの脱炭素化の流れの

中で新たに原子力を導入する国が増えてきた。そのような流れの中で、国際原子力機関（IAEA）からの要請によって海外の若手技術者、研究者も受け入れて実習を行っている。

## 6 おわりに

近畿大学原子炉は、1961 年の運転開始以来、60 年以上にわたって日本の原子力教育・研究に活用されてきた。その間、新規制基準への対応のため、2014 年から 3 年間の運転停止期間があったが、様々な困難を乗り越えて 2017 年に運転を再開することができた。しかし、私立大学の実験施設として、経営上はわずかな利用料収入と宣伝効果があるのみで負担のほうははるかに大きく、コストとマンパワーの面で大変厳しい状況が今後も続くであろう。近畿大学の原子炉は、わが国の原子力教育・研究への使命感と初代総長が遺した原子炉に対する情熱によって支えられてきた。原子炉の研究利用・教育利用を継続している多くのユーザーからのご期待に応えるためにも、国内に残された貴重な原子力研究・教育資源としてできるだけ長くこの原子炉の運転を継続し、情熱をもって研究・教育に活用していきたい。

## 〈参考文献〉

- 1) 近畿大学原子炉等利用共同研究の手引き,  
<https://www.kindai.ac.jp/files/rd/research-center/aeri/guide/external-use/outside4.pdf>

## 第66回放射線化学討論会

# 銀添加 Na-Al ホウ酸塩ガラスへの X 線照射による 銀の価数変化及びクラスター形成

東北大学 川本 弘樹

### 1 緒言

放射線線量の積算値を蛍光強度として供する蛍光型線量計の動作原理には、熱蛍光 (TL), 光刺激蛍光 (OSL) およびラジオフォトルミネッセンス (RPL) が利用されている。TL および OSL は、放射線照射後の熱および光刺激によって生じる蛍光現象である。一方、RPL は放射線照射による新たな蛍光中心 (RPL 中心) の形成とそれに続く光励起による蛍光現象であり、TL-OSL と異なり、保存した線量の情報を何度でも繰り返し読み出し可能という特長を持つ。市販 RPL 線量計の素子には、銀添加リン酸塩ガラスが 1960 年代から現在にいたるまで利用されている。銀添加リン酸塩ガラスへの放射線照射により誘起される  $\text{Ag}^+$  の価数変化およびクラスター形成反応の生成物である  $\text{Ag}^0$ ,  $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  が RPL 中心に帰属されており<sup>1)</sup>、これらの RPL 中心は室温において極めて高い安定性を有しながら、400 °C での加熱により消去できる。この特徴ゆえに、銀添加リン酸塩ガラスを素子とする RPL 線量計は積算線量の長期間保存および初期化可能であり、個人被ばく線量計として広く普及している。1960 年代から銀添加リン酸塩ガラスが利用され続けていることは、当該材料の優れた特性を示す一方で、RPL 線量計の進歩が遅々としていることも示している。近年の原発事故を主たる契機として高まりつつある線量計測への需要に応えるために、RPL 線量計のさらなる高性能化を目指した新規 RPL 材料の開発が求められている。

銀添加リン酸塩ガラスにならうと、放射線などのエ

ネルギー付与により銀の価数変化およびクラスター形成反応が生じる材料は RPL 材料としての応用可能性があると考え、我々は新規 RPL 材料として、フェムト秒レーザーによる蛍光性銀クラスター形成が報じられている銀添加 Na-Al ホウ酸塩ガラス<sup>2)</sup>に着目した。当該ガラスは、500 °C での加熱により蛍光性銀クラスターを消去できるため、保存された情報の繰り返し読み取り・消去が出来る光学メモリーとして報告されている。それ故、当該ガラスを利用した RPL 線量計では、積算線量の繰り返し読み取りと消去が期待できる。本研究では、新規 RPL 材料開発を目指して、銀添加 Na-Al ホウ酸塩ガラスにおける RPL 特性、RPL 中心形成機構および再利用可能性を調査した。

### 2 実験

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  (99 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99.99 %),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (99.99 %) および  $\text{Ag}_2\text{O}$  (99.0 %) の粉末試薬を  $(100-x)(30\text{Na}_2\text{O}-5\text{Al}_2\text{O}_3-65\text{B}_2\text{O}_5)-x\text{Ag}_2\text{O}$  ( $x = 0, 1$ ) の組成比となるように秤量・混合した。混合粉末をアルミナボートに入れ、1100 °C の電気炉内で融解させた。得られた融液を 300 °C に加熱されたステンレス板上に流し、同温度のステンレス板で挟んだ後に室温まで徐冷することで、銀無添加 (BG) および銀添加 (BG:Ag) ホウ酸塩ガラス試料を得た。

得られたガラス試料に X 線を 1 Gy–1000 Gy 照射し、各線量における蛍光 (PL) スペクトル (励起波長: 320 nm および 360 nm) および電子スピン共鳴 (ESR) スペクトルを測定することで、BG:Ag における RPL 特性を評価した。また、BG:Ag において 1000 Gy の X 線照射直後からの PL および ESR スペクトルの経時変化を測定することで、RPL 中心形成機構の解析を行った。最後に、1000 Gy の X 線を照射した BG:Ag を 500 °C で 1 時間加熱した後に、再度 1000 Gy の X 線

Valence change and cluster formation via X-ray irradiation in Ag-doped Na-Al borate glasses  
Hiroki KAWAMOTO (Tohoku University),  
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-07  
TEL: 022-795-7219, E-mail: hiroki.kawamoto.c7@tohoku.ac.jp

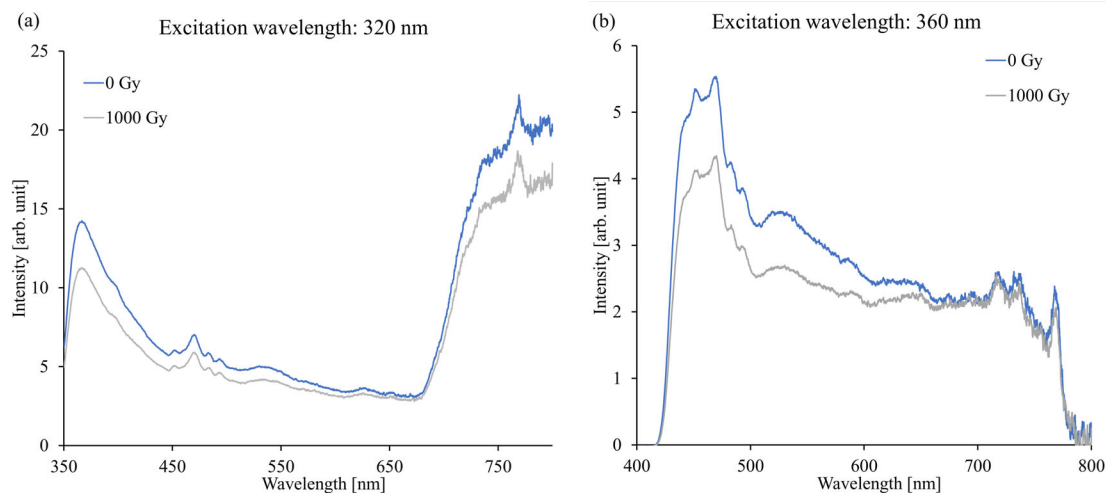


Figure 1. PL spectra with the excitation wavelength of (a) 320 and (b) 360 nm in BG.

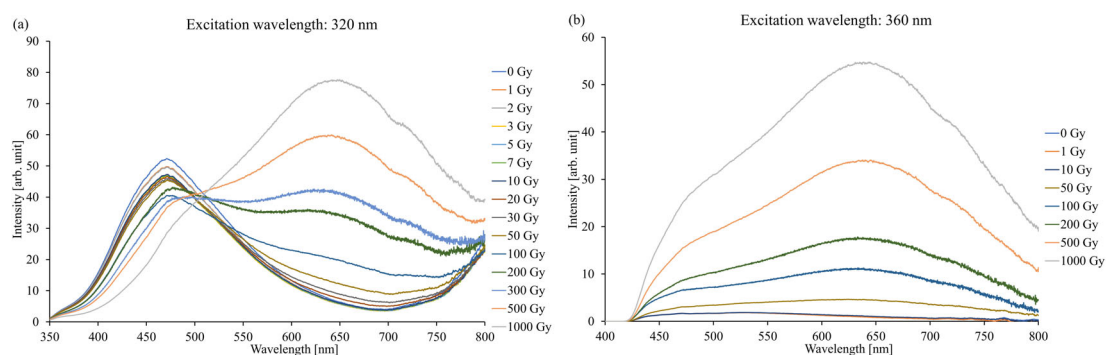


Figure 2. PL spectra with the excitation wavelength of (a) 320 and (b) 360 nm in BG:Ag.

を照射する操作を2回繰り返す、X線照射および加熱前後におけるPLスペクトルを測定し、BG:Agの再利用可能性を検証した。

### 3 結果と考察

#### 3.1 RPL特性

Figure 1にBGにおけるPLスペクトルを示す。BGにおいて、1000 GyのX線照射後も新たな蛍光ピークの出現—すなわちRPL—は観測されなかった。Figure 2にBG:AgにおけるPLスペクトルを示す。BG:Agにおいては、X線照射後の650 nm付近にピークを持つブロードな蛍光帯の出現および線量増大にともなう当該強度の増強が観測された。この結果から、BG:AgはRPL能を有していることが明らかとなった。また、

銀添加リン酸塩ガラスにおいて650 nmのブロードなピークは、 $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  に帰属されている<sup>1)</sup>ことから、BG:AgにおけるX線照射による $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  形成が示唆された。

Figure 3にBGおよびBG:AgにおけるESRスペクトルを示す。双方において、335 mT付近に4つに分裂した信号が観測された。信号位置および分裂の数から、当該信号はホウ素酸素正孔中心(BOHC)に帰属される<sup>3)</sup>。BGにおいてRPLは観測されなかったことから、BOHCはRPL中心ではないと考えられる。また、BG:Agにおいて、310 mT、325 mTおよび370 mT付近に信号が観測されている。既報<sup>4)</sup>に基づく325 mT付近の信号は $\text{Ag}^{2+}$ に、310 mTおよび370 mT付近の信号は $\text{Ag}_2^+$ にそれぞれ帰属されている。これらの結

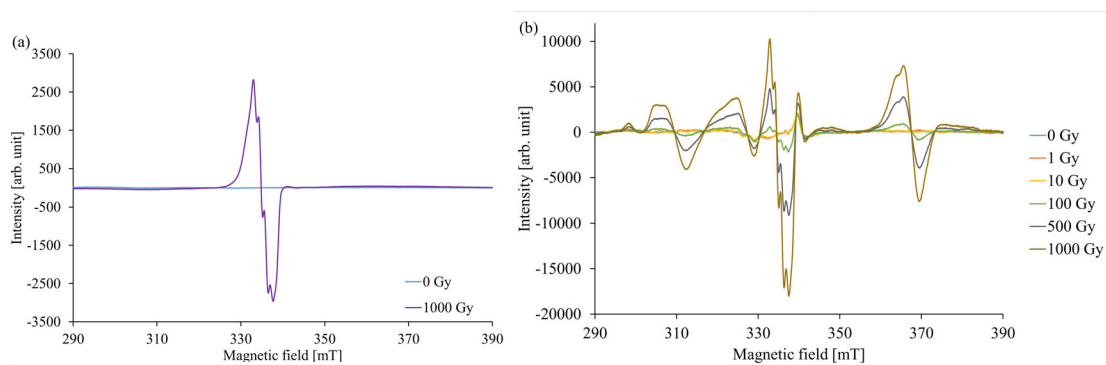


Figure 3. ESR spectra in (a) BG and (b) BG:Ag.

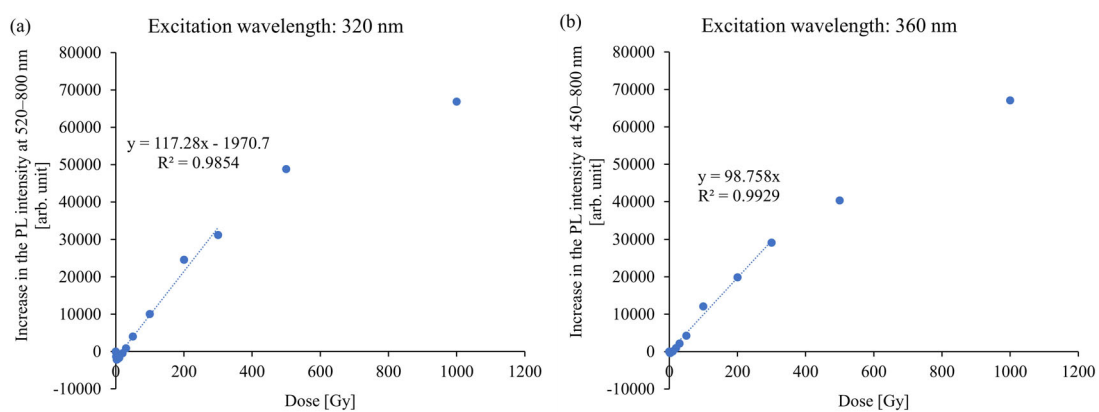


Figure 4. Dose dependences of the PL intensity with the excitation wavelength of (a) 320 and (b) 360 nm.

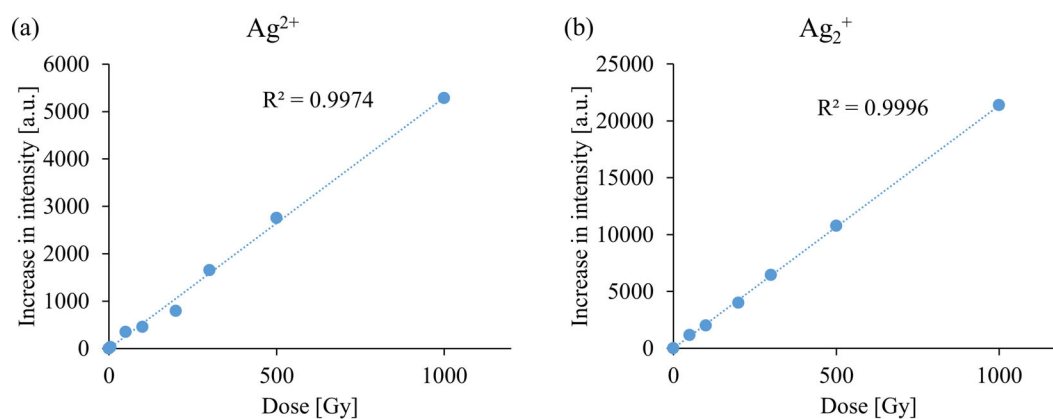


Figure 5. Dose dependences of the ESR signal intensity of (a)  $\text{Ag}^{2+}$  and (b)  $\text{Ag}_2^+$ .

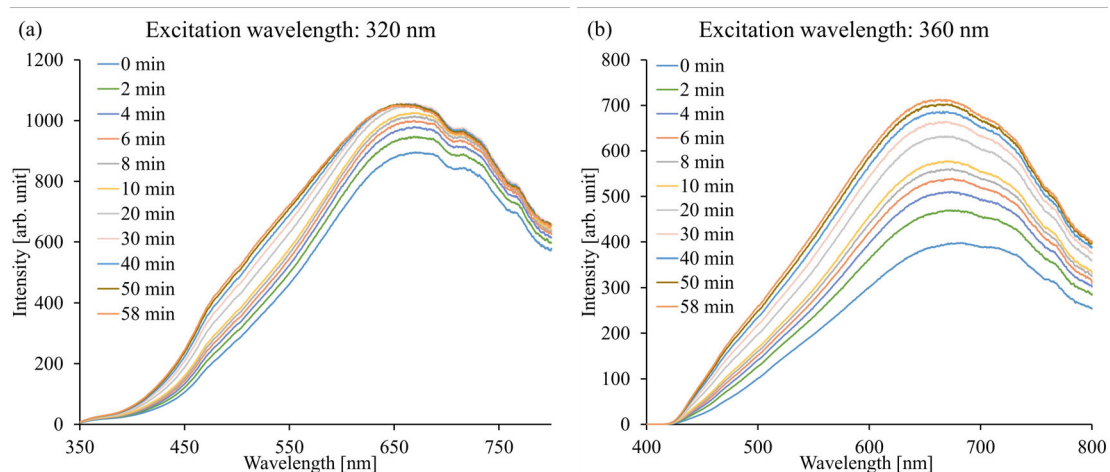


Figure 6. Variation of the PL spectra with the excitation wavelength of (a) 320 and (b) 360 nm with time elapsed.

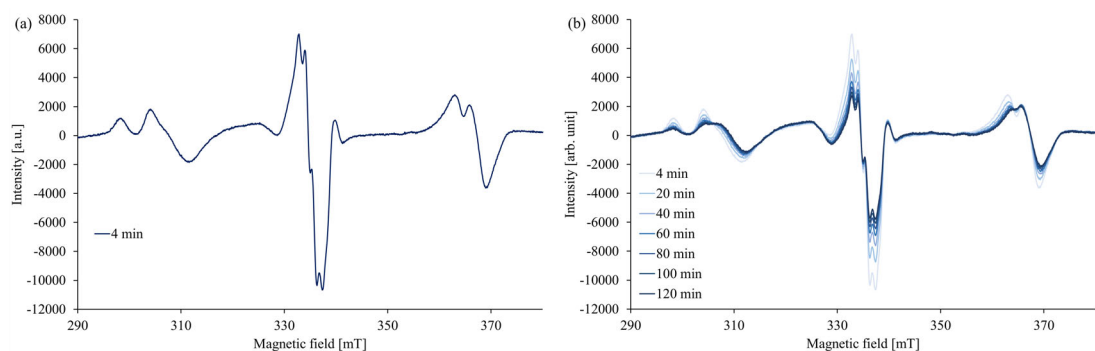


Figure 7. PL spectra with the excitation wavelength of (a) 320 nm and (b) 360 nm in BG:Ag after heating at 773 K for 1 h following X-ray irradiation.

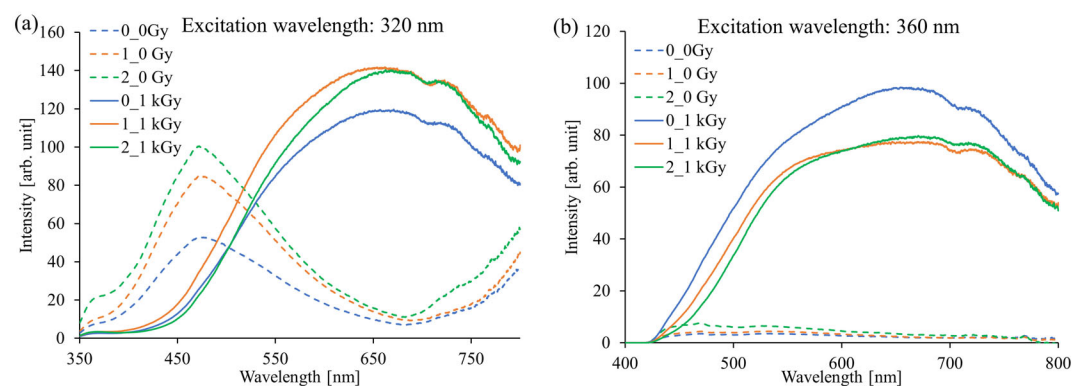


Figure 8. Variation of the ESR spectra with time elapsed. (a) Just after 4 min (b) for 120 min.

果から、BG:Ag における X 線照射による  $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  形成が明らかになり、 $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  が RPL 中心だと推定された。

Figures 4 および 5 に PL および ESR 信号強度の線量依存性を示す。PL 強度は 1 Gy–300 Gy の範囲では線形に増加し、300 Gy より高線量側ではわずかに飽和した。一方、 $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  の ESR 信号強度は 1 Gy–1000 Gy の範囲で線形に増加し続けたことから、PL 強度の高線量域での飽和挙動は RPL 中心の濃度消光によるものと考えられる。PL 強度について、 $3\sigma$  法により算出された検出下限線量は 5 Gy であった。

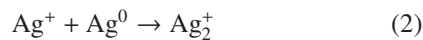
### 3.2 RPL 中心形成機構

Figure 6 に X 線照射直後からの RPL スペクトルの経時変化を示す。いずれのスペクトルにおいても 650 nm 付近をピークとするブロードな範囲で、経時変化にともなう蛍光強度の増大が観測された。この結果から、X 線照射直後からの経時変化とともに RPL 中心が形成されていることが明らかとなった。この RPL 中心形成挙動を解析するために測定した、X 線照射からの ESR スペクトルの経時変化を Fig. 7 に示す。X 線照射直後 (Fig. 7a) は、BOHC の信号と 300 mT および 370 mT 付近の 2 つに分裂した信号が顕著に観測された。300 mT および 370 mT 付近の 2 つに分裂した信号は  $\text{Ag}^0$  に帰属される<sup>5)</sup> ことから、X 線照射直後は、BOHC および  $\text{Ag}^0$  が主に形成されていることが明らかとなった。その後時間経過にともなって、BOHC の信号強度減少と、 $\text{Ag}^{2+}$  の信号強度増大が観測された。さらに、2 つに分裂した  $\text{Ag}^0$  の信号は  $\text{Ag}_2^+$  のブロードな信号に変化していった。これらの結果に基づいて得られた RPL 中心形成機構は以下の通りである。

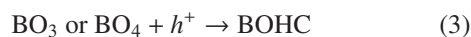
放射線により形成された電子正孔対のうち、電子は  $\text{Ag}^+$  に捕獲されて  $\text{Ag}^0$  を形成する。



その後、 $\text{Ag}^+$  と  $\text{Ag}^0$  との会合により  $\text{Ag}_2^+$  が形成される。

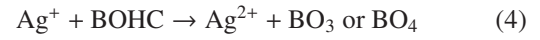


一方、正孔はホウ酸ネットワークに捕獲され、BOHC を形成する。



その後、BOHC から解放された正孔が  $\text{Ag}^+$  へと移動

し、 $\text{Ag}^{2+}$  を形成する。



### 3.3 再利用可能性検証

Figure 8 に X 線照射と加熱を繰り返した後の BG:Ag における PL スペクトルを示す。Figure 8 の凡例について、 $n$  回加熱された BG:Ag において、X 線未照射および照射後の結果をそれぞれ  $n_0$  Gy および  $n_1$  kGy としている。0\_1 kGy の結果は、Fig. 2 と同様に 650 nm 付近のブロードな蛍光帯が観測されている。その後の加熱の結果 (1\_0 Gy)、650 nm の蛍光帯が消え、0\_0 Gy —すなわち初期状態—と同様のスペクトルになった。さらに X 線を照射すると (1\_1 kGy)、0\_1 kGy と同様に 650 nm 付近のブロードな蛍光帯が出現した。2 回目の加熱および X 線照射の結果 (2\_0 Gy および 2\_1 kGy) も同様の挙動を示した。これらの結果から、BG:Ag の RPL は加熱によって初期化され、なおかつ加熱後の X 線照射によって再出現するため、BG:Ag は再利用可能性を具備していることが明らかとなった。

## 4 まとめ

新規 RPL 材料開発と目的とし、銀添加 Na-Al ホウ酸塩ガラス (BG:Ag) における RPL 特性、RPL 中心形成機構および再利用可能性を調査した。その結果、BG:Ag は  $\text{Ag}^{2+}$  および  $\text{Ag}_2^+$  に帰属される RPL を示し、RPL 強度に基づいて 5 Gy–300 Gy の範囲で線量計測可能であることを明らかにした。加えて、この RPL は 500 °C で 1 時間の加熱によって初期化でき、なおかつ初期化後の X 線照射によって再出現するため、BG:Ag は再利用可能な RPL 材料であることを明らかにした。また、 $\text{Ag}^{2+}$  は BOHC からの正孔移動により、 $\text{Ag}_2^+$  は  $\text{Ag}^+$  と  $\text{Ag}^0$  との会合によってそれぞれ形成されていることを明らかにした。

### 〈参考文献〉

- 1) H. Kawamoto, M. Koshimizu, Y. Fujimoto, K. Asai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 62 (2023) 010501.
- 2) A. S. Lipatiev, S. S. Fedotov, S. V. Lotarev, T. O. Lipatieva, G. Y. Shakhgildyan, V. N. Sigaev, *ACS Appl. Nano Mater.*, 5 (2022) 6750.
- 3) T. Kishii, K. Ooka, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 23 (1967) 659.
- 4) S. W. S. Mckeever, S. Sholom, N. Shrestha, *Radiat. Meas.*, 123 (2019) 13.
- 5) N. I. Mel'nikov, D. P. Peregood, R. A. Zhitnikov, *J. Non-Cryst. Solids*, 16 (1974) 195.



第66回放射線化学討論会  
正電荷ペプチド (PCP) を構成するヒスチジンが  
フリーラジカル消去と化学修復に及ぼす影響

東京大学  
量子科学技術研究開発機構

田 超中, 小畑 結衣, 山下 真一\*  
木村 敦, Hao Yu, 田口 光正

1 Introduction

Currently, in the field of cancer radiation therapy, a primary challenge lies in minimizing side effects. Efforts are being directed towards refining irradiation methods to limit exposure to normal cells and employing drugs to heighten the contrast in radiation effects between cancerous and normal cells. In this context, the exploration of peptides as radioprotective agents offers a promising avenue. Positively charged peptides (PCPs) have gained popularity as potential candidates for radiation protection and/or sensitization due to their positive charge, which enables them to bind to the target of radiation, namely DNA<sup>1)</sup>. By incorporating alkaline amino acids into the sequence of peptides, a positive charge can be imparted to the peptides because alkaline amino acids have excess amino group in their side chains. Among the alkaline amino acids, histidine (His), due to its highest reaction rate constant with hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ), exhibits the most significant potential for scavenging free radicals. Hence, our study focuses on the radiation protection abilities of PCPs containing His. Another alkaline amino acid, lysine (Lys), was also used to investigate common features of alkaline amino acids and difference among them.

2 Experimental

Peptide synthesis was carried out at QST Takasaki with three amino acids (Fig. 1): histidine (His), tyrosine (Tyr) and lysine (Lys). Details of the synthesis steps can be found in the literature<sup>2)</sup>. The peptides with two sequences, His-Tyr-His and Lys-Tyr-Lys, were synthesized and their molecular weights were confirmed by LC-MS analysis. Pulse radiolysis experiments were conducted as a collaborative research project at Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo. The detailed setup of the system can be found in the literature (see for example, <sup>3,4)</sup> and references therein). The pulse width of the electron beam was about 10 ns, and the dose per pulse was in the range of 4 Gy–13 Gy. As a model substance of DNA, the most easily oxidizable nucleotide, 2'-deoxyguanosine 5'-phosphate (dGMP), was used to discuss chemical repair activity.

3 Results and discussion

The competition method using thiocyanate,  $\text{SCN}^-$ , was employed to determine the reaction rate constants of His and Tyr with  $\bullet\text{OH}$  in comparison to the peptide His-Tyr-His. The reaction rate constant of His-Tyr-His was found to be approximately twice of that of His, and significantly lower than the sum of the amino acids composing the PCP. Considering that the primary reaction site of amino acids with  $\bullet\text{OH}$  is located in their side chains, which does not change even if a peptide bond is formed. This fact suggests that some parts of the PCPs are becoming less reactive, in other words, some kind of shielding effect is implied

Effect of Histidine Consisting of Positively Charged Peptides (PCPs) on the Free Radical Scavenging and Chemical Repair  
Chaozhong TIAN, Yui OBATA and Shinichi YAMASHITA\* (*The University of Tokyo*), Atsushi KIMURA, Hao YU and Mitsumasa TAGUCHI (*National Institutes for Quantum Science and Technology*),  
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22  
TEL: 029-287-8432, E-mail: shin1@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

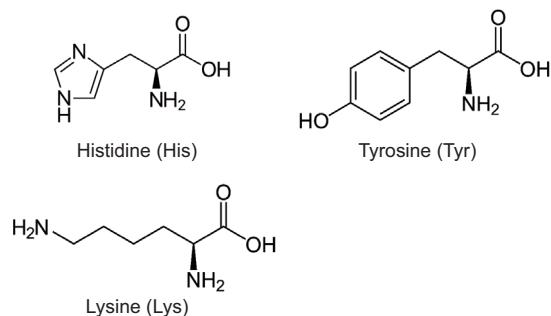


Figure 1. Structures of histidine (His), tyrosine (Tyr), and lysine (Lys).

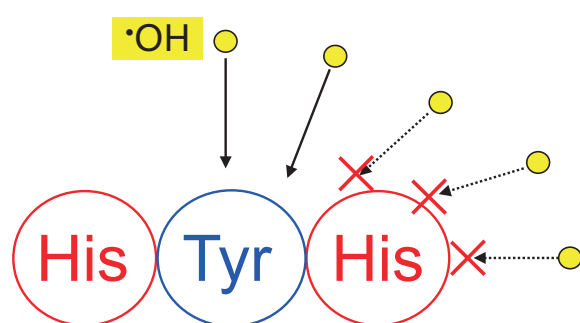


Figure 2. A schematic of shielding effect of His in His-Tyr-His.

(Fig. 2).

To further examine the shielding effects, we measured the transient absorption spectra of His, Tyr, and His-Tyr-His. We first inferred the absorption spectrum of His-Tyr-His based on the ratio of amino acids and the reaction rate constant with  $\cdot\text{OH}$ . The measured absorption of His-Tyr-His at 340 nm (mainly contributed by Tyr) was significantly lower than that inferred from the amino acids. By increasing the proportion of  $\cdot\text{OH}$  scavenged by His, we found that the inferred absorption spectrum at 330 nm more closely matched the actual measured absorption spectrum. This confirmed that the ability of

Tyr to scavenge  $\cdot\text{OH}$  was diminished in PCPs, due to the shielding effect of His.

In studying chemical repair for dGMP we found that neither Lys nor His demonstrated significant chemical repair ability. In studying chemical repair for dGMP we found that Tyr has some chemical repair ability, while neither Lys nor His demonstrated significant chemical repair ability. Meanwhile, Lys-Tyr-Lys possesses better chemical repair ability than His-Tyr-His. This fact proves that His has a more pronounced shielding effect on Tyr compared to Lys.

The principle that produces the shielding effect is still under discussion, and we are considering the possibility that the shielding effect may come from the effect of charge and so on. We are currently attempting to modify PCPs to control the extent of the shielding effect from alkaline amino acids, thereby adjusting the level of shielding according to the application context, which is crucial for the development of radiation protection or sensitizing agents based on PCPs.

#### 〈謝 辞〉

本研究は JSPS 科研費 18H03891 の支援を受け、東京大学原子力専攻の共同利用の一環として実施した。

#### 〈参 考 文 献〉

- 1) M. Roginskaya, W. A. Bernhard, Y. Razskazovskiy, *Radiat. Res.*, 166 (2006) 9.
- 2) A. Kimura, T. Arai, M. Ueno, K. Oyama, H. Yu, S. Yamashita, Y. Otome, M. Taguchi, *Pharmaceutics* 14 (2022) 2400.
- 3) K. Hata, M. Lin, Y. Katsumura, Y. Muroya, H. Fu, S. Yamashita, H. Nakagawa, *J. Radiat Res.*, 52 (2011) 15.
- 4) T. Toigawa, D. R. Peterman, D. S. Meeker, T. S. Grimes, P. R. Zalupski, S. P. Mezyk, A. R. Cook, S. Yamashita, Y. Kumagai, T. Matsumura, G. P. Horne, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23 (2021) 1343.

第66回放射線化学討論会

炭酸ラジカルをプローブとした新規線量計の開発  
—炭酸アパタイトの合成と線量応答性評価—

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構  
横塚 恵莉, 清藤 一, 長澤 尚胤\*  
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
岡 壽崇, 北辻 章浩

1 はじめに

X線, ガンマ線, 電子線などの電離放射線は, 工業, 医療, 農業分野のさまざまな用途で利用されている。材料に放射線がどの程度照射されたか(吸収線量)を計測するために品質保証の観点からさまざまな線量計が利用されている。簡便に使用されている化学線量計としてアラニン線量計, ポリメチルメタアクリレート(PMMA)線量計やフリッケ線量計がある<sup>1-3)</sup>。特に, アラニン線量計は, 放射線の吸収線量を数10 Gyから数10 kGyの範囲で測定する一般的な方法の線量計として利用され, 放射線によって生じた長寿命のラジカルを検出する電子スピン共鳴(ESR)測定が用いられている<sup>4)</sup>。しかし, これら化学線量計は測定範囲が限られており, 特に数Gy以下の低線量域を感度良く測定することが難しいという問題がある。そのため, 低線量域で高感度の応答を示す簡易線量計が必要とされている。

これまで歯のエナメル質を用いて被曝線量評価を行う研究が行われている<sup>5-7)</sup>。歯のエナメル質の主成分である hidroksiapatite に放射線が照射されると, エナメル質中に不純物として含まれている炭酸か

ら安定な炭酸ラジカルが生成され, その生成した炭酸ラジカル量を測定することにより, 被曝線量評価を行うことができる。この炭酸ラジカルをプローブとした線量評価法は, アラニン線量計やフィルムバッジでは測定が困難である10 Gy未満の線量を評価できることが報告されている<sup>8,9)</sup>。しかし, その試料の歯のエナメル質中の炭酸含有量が3%程度<sup>10)</sup>と少ないため, 1 Gy以下の低線量に対する感度が低く, 測定精度が±10%以上と悪い。そこで, 本研究では, 低線量域で高感度な応答を示す線量計開発を目的に, 歯のエナメル質よりも多くの炭酸を含む炭酸アパタイトを合成, 構造評価・元素分析を行うとともに, その線量応答性を明らかにし, 新規線量計基材としての適用性を評価した。

2 炭酸アパタイトの合成

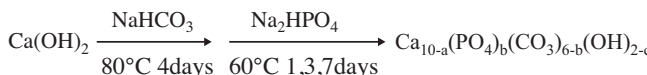
炭酸アパタイトの合成は, 石川らの方法<sup>11,12)</sup>を参考に以下の溶液に浸漬させる容易な手法を開発した。水酸化カルシウムを80°Cの炭酸水素ナトリウム水溶液に4日間浸漬して炭酸化させた。その後, 60°Cのリン酸水素二ナトリウム水溶液に浸漬してリン酸化させ, 炭酸アパタイトを作製した。炭酸の含有量を変化させるため, リン酸化処理(1日, 3日, 7日)時間を変化させた試料を作製した。炭酸アパタイトの合成反

Development of a new dosimeter by probing carbonate radicals –Synthesis of carbonate apatite and evaluation of dose response–

Eri YOKOZUKA, Hajime SERO and Naotsugu NAGASAWA\* (National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)), Toshitaka OKA and Yoshihiro KITATSUJI (Japan Atomic Energy Agency (JAEA)),

〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

TEL: 027-335-8310, E-mail: nagasawa.naotsugu@qst.go.jp



Scheme 1. Synthesis of carbonate apatite.

応式を Scheme 1 に示す。

### 3 構造解析

合成試料の構造を評価するため、出発物質の水酸化カルシウム、炭酸化試料、リン酸化処理試料について、以下の測定を行った。X線回折 (XRD) は Rigaku 社製の全自動多目的 X線回折装置 SmartLab を用い、測定間隔  $0.1^\circ$ 、測定速度  $1^\circ/\text{min}$ 、管電圧 40 kV、管電流 45 mA の条件で測定した。フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) は PerkinElmer 社製の Frontier FT-IR を用い、範囲  $400\text{ cm}^{-1}$ – $4000\text{ cm}^{-1}$ 、積算回数 16 回の条件で測定した。顕微ラマン分光測定は、HORIBA 社製の顕微レーザーラマン分光測定装置 LabRAM HR Evolution を用い、532 nm レーザー、範囲  $3400\text{ cm}^{-1}$ – $3700\text{ cm}^{-1}$ 、積算回数 20 回の条件で測定した。

出発物質の水酸化カルシウム、炭酸化試料、リン酸化試料の XRD 回折パターンを Fig. 1, FT-IR スペクトルを Fig. 2, ラマンスペクトルを Fig. 3 にそれぞれを示す。Figs. 1, 2, 3 において、(a) は水酸化カルシウム、(b) は炭酸化処理した試料、(c) は 1 日間リン酸化処理した試料、(d) は 3 日間リン酸化処理した試料、(e) は 7 日間リン酸化処理した試料である。Fig. 1 の XRD 回折パターンにおいて、炭酸化処理した試料では、水酸化カルシウムに起因する  $2\theta = 29.4^\circ$  のピークが消え、炭酸カルシウムに起因する  $2\theta = 34.2^\circ$  のピークがみられた。

リン酸化処理した試料では、炭酸カルシウムに起因した  $2\theta = 34.2^\circ$  のピークが減り、アパタイト結晶に起因する  $2\theta = 31^\circ$ – $35^\circ$  のピークが新たにみられた。

また、Fig. 2 の FT-IR スペクトルにおいて、リン酸

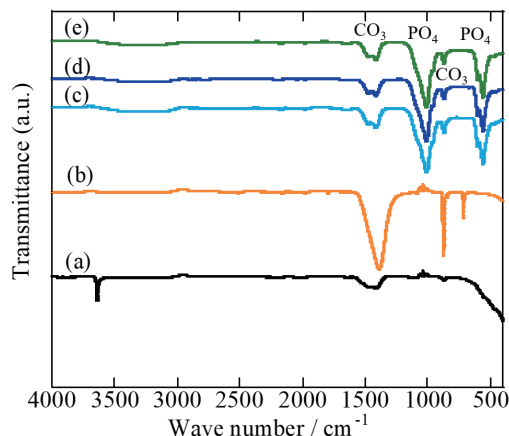


Figure 2. FT-IR spectrum of synthetic apatites. (a) Calcium hydroxide as raw material, (b) carbonated sample, (c) sample phosphorylated for 1 day, (d) sample phosphorylated for 3 days and (e) sample phosphorylated for 7 days.

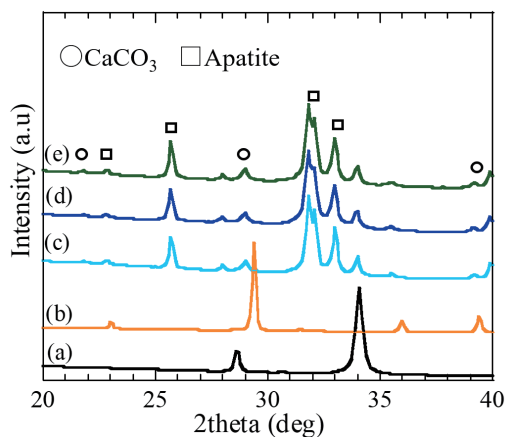


Figure 1. XRD patterns of synthetic apatites. (a) Calcium hydroxide as raw material, (b) carbonated sample, (c) sample phosphorylated for 1 day, (d) sample phosphorylated for 3 days and (e) sample phosphorylated for 7 days.

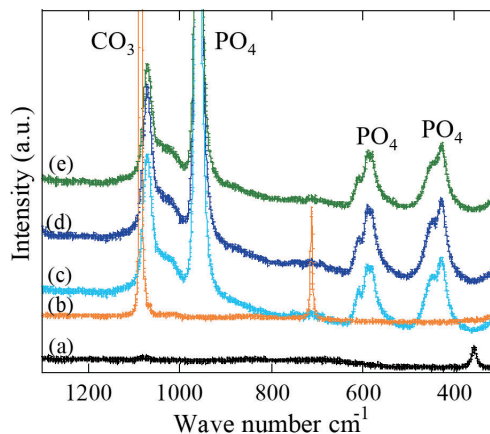


Figure 3. Raman spectrum of synthetic apatites. (a) Calcium hydroxide as raw material, (b) carbonated sample, (c) sample phosphorylated for 1 day, (d) sample phosphorylated for 3 days and (e) sample phosphorylated for 7 days.

化処理した試料では、炭酸化処理した試料で見られていた炭酸基に起因する  $870\text{ cm}^{-1}$ ,  $1400\text{ cm}^{-1}$  のピークが減り、リン酸基に起因する  $560\text{ cm}^{-1}$ ,  $1010\text{ cm}^{-1}$  のピークが新たに見られた。

また、Fig. 3 のラマンスペクトルにおいて、炭酸化処理した試料では炭酸基 ( $\text{CO}_3$ ) に起因する  $1100\text{ cm}^{-1}$  付近のピークがみられた。リン酸化処理した試料では炭酸基に加え、 $450\text{ cm}^{-1}$ ,  $590\text{ cm}^{-1}$ ,  $960\text{ cm}^{-1}$  付近にリン酸基 ( $\text{PO}_4$ ) に起因するピークが新たにみられた。

#### 4 線量応答性の評価

合成した炭酸アパタイトを、一端を密閉したポリプロピレン製ストローに入れ、QST 高崎量子応用研究所において、室温 ( $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ) で  $^{60}\text{Co}$  ガンマ線を  $10\text{ Gy}$ ,  $50\text{ Gy}$ ,  $100\text{ Gy}$  照射した。電離箱で評価した

線量率はそれぞれ  $9.35 \times 10^{-3}\text{ Gy/min}$  (線量  $10\text{ Gy}$ )、 $108\text{ Gy/h}$  (線量  $50\text{ Gy}$ ,  $100\text{ Gy}$ ) であった。

照射試料の ESR 測定は、日本電子社製電子スピン共鳴装置 JES-FA200 で測定した。測定パラメータは、出力  $2\text{ mW}$ 、掃引幅  $\pm 5\text{ mT}$ 、変調幅  $0.2\text{ mT}$ 、時定数  $0.03\text{ s}$ 、掃引時間  $30\text{ s}$  とした。

ガンマ線を  $100\text{ Gy}$  照射した合成アパタイト試料の ESR スペクトルを Fig. 4 に示す。(a) は 1 日間リン酸化処理した試料、(b) は 3 日間リン酸化処理した試料、(c) は 7 日間リン酸化処理した試料である。ガンマ線照射により、どのリン酸化処理した試料からも炭酸ラジカル特有のスペクトルが観測された。炭酸ラジカルのピーク強度は、リン酸化処理日数によらず、ほぼ一定となった。7 日間リン酸化処理したアパタイト試料のガンマ線に対する線量応答曲線を Fig. 5 に示す。ピーク高さから見積もったラジカル強度は、吸収

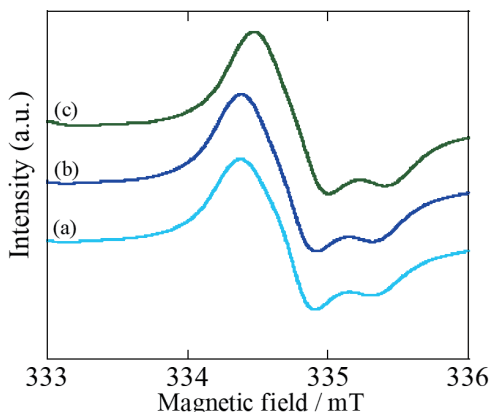


Figure 4. ESR spectrum of synthetic apatites by irradiated at  $100\text{ Gy}$ . (a) Sample phosphorylated for 1 day, (b) sample phosphorylated for 3 days and (c) sample phosphorylated for 7 days.

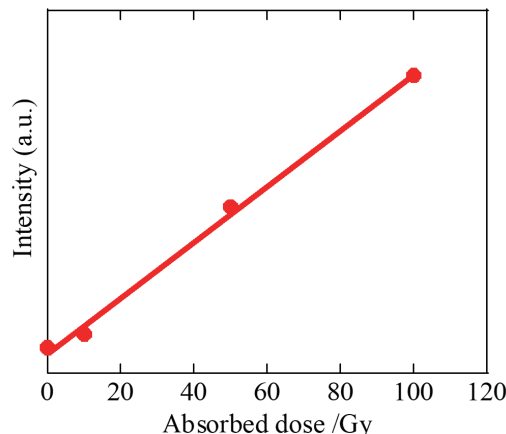


Figure 5. Dose response curve of synthetic apatite by phosphorylated for 7 days. The irradiation doses were  $10\text{ Gy}$ ,  $50\text{ Gy}$  and  $100\text{ Gy}$ , respectively.

Table 1. Ca, P, C and  $\text{CO}_3$  content of each sample.

Sample name	Ca (%)	P (%)	C (%)	$\text{CO}_3$ (%)
Calcium hydroxide	48.8	–*	0.58	2.9
Carbonated sample	39.2	–*	11.8	59
Phosphorylated sample (7 days)	33.1	14.8	1.52	7.6
Tooth enamel <sup>10)</sup> (hydroxyapatite)	36.6	17.7	0.64	3.2

\*This could not be detected with an ICP emission spectrometer.

線量の増加とともに大きくなり, 直線性の関係を示した ( $R^2 = 0.997$ ).

## 5 元素分析

合成炭酸アパタイト試料について, 上記3項の構造解析および4項の線量応答性評価の結果から, リン酸化処理日数が変化しても XRD スペクトル, FT-IR スペクトル, ラマンスペクトルに変化がなかったこと, ならびに 100 Gy 照射した時の炭酸ラジカルのピーク強度がリン酸化処理日数によらずほぼ一定であったことから, 元素含有量は同じであると判断した.

合成した試料の元素分析を行うために, 以下の測定を行った. Ca および P の分析については, PerkinElmer 社製 ICP 発光分光測定装置 Avio500 を用いた. Ca および P の測定波長は, それぞれ 317.933 nm および 213.617 nm とした. C の分析については, 燃焼法元素分析測定装置スミグラフ NCH 22F 型を用いた (住化分析センター依頼分析). 測定条件は, 反応温度 850 °C, 還元温度 600 °C, 燃焼時間 150 s とした. 出発物質である水酸化カルシウム, 炭酸化試料, リン酸化試料 (7日間リン酸化処理した合成炭酸アパタイト) および歯のエナメル質 (主成分はヒドロキシアパタイト) 中におけるカルシウム, リン, 炭素および炭酸の含有量を Table 1 に示す. 炭酸含有量は, 炭素の含有量から酸素含有量を求め, 両者を合計して算出した. 炭酸化試料の炭酸含有量は, 出発物質である水酸化カルシウムの不純物量よりも増加していることから, 炭酸化処理反応が進行していることがわかる. 一方, リン酸化処理試料は, 炭酸化処理のみの試料よりも炭素含有量が減少し, リン酸含有量が増加したことから, 炭酸・リン酸交換反応が進行していると考えられる. また, リン酸化処理試料の炭酸含有量は 7.6 % であったことから, 歯のエナメル質よりも炭酸含有量が多いアパタイト試料の合成に成功した.

## 6 まとめ

XRD スペクトル, FT-IR スペクトル, ラマンスペクトルより, リン酸化処理した試料でアパタイト結晶のピークおよび  $\text{CO}_3$  基,  $\text{PO}_4$  基のピークをそれぞれ確認できたことから, 溶液に浸漬する簡易な方法で炭酸ア

パタイトを合成するとともに, 歯のエナメル質よりも炭酸含有量が多いアパタイト試料の作製に成功した. 合成炭酸アパタイトの吸収線量に対する炭酸ラジカルのピーク高さは線量の増加に対して直線性を示したことから, 新規線量計の素子材料として使用できる可能性を得た.

今後は, 線量率や照射温度が生成ラジカルの減衰挙動に与える影響について調べ, ラジカルの挙動と結晶および格子構造との関係を明らかにするとともに, 線量計素子材料としてふさわしいアパタイト試料の合成方法の最適化を行う.

## 〈参考文献〉

- 1) T. Kojima, S. Kashiwazaki, H. Tachibana, R. Tanaka, M. F. Desrosiers, W. L. McLaughlin, *Appl. Radiat. Isot.*, 46 (1995) 1407.
- 2) H. Seito, T. Ichikawa, H. Kaneko, Y. Sato, H. Watanabe, T. Kojima, *Radiat. Phys. Chem.*, 78 (2009) 356.
- 3) L. J. Schreiner, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 3 (2004) 9.
- 4) L. Xie, J. Dai, P. Wang, Y. Zhang, J. Gao, *Radiat. Phys. Chem.*, 63 (2002) 817.
- 5) T. Oka, A. Takahashi, K. Koarai, Y. Mitsuyasu, Y. Kino, T. Sekine, Y. Shimizu, M. Chiba, T. Suzuki, K. Osaka, K. Sasaki, Y. Urushihara, S. Endo, M. Suzuki, H. Shinoda, M. Fukumoto, *Radiat. Meas.*, 134 (2020) 106315.
- 6) B. Pass, *J. E. Aldrich, Med. Phys.*, 12 (1985) 305.
- 7) H. Lanjania, F. Ziaie, M. Modarresi, M. Nikzad, A. Shahvar, S. A. Durrani, *Radiat. Meas.*, 43 (2008) S648.
- 8) S. Devic, *Phys. Med.*, 27 (2011) 122.
- 9) H. Seito, E. Yokozuka, T. Oka, Y. Kitatsuji, N. Nagasawa, *Radiat. Prot. Dosim.*, (submitted).
- 10) IAEA, Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment, IAEA-TECDOC-1331, Austria, 2002.
- 11) K. Ishikawa, S. Matsuya, X. Lin, Z. Lei, T. Yuasa, Y. Miyamoto, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 118 (2010) 341.
- 12) 石川 邦夫, 都留 寛治, 土谷 享, 炭酸カルシウムブロックの作製, WO2018/173915, 2018.9.27.

## 第 67 回放射線化学討論会のお知らせ

日時 令和 6 年 9 月 6 日 (金) 午前-7 日 (土) 午後

場所 広島大学学士会館 (東広島キャンパス)  
 広島県東広島市鏡山 1 丁目 2-2  
<http://www.hiroshima-u.ac.jp/access/higashihiroshima/index.html>

主催 日本放射線化学会

### 開催概要

日本放射線化学会は放射線化学に関する物理・化学およびその他の分野の研究者相互の連絡をはかり、放射線化学の基礎的ならびに応用的研究の発展に寄与することを目的に活動しています。標記討論会は本学会の年會に位置づけられるもので、放射線化学の基礎、応用及び関連分野の研究発表を主として行います。関連分野には、放射光化学、レーザー化学、プラズマ科学、原子分子衝突、加速器科学、陽電子科学などの学際領域に加えて、ナノテクノロジー、高分子科学、分子科学、デバイス物理、医療など、放射線化学との境界領域を含むものとします。

### 発表方法

口頭発表 (15 分)・ポスター発表 (60 分) (予定)

### 申込期間

#### 参加申込受付

令和 6 年 6 月 3 日 (月) -8 月 30 日 (金)  
 (以降は当日受付にて)

#### 講演申込・要旨集原稿受付

令和 6 年 6 月 3 日 (月) -7 月 26 日 (金)

### 参加登録費 (講演要旨集代を含む)

一般 5,000 円

学生 3,000 円

(本学会および関係学協会学生会員は無料)

### 懇親会

日時：令和 6 年 9 月 6 日 (金) 夕方

会場・懇親会費：未定 (後日、公式 HP に掲載)

### お問い合わせ

〒432-8011 浜松市中区城北 3-5-1

静岡大学電子工学研究所 越水研究室内

日本放射線化学会事務局

Tel: 053-478-1329

E-mail: office.jsrc@gmail.com

その他の詳細は下記の第 67 回放射線化学討論会の公式 HP をご参照ください。

<https://radiation-chemistry.org/amrc/67amrc/index.html>

## 伊藤 泰男先生の思い出

2023年の10月11日に伊藤 泰男先生が8月27日に80歳でお亡くなりになったとの連絡が入った。親族のみでの葬儀、49日を経て皆さんに連絡という遺言にしたがった結果でした。

実は、2023年1月3日に年賀状の返事ということで伊藤先生よりメールをいただいております。2022年4月あたりより腰痛が続き医者で診てもらったところ、肺腺ガンが見つかり、左の股関節に転移があり、股関節のガン疼痛には放射線照射、肺腺ガンにはチェックポイント阻害剤の点滴で悪化を抑えているとのこと、最後に、立つ鳥跡を濁さずと身辺整理をいたしておりますと、淡々と記しておられたのが印象的でした。

本稿では伊藤先生との思い出を記すこととしたい。私は院生の時、ダイナミトロン電子線加速機とESRを組み合わせた、照射中のESR測定を行っていました。長期に加速器が停止した際に、スピントラッピング実験を原研東海の開放研に新しく入ったESR装置を用いて実施したのが伊藤先生との最初の接点です。当時は開放研の助手であった伊藤先生にESRキャビティ内にセットした試料の紫外線照射や温度制御と色々ご指導いただきました。この仕事は私のデビュー作となりました。

私は1976年より東海の原子力研究施設の助手に採用され、東海ライナックの建設に加わることになり、伊藤先生同様、同じ東海に居住することから研究面での接点ができました。伊藤先生は陽電子科学、さらにエキゾチック粒子科学研究を進めておられましたので、Ps形成の電子捕捉剤効果を通じてスパー反応モデルの検討に共同研究者として加えていただきました。当時はライナックの共同利用のお世話をする立場から、電子線による陽電子生成実験にも参加しました。これらに参加することで視野が広がったように思います。

伊藤先生はロシア語に堪能で、1985年にA. K. Pikaev (ソビエト科学アカデミー物理化学研究所) らが執筆した「ランタニドとアクチノイド水溶液の放射線分解」を翻訳して関係者間に配布されました。アクチノイド水溶液のパルスラジオリシス実験は法律的な規制からとても日本では許可されないだろうなと思いました。しかし、原子力における放射線化学を研究の中心に置いていた私にとっては大切な指針になりました。

私は1984年末に本郷の原子力工学科に助教授とし

て着任しました。1989年にベルリンの壁崩壊、続くソ連の崩壊が起こり、冷戦が終了しました。ソ連は冷戦時には西欧とは異なるユニークな研究を行っており、ソ連の学術雑誌の英訳版が刊行されているほどでした。ところがソ連崩壊にともない研究費は大幅に減り、同時に優秀な若手は海外流失、シニアの研究者はグループ維持のために外国に出稼ぎに出ました。このような状況のもとで国際支援の一環として日本でも研究者の短期受け入れが行われました。どんな理由だったか思い出せないのですが、伊藤先生からM. V. Byakov先生(放射線化学会誌第113号p. 83(2022)参照)の受け入れ申請書を提出するよう要請を受けたのでした。申請は受理され、Byakov先生を1993年12月20日から翌年3月末まで受け入れました。出迎えから見送りまでの実際のお世話は当時の院生であった堂前雅史氏(元電中研) がしてくれました。その後、Byakov先生の息子のS. V. Stepanov先生も日本に滞在することになりました。

2001年5月末に伊藤先生、当時東大の松浦 千尋氏から原燃の再処理施設への見学にお誘い頂きました。東京を夜10時に出発、運転を交代しながら早朝に十和田に到着、伊藤先生の同級生で当時原燃に勤務されていた松岡 伸吾氏と合流、奥入瀬を散策し水芭蕉を愛で遅い春を満喫しました。清々しい自然に触れることができ、心が洗われました。確か、途中で混浴にも入って、恥ずかしい思いをしたとの記憶が残っています。三内丸山遺跡にも初めて訪れました。原燃を見学後、帰路に着きました。天気にも恵まれ駆け足の強行軍での訪問でしたが、楽しい思い出として印象に残っています。

2004年の伊藤先生の定年退職後は、原燃の松岡 伸吾氏、元原研の白石 浩二氏、松浦 千尋氏と連携して再処理廃液からの水素発生の仕事を始められました。私も当初は参加しておりましたが、途中で脱落してしまいました。仕事の成果は*Nucl. Technol.* 誌に何編か発表されており、この活動はずっと継続されておりました。

伊藤先生はお酒をこよなく愛され、よくお誘いを受けたものです。先生とのお酒はエスプリに富んだお話を聞けて楽しいものでした。初めてアンコウを食べさせてくださったのも伊藤先生です。外国の研究

者が訪問を受けたときにもお声がけくださり、多くの研究者を知ることになりました。思い浮かぶのは故 H. Fisher 教授 (Zurich Univ.), 故 D. C. Walker 教授 (Univ. of British Columbia), E. Roduner 教授 (Stuttgart Univ.), P. W. Percival 教授 (Simon Fraser Univ.) などです。

伊藤先生の門下生としてアカデミアで活躍されてい

る方としては岡田 漱平 元原研理事, 三宅 康博 KEK 名誉教授, 東 俊行 理研主任研究員を思い浮かべます。伊藤先生の DNA は受け継がれ、さらに広げられているといえます。

伊藤先生、永い間のお付き合いに大変感謝しております。

(原子力システム懇話会・東大名誉教授 勝村 庸介)

## 追悼：伊藤 泰男先生

伊藤 泰男先生 (東京大学原子力研究総合センター元教授) のご訃報に接したのは、2023 年 10 月末のことでした。日本陽電子科学会からのメールでご逝去を知りました。最近お目にかかる機会はありませんでしたが、きっと現役時代と同様にお元気でいらっしゃるのだろうと勝手ながら考えており、ご訃報に接して非常に驚きました。心よりご冥福をお祈り申し上げます。

伊藤先生には、私が学部 4 年の 9 月のときに初めてお目にかかりました。卒業研究で石樽先生の研究室に配属され、陽電子ビームを用いた有機薄膜の構造解析をテーマとして研究に取り組むにあたり、陽電子ビームラインの作製のお手伝いをさせていただきました。東京大学の東海村キャンパスの HIT にいらっしゃった岩井 岳夫先生 (現山形大学教授) の下で、コイルを巻いたり配管のアライメントをしたりという、座学とは異なる取り組みに新鮮な気持ちになったことを強く覚えています。PI となった現在では、関連する物品・資材を非常に豊富に用意していただいていた、どれほど恵まれた環境だったのかということは今更ながらに実感します。また、部品が足りないとお伝えすると、「時間とお金もったいない」とおっしゃって、すぐに旋盤で作製していただいたこともありました。フランチの締め方を一から習うような、足を引っ張るばかりの学生ではありましたが、曲がりなりにも卒業論文を提出できるまで、根気よくご指導いただきました。

先生が 1999 年 6 月につくばで主催された、6th In-

ternational Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC-6) も非常に思い出深いです。私は修士 1 年ながら、(またしてもありがたみをわからず) 口頭で発表する機会をいただきました。先生が開催に奔走される中、お手伝いもできませんでしたが、バンケットやエクスカージョンを含めフルに楽しむことができました。

また、先生とはお酒の席でご一緒させていただくことも多く、お酒の場でいろいろと教えていただくこともありました。東海村でご一緒することが多かったですが、浅野キャンパスでも先生のお部屋に押しかけてお話をさせていただいたりしました。浅野キャンパス近くの居酒屋で同期と飲んでいた際には、日本酒を何本か、「あちらのテーブルからです」という形で頂戴することもありました。

最近になって研究室を主宰する立場となり、改めて当時の環境のありがたみを感じることも多くなりました。今だからお伝えできる感謝の言葉を、お酒を飲みながら述べる機会が失われたことは本当に残念です。現在の私は、初めてお会いしたときの伊藤先生の年齢にさえ達していませんが、先生が (少なくとも) 定年までずっと現場で実験を先導されていたという事実には改めて驚かされます。そのお背中から学んだことを胸に、今後とも一層精進することをお約束し、感謝の思いを伝えたいと思います。

(静岡大学 越水 正典)

# 本 会 記 事

## 第 119 回 日本放射線化学会 理事会議事録

日時 令和 5 年 9 月 27 日 (水) 17:00-  
場所 名古屋大学東山キャンパス ES 総合館会議室+  
オンライン (Zoom)

出席者 青木昭二 (イー・シー・イー), 池田時浩 (理研), 泉佳伸 (福井大), 伊藤賢志 (産総研), 丑田公規 (北里大理), 岡壽崇 (原子力機構), 勝村庸介 (原子力システム研究懇話会), 熊谷純 (名大), 小嶋拓治 (ビームオペレーション), 関修平 (京大院工), 田川精一 (阪大産研), 田口光正 (量研), 辻正治 (九大), 中川清子 (都産技研), 南波秀樹, 林慎一郎 (広島国際大), 平出哲也 (原子力機構), 廣木章博 (量研), 堀邊英夫 (大阪公立大), 前川康成 (量研), 間嶋拓也 (京大), 真嶋哲朗 (阪大産研), 室屋裕佐 (阪大産研), 山下真一 (東大), 山路稔 (群馬大院工), 楊金峰 (阪大産研), 吉田陽一 (阪大産研), 鷲尾方一 (早大理工学術院), 越水正典 (静大電子研)

### 議題

1. 前回 (第 118 回理事会) 議事録 (案) (事務局)
  - 第 118 回理事会の議事録が確認された (事務局).
2. 令和 5 年度役員等名簿 (中川会長, 事務局)
  - 令和 4 年度の新役員等名簿が承認された (中川会長, 事務局). 新会長に高橋 憲司氏 (金沢大工) が就任し, 副会長に砂川 武義氏 (福井工大) が就任する (事務局).
3. 令和 5 年度賛助会員名簿 (事務局)
  - 令和 5 年度賛助会員名簿が紹介された (事務局).
4. 令和 4 年度事業報告 (事務局)
  - 令和 4 年度事業について, 第 64 回放射線化学討論会と第 1 回シンポジウム次世代放射線計測に向けた放射線化学のアプローチの開催, および会誌 (114 号, 115 号) 発行が報告された (事務局). 令和 4 年度会計について, 決算報告がなされた (事務局).

### 5. 令和 5 年度事業計画と予算案 (事務局)

- 令和 5 年度の事業計画と予算案が報告された (事務局). 第 66 回放射線化学討論会は, 2023 年 9 月 28 日-29 日に名古屋大学で開催される. 協賛事業として, 例年通り, アイソトープ・放射線研究発表会やラドテック研究会等を予定している (事務局). また, 先端放射線化学シンポジウム (線量計シンポジウム) の開催を予定している (中川会長).

### 6. 入退会者一覧 (事務局)

- 入退会者一覧が紹介された (事務局)

### 7. 会員内訳 (事務局)

- 会員について, 会員内訳が報告された (事務局). 3 年以上会費を滞納している会員について, 国際文献からの督促のみでなく, 継続意思の確認を書面により行うこととする (事務局).

### 8. 令和 4 年度学会スケジュール (事務局)

- 令和 5 年度学会スケジュールが報告された (事務局). 中国の放射線化学会から学会誌の相互公開の申し入れがあったことが報告された (中川会長). 単に翻訳したものを提供するためにはオープンアクセスにする必要があることや, 中国の放射線化学会誌との内容などのバランスについても指摘があった.

### 9. 第 66 回放射線化学討論会の準備状況 (熊谷氏)

- 第 66 回放射線化学討論会の準備状況と予算について報告がなされた (熊谷氏).

### 10. その他

- 放射線化学討論会の開催時期について, 9 月最終週には講義が開始しているため避けることと, 主要学会との重複を可能な限り避けるよう要請があった (堀邊氏).

以上

# 本 会 記 事

令和5年度役員等名簿（令和6年4月5日現在）

会長	高橋 憲司（金沢大工）	
副会長	吉田 陽一（阪大産研） 砂川 武義（福井工大） 前川 康成（量研・高崎） 中川 清子（都立産技研） 浅井 圭介（東北大院工）	国際会議推進担当 研究推進担当 応用研究推進担当 サイエンス連合担当 事務局担当
常任理事	奥村 康之（NHV コーポレーション） 河内 宣之（東工大院理工） 丑田 公規（北里大理） 伊藤 賢志（産総研） 室屋 裕佐（阪大産研） 鷲尾 方一（早大理工学術院）	辻 正治（九大） 永石 隆二（原子力機構・東海） 真嶋 哲朗（阪大産研） 堀邊 英夫（大阪公立大） 田口 光正（量研・高崎）
理事	熊谷 純（名大） 中村 一隆（東工大セラミック研） 鈴木 信三（京産大理） 関 修平（京大院工） 林 慎一郎（広島国際大） 田中 真人（産総研） 岡 壽崇（原子力機構・東海） 古澤 孝弘（阪大産研） 越水 正典（静大電子研） 楊 金峰（阪大産研） 間嶋 拓也（京大院工） 山沖 留美（大阪薬大）	平出 哲也（原子力機構・東海） 竹中 康之（北教大） 駒口 健治（広大院工） 青木 昭二（イー・シー・イー） 泉 佳伸（福井大） 山路 稔（群馬大院工） 加藤 隆二（日本大） 菊間 博之（いいえんじ） 廣木 章博（量研・高崎） 山下 真一（東大院工） 池田 時浩（理研）
監事	勝村 庸介（原子力システム研究懇話会）	平岡 賢三（山梨大工）
顧問	田川 精一（阪大産研） 市川 恒樹（北大院工） 小嶋 拓治（ビームオペレーション）	籾野 嘉彦 南波 秀樹 中川 和道（阪大産研）
名誉会員		
編集委員会	委員長：田口 光正（量研・高崎） 主任：林 慎一郎（広島国際大） 熊谷 純（名大） 増田 明彦（産総研） 神戸 正雄（阪大産研） 佐伯 誠一（量研・高崎） 樋川 智洋（原子力機構・東海） 加藤 昌弘（産総研）	山下 真一（東大院工） 伊藤 賢志（産総研） 岡 壽崇（原子力機構・東海） 田中 真人（産総研） 藤井 健太郎（量研・関西（仙台）） 宇部 道子（千代田テクノル） 竹内 夕桐子（ブリッジス） 青木 祐太郎（福井工大）
企画継承委員会	委員長：越水 正典（静大電子研） 駒口 健治（広大院工） 柴田 裕実（阪大産研） 中川 和道（阪大産研）	須郷 由実（量研・高崎） 藤井 健太郎（量研・関西（仙台）） 室屋 裕佐（阪大産研）
国際交流委員会	委員長：室屋 裕佐（阪大産研） 田口 光正（量研・高崎） 楊 金峰（阪大産研）	泉 佳伸（福井大） 林 銘章（中国科技大）
事務局	浅井 圭介（東北大院工）	越水 正典（静大電子研）

# 本 会 記 事

## 令和 5 年度会計中間報告（令和 6 年 3 月 31 日現在）

収入の部

(単位：円)

項目	R5 年度予算案	R5 年度現状	内容等
賛助会員 (14 社 24 口)	240,000	230,000	R5 年度契約数 24 口 (14 社) 13 社 23 口入金確認
個人会員 (154 名)			R6.3.31 現在
正会員 (143 名)	715,000	571,500	正会員 144 名 (未納 43 名：累計 457,000 円)
学生会員 (11 名)	16,500	3,000	学生会員 6 名 (未納 4 名：累計 25,500 円)
雑収入 (利息等)	5,000	109,518	著作権料 109,150 円 受取利息 (国際文献分 6 円, 事務局分：2 円)
寄付金	-	199,016	熊谷先生より (第 66 回討論会残額)
前年度繰越金	2,177,123		
合計	3,153,623	1,113,034	

支出の部

項目	R5 年度予算案	R5 年度現状	内容等
通信連絡費	20,000		
振込手数料	-	2,740	事務局分 2,740 円
事務委託費 年間業務費	700,000	534,491	R5.6-8 月分 71,475 円 R5.9-11 月分 392,660 円 R5.12-R6.2 月分 70,356 円
会議費	22,110		
放射線化学討論会援助	200,000	200,000	第 66 回 放射線化学討論会：200,000 円 第 66 回 放射線化学討論会：未執行
先端放射線化学	100,000	-	
若手の会 夏の学校補助	70,000	-	
学会賞	100,000	-	
企画継承委員会経費	75,000	-	
国際交流委員会経費	75,000	-	
編集委員会経費	200,000	59,400	Dropbox 利用料金 (59,400 円)
日本放射線研究連合負担金	50,000	50,000	2032 年度会費：50,000 円
日本化学連合 化学系学協会 連絡会会費	10,000		R6 年度会費：未執行
ホームページ運営費	60,000	7,265	ドメイン利用料金 2,249 円 レンタルサーバー利用料金 5,016 円
予備費	200,000	-	
次年度繰越金	1,271,513		
合計	3,153,623	853,896	

# 本 会 記 事

## 令和5年度入退会希望者一覧

### 入会

会員種別	会員番号	会員名	所属機関名	紹介者
正会員	767	佐藤 健	東京大学工学系研究科	重河 優大
正会員	768	千田 充久	一般財団法人放射線利用振興協会	澤井 友次
正会員	769	小畑 結衣	東京大学工学系研究科、原子力専攻	山下 真一
学生会員	770	北村 剛将	日本原子力研究開発機構	岡 壽崇

### 退会

会員種別	会員番号	会員名	所属機関名	退会日
正会員	218	竹中 康之	北海道教育大学 教育学部函館校	2023/10/30
正会員	483	川井 清彦	大阪大学産業科学研究所 真嶋研究室	2023/12/4
正会員	549	山脇 正人	産業技術総合研究所 つくば中央第5事業所 計測標準研究部門	2023/10/10

令和6年度 日本放射線化学会賛助会員

---

住友電気工業 (株)  
<http://sumitomoelectric.com/jp>

(株) NHV コーポレーション  
<http://www.nhv.jp>

ビームオペレーション (株)  
<http://www.beamope.co.jp>

(一財) 放射線利用振興協会  
<http://www.rada.or.jp>

(株) イー・シー・イー  
<http://www.ece.ebara.com>

(株) ブリッジス  
<http://bridges-jp.com>

ヨシザワ LA (株)  
<http://www.yoshizawa-la.co.jp>

岩崎電気 (株)  
<http://www.iwasaki.co.jp>

量子科学技術研究開発機構  
<http://www.qst.go.jp>

東邦金属 (株)  
<http://www.tohokinzoku.co.jp>

(株) イング  
<http://www.ing-co.jp>

(公社) 日本アイソトープ協会  
<http://www.jrias.or.jp>

(株) 千代田テクノル  
<http://www.c-technol.co.jp>

いいえんじ合同会社  
<http://www.iieng.jp>

---

放射線化学 第117号〈WEB版〉

令和6年4月30日 発行

発行所 日本放射線化学会

〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

国立大学法人 静岡大学 電子工学研究所  
越水研究室内

e-mail: office.jsrc@gmail.com

TEL: 053-478-1329

編集委員長 田口 光正

編集委員 林 慎一郎

青木 祐太郎 伊藤 賢志

宇部 道子 岡 壽崇

熊谷 純 神戸 正雄

佐伯 誠一 竹内 夕桐子

田中 真人 樋川 智洋

藤井 健太郎 増田 明彦

山下 真一

郵便振替口座

長野 00540-9-34599

日本放射線化学会

発行人 高橋 憲司