

放射線化学

RADIATION CHEMISTRY

日本放射線化学会

JAPANESE SOCIETY OF RADIATION CHEMISTRY

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

2023 No. 116

〈巻頭言〉

多様性の放射線化学が未来を作る

〈展望・解説〉

放射線プロセスによる高分子材料の改質ならびに新材料開発

〈とびくす〉

放射線照射によって生じた DNA 損傷の構造解析と修復速度

可視光を 99.98 % 以上吸収する至高の暗黒シート

〈海外レポート〉

32nd Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告

20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20) 参加報告

17th International Congress for Radiation Research (ICRR 2023) 参加報告

〈ニュース〉

第 1 回シンポジウム 一次世代放射線計測に向けた放射線化学のアプローチ 報告

〈会員のページ〉

峯岸 安津子さんを偲んで

吉良さんから教わった基礎科学への心構え

吉良 爽 元高輝度光科学研究センター理事長の思い出

〈本会記事〉

〈賛助会員名簿〉



〈巻頭言〉

多様性の放射線化学が未来を作る 高橋 憲司 1

〈展望・解説〉

放射線プロセスによる高分子材料の改質ならびに新材料開発 大島 明博 3

〈とびっくす〉

放射線照射によって生じた DNA 損傷の構造解析と修復速度
..... 中野 敏彰, 赤松 憲, 鹿園 直哉 15

可視光を 99.98 % 以上吸収する至高の暗黒シート
..... 雨宮 邦招, 清水 雄平, 越川 博, 八巻 徹也 21

〈海外レポート〉

32nd Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告 楠本 多聞 27

20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20) 参加報告
..... 越水 正典 28

17th International Congress for Radiation Research (ICRR 2023) 参加報告
..... 前山 拓哉 29

〈ニュース〉

第 1 回シンポジウム 一次世代放射線計測に向けた放射線化学のアプローチ 報告
..... 中川 清子 31

〈会員のページ〉

峯岸 安津子さんを偲んで 中川 清子 33

吉良さんから教わった基礎科学への心構え 丑田 公規 33

吉良 爽 元高輝度光科学研究センター理事長の思い出 田川 精一 36

〈本会記事〉

〈賛助会員名簿〉



【複写をされる方に】本誌に掲載された著作物を複写する場合は、著作権者から複写権の委託を受けている一般社団法人学術著作権協会（〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 8F, TEL 03-3475-5618, FAX 03-3475-5619, E-mail: info@jaacc.jp）から許諾を受けてください。ただし、アメリカ合衆国における複写については、Copyright Clearance Center Inc. (222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923, USA. TEL (978)750-8400, FAX (978)750-4747; www.copyright.com) へ。

Houshasenkagaku (Radiation Chemistry)
(116)1–44(2023)

Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry
“Radiation Chemistry”
No.116, October 2023

Preface

The power of diverse radiation chemistry builds the future ····· Kenji Takahashi ··· 1

Reviews

Modification of polymeric materials and development of new materials using radiation processing
····· Akihiro Oshima ··· 3

Topics

Structural analysis and repair kinetics of radiation-induced DNA damage
····· Toshiaki Nakano, Ken Akamatsu and Naoya Shikazono ··· 15

Supreme-black sheet that absorbs more than 99.98 % of light
····· Kuniaki Amemiya, Yuhei Shimizu, Hiroshi Koshikawa and Tetsuya Yamaki ··· 21

Overseas

Report of the 32nd Miller Conference on Radiation Chemistry ····· Tamon Kusumoto ··· 27

Report of 20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20)
····· Masanori Koshimizu ··· 28

Report of the 17th International Congress for Radiation Research (ICRR 2023)
····· Takuya Maeyama ··· 29

News

Report of the first Symposium –Approach of radiation chemistry toward the next radiation
measurement–
····· Seiko Nakagawa ··· 31

From Members

Memory of Dr. Atsuko Minegishi ····· Seiko Nakagawa ··· 33

A stance for basic science: What I learned from Dr. Kira. ····· Kiminori Ushida ··· 33

Memories of Dr. So Kira, former director of the Japan Synchrotron Radiation Research Institute
····· Seiichi Tagawa ··· 36

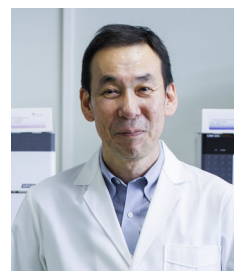
Announcements

List of Support Members

多様性の放射線化学が未来を作る

金沢大学 理工研究域 生命理工学系

高橋 憲司*



2023 年より、日本放射線化学会の会長を拝命しました。会員の皆様と放射線化学の活動を一層活発に行うために、皆様のご協力をお願い致します。

最近読んだ本に「多様性の科学」(マシュー・サイド著、2021 年初版、2022 年第 12 刷、10 万部発行)というのがあります。「画一的で凋落する組織、複数の視点で問題を解決する組織」というサブタイトルが付けられています。画一的組織の例として米国 CIA が挙げられています。なぜ CIA か？それは、極めて機密性の高い世界中のテロリストに関する情報を把握している CIA が、何故あの旅客機 2 機が世界貿易センタービルに激突するという、9.11 の惨事を事前に防げなかったのかという点にあります。その原因は CIA 組織の「画一的集団性」にあるという事を見事なまでに描いています。今でも鮮烈に覚えています。私は 9.11 の日に、依頼講演のためにシカゴ・アルゴンヌ研究所からノートルダム大学への運転中で、ラジオからの映画のような説明を聞いても、何が起きているのか全く理解できないでいました。

このような例を出したのは、現在の日本放射線化学会が「画一的な集団」になっていないかという危惧です。討論会のプログラムを見る限りは画一的ではないです。しかし、放射線化学会の持つ「多様な科学」のコミュニティーの意見交換・議論は十分でしょうか？そして、視点を世界へ向けると Miller 会議、Tihany 会議、懐かしき Gordon 会議において、日本の放射線化学の活動・存在を多様なメンバーが示してきたでしょうか。

一方で、2050 年へ向けて、放射線化学という学術が貢献できることを具体的に示すチャンスが来ている、間違いなく。

それらは宇宙開発であるし、核融合、脱炭素・カーボンニュートラル、先進医療、生成 AI、新素材、再生可能エネルギー、生物多様性、フードロス、そして処理水問題などです。これらの全てに放射線化学が関与できます。そのためには、多様なステークホルダーを巻き込み、現場の声を聞き、放射線化学は何ができるかを説明する必要があります。

この原稿を書いているのは 2023 年 10 月 6 日で、放射線化学会総会が終わった直後です。その時に、放射線化学会の今後の活動として 2 つの提案をしました。1 つは放射線化学を広く宣伝するためのパンフレットの作成、もう 1 つはグローバルな放射線化学コンソーシアムを作ること。

放射線化学を知らない人に、「放射線化学とは何か」を極めて明確にわかりやすく説明するパンフレットを作りたいと考えています。さまざまな生産分野の現場の方々、消費者の方々、教育機関の方々、経産省・文科省の方々へ説明するインパクトのあるパンフレットを作りたいのです。放射線化学のさまざまな基礎・応用研究を「今の社会に受け入れてもらうこと。放射線化学は人々を幸せにしているのですね。」という活動が必要なのです。皆さんで放射線化学の未来ビジョンを作り、そのために必要なインプットつまり研究活動を考えていくことです。大切なことはシーズプッシュではなくて、未来ビジョンからバックキャストして考えることです。

また、海外の放射線化学の研究者をつなげるコンソーシアムを作りたいと考えています。今や Zoom で会議をするのは当たり前になりました。世界中の放射線化学の人々と簡単に画面越しにリアルで話をすることができます。世界中の放射線化学の人々と地道に会話を続けて、「日本放射線化学会」が「世界放射線化学会」へと発展することは必ずしも不可能でないと思います。できればこれを、皆さんと「共創」して成し遂げたいと考えていますので、皆さんとのコミュニケーションをお願いします。

The power of diverse radiation chemistry builds the future
Kenji TAKAHASHI* (Kanazawa University),
〒920-1192 金沢市角間町
TEL: 076-234-4828, FAX: 076-234-4829,
E-mail: ktkenji@staff.kanazawa-u.ac.jp

放射線プロセスによる高分子材料の改質ならびに新材料開発

大阪大学 大学院工学研究科 大島 明博*

In this review, I will explain that the irradiation effect, which is the basis of the radiation processing, is divided into the conditions on the radiation source and the conditions on the target material sides, and the induced chemical reactions are different. In the development of materials by modification of polymers using radiation processing, the phenomena induced by radiation vary depending on irradiation conditions such as irradiation temperature, irradiation atmosphere, and the types of radiation, as well as the stereo-regularity, morphology of polymers to be irradiated. In addition, there are a wide variety of polymeric materials that are industrially used, and in fact, they contain trace amounts of various additives such as antioxidants, fillers, and stabilizers. Appropriate conditions must be set for application to actual industrial processes, but no catalysts or reaction initiators are required, and chemical reactions can be directly induced by radiation. The radiation processing has strong potential for industrial development as “blue process” that clears environmental issues such as restrictions and regulations on the use of chemical substances worldwide.

Keywords: radiation processing, modification, irradiation condition, blue process

1 はじめに

量子ビーム（放射光、電子線（EB）、イオンビーム等の放射線）は、最先端計測ツールやがん治療/診断等の医療分野での利用はもちろんのこと、さまざまな産業

分野においても幅広く利用されている。高分子材料の改質に関しては、1928年にUSAのGoodrich Companyにより特許出願がなされたゴムの架橋¹⁾が始まりであり、その後、1952年にCharlesbyによる原子炉からの炉内放射線を用いたポリエチレン（PE）の放射線架橋が報告²⁾され、本格的な放射線の産業利用研究が進められ、1970年代に、ポリエチレンの放射線架橋による耐熱性の向上やその発泡体の製造、あるいは塗膜の硬化処理等において放射線の工業利用が進展した³⁻⁵⁾。近年では、航空機用ジェットエンジンのシュラウドに用いられているセラミックマトリックスコンポジット（CMC）の強化繊維である炭化ケイ素（SiC）製造に、ポリカルボシランの放射線架橋による不融化技術⁶⁻⁸⁾が利用されているほか、放射線グラフトによる機能性繊維の製造販売⁹⁾などが行われている。

直接イオン化が可能な放射線による改質プロセスは、従来、触媒や反応開始剤等を必要とした各種有機化学合成や有機材料への機能性付与、高分子間の架橋等による改質等をクリーンに高効率で行うことが可能である。また、マテリアルインフォマティクスから想起される新素材開発においても、触媒が不要で化学反応を誘起できることから、比較的短時間で合成できる等の利点がある。さらには、近年、EUのREACH規制やストックホルム条約等により、各種化学物質の使用制限や規制が進められており、従来のグリーンプロセスを超えた次世代の省エネルギー・低環境負荷のブループロセスとして放射線プロセスに注目が集まっている。本稿では、量子ビームによる高分子材料の改質ならびに新材料開発に関して理解しておく必要があるポイントならびに最近のトピックを交えて概説する。

2 架橋/分解による改質

2.1 放射線誘起化学反応～架橋と分解～

放射線照射による高分子材料の特性の変化は、主にその化学作用によって誘起され、イオン化、励起および、化学結合の解離によるラジカルなどの中間活性種

Modification of polymeric materials and development of new materials using radiation processing
Akihiro OSHIMA* (Graduate School of Engineering, Osaka University),
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 フロンティア研究棟1号館204
E-mail: ooshima.akihiro.eng@osaka-u.ac.jp

の生成がある。続いて、イオン分子反応、ラジカル反応によって共有結合の解離、結合の生成等が起き、分子鎖の切断（分解）、側鎖の解離、分子鎖間の橋掛け（架橋）が起きる。架橋および、切断（分解）の G 値（それぞれ G_x , G_s ）は、照射温度、照射雰囲気、線種の違いによる影響を受けるほか、対象の分子の立体構造、分子形態の違いによる影響を受けることが示されている¹⁰⁾。照射により、架橋と切断反応は、それぞれ同時に起きており、真空中・室温における照射により求められるそれぞれの G 値の G_x/G_s 比が 1 以上であれば、架橋型、1 未満であれば、分解型とされている。

2.2 照射温度の影響

架橋型に分類される PE は、結晶融点 (T_m) を超える温度での γ 線照射により、 G_x は室温照射に比べ 20 % 程度増加するが¹¹⁾、ポリプロピレン (PP) は、 T_m 以上の温度（たとえば 180 °C）で G_s がわずかに増加する^{12,13)}。また、ポリスチレン (PSt) は、室温では、放射線照射により架橋と切断が同時に起き、室温での G_x , G_s は、それぞれ、0.041, 0.016 であり、 G_x/G_s 比は、1 以上で架橋型に分類されるが、PSt のガラス転移点 (95 °C) 以上の温度では、 G_x (0.018@100 °C) は、減少するとともに、切断の G_s (0.060@100 °C) が増大し、 G_x/G_s 比は 1 未満となり、切断が支配的に起きる^{10,14-16)}。さらには、ポリサルフォンは、室温照射では架橋と切断が同時に起きるが、そのガラス転移点以上の温度（たとえば 200 °C）での照射では、架橋反応が優先する¹⁷⁻¹⁹⁾。一方、エポキシ樹脂、アクリル樹脂の PMMA やフッ素樹脂のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 等の切断型に分類される高分子は、77 K の液体窒素温度や 4 K の液体ヘリウム温度での γ 線照射では、室温照射に比べ、その力学特性の低下や分解ガスの発生量が 1/5-1/25 となり反応が抑制される²⁰⁻²³⁾。また、PTFE は溶融までは分解反応が優先し、分子運動の促進によって、 G_s (3.5@R.T. \rightarrow 18@300 °C) が増加していく²⁴⁾ が、融点直上の温度域で架橋が優先的に起きる。以上のように、照射温度の違いにより、架橋/切断反応の優位性が変化するほか、反応効率が変化する。つまり、照射時の温度によって、対象の高分子材料の分子運動性が異なり、その結果、誘起された活性種の反応のダイナミクスが影響を受けることでそれぞれの化学反応の優位性や反応効率が変化する。

2.3 照射雰囲気の影響

架橋型の高分子をアセチレンガス中で放射線照射を行うと架橋反応が加速されることはよく知られている

が、酸素や酸化窒素ガス中では、架橋が阻害されるばかりか、主鎖切断が促進される。典型的な架橋型高分子の PE も酸素雰囲気の下では主鎖の切断が支配的になる。これは、放射線により生成したラジカルに酸素が優先的に結合し、これが主鎖の切断反応を誘起するためである。線量率が一定であれば、高分子内での酸素の拡散係数の大きなほど、酸素が高分子内に入っていくやすく、切断が促進される。化学架橋/放射線架橋でゲル化した PE を酸素が内部まで十分に拡散するような低線量率で照射を行うとゲルが破壊される。一方、高線量率であれば、酸素が PE 内部へ拡散しないため、表面層は、放射線酸化されるが、内部は架橋する。また、PP や PTFE 等も酸素雰囲気下では主鎖の切断が促進され、同時に多量の酸化分解生成物が生成する。水素ガス中での放射線照射では、PE や天然ゴムなどの架橋型の高分子も架橋反応の抑制が起き²⁵⁻²⁷⁾、これは、誘起されたラジカルと水素が結合し反応を抑制することを意味している。以上のように、照射雰囲気の違いにより反応が異なり、特に酸素雰囲気では、放射線酸化が優先され切断反応が優先する。

2.4 立体構造/分子形態の影響

非晶/結晶の分子形態の異なるシンジオタクティック PSt とアタクティック PSt 対して、 γ 線照射した場合、40 °C での非晶化シンジオタクティックの G_x は、アイソタクティックの G_x の約半分である。また、分解ガスは、水素が主成分であり、室温未満の温度では立体構造/分子形態の異なる試料全てで水素ガス発生のための活性化エネルギーが温度に存在せず、高速かつ non-scavengeable なプロセスである。一方、室温を超えると、水素ガスの発生は温度に依存する熱プロセスとなり、2.1 項に記述したように分子運動が重要な役割を果たす¹⁶⁾。また、シリコンウェハに分子量 100k のシンジオタクティック、アタクティック、アイソタクティックの各種 PMMA をスピンコートした薄膜試料に対して、SPRiNG-8 BL27SU からの極端紫外線 (EUV) 照射および、EB 描画装置による 30 keV, 75 keV の EB 照射を行い、 E_0 感度（照射後の現像によりレジスト膜厚が 0 になる照射線量; dose-to-clear）の評価を行った結果、シンジオタクティックの感度が最も悪いことが明らかになった²⁸⁾。Figure 1 は、EB リソグラフィの結果である。LER (Line edge roughness) には、立体構造の影響はほとんど観察されず、14 nm 程度であったが、 E_{50nm} 感度（50 nm 幅のパターン露光後、現像により 50 nm 幅のレジスト膜厚が 0 になる照射線量; dose-to-size）は、 E_0 感度と同じように、シンジオタ

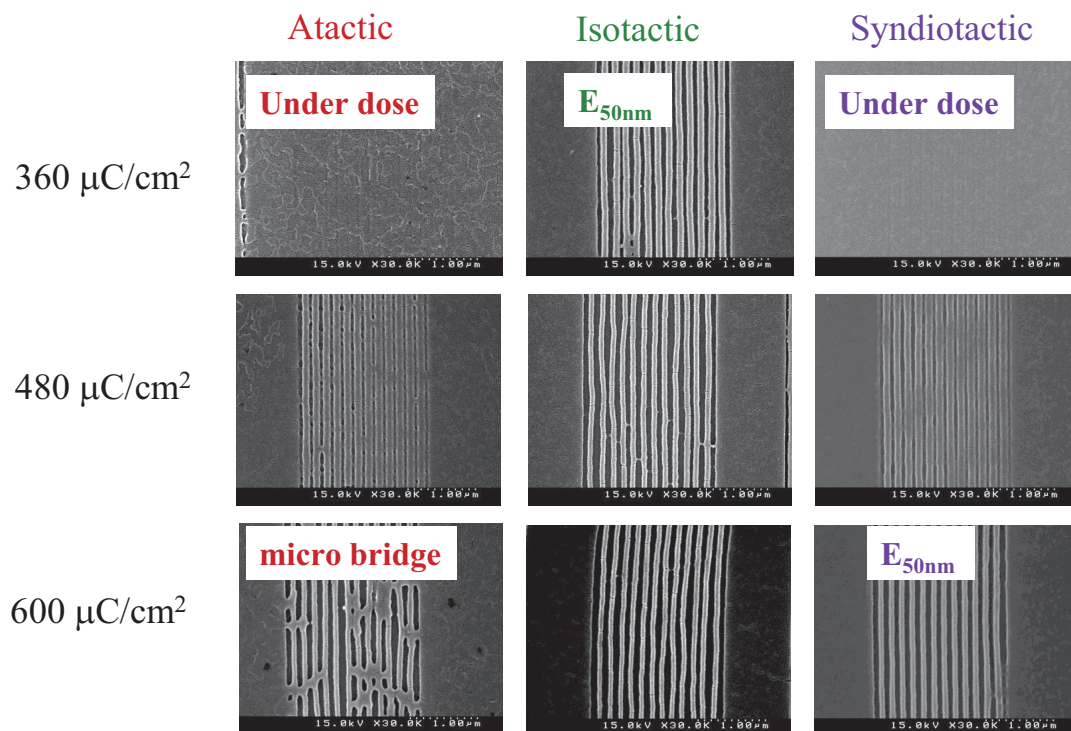


Figure 1. SEM image of PMMA after patterning by 30 keV EB lithography; pattern design: Line/Space = 50 nm/100 nm.

クティックのものが最も悪くなったが、パターン精度は、最もよいことがわかる。これは、PMMA分子の立体構造の影響がリソグラフィ特性に影響を及ぼすことを意味している。以上のように、立体構造/分子形態の違いにより、架橋/分解やガス発生等の反応効率が異なり、同一材料であっても反応効率が異なることが観察される。

2.5 線種の影響

γ 線やEBでは線質効果は基本的にないが、高LET線では、線質効果が生じる。ポリシランにEB・ γ 線を照射した場合、切断反応が優先的に起きるが、高LETのイオンビームを照射すると架橋が起きる²⁹⁻³¹⁾。また、ポジ型(切断型)のEBレジスト材料のZEP(α クロロメタクリレート- α メチルスチレン共重合体)に、イオンビームを照射すると高密度励起によりポジ-ネガ反転が起きる³²⁾。その他、大気中で高LETの C^{6+} ビームをPTFEに照射した場合、酸素存在下にもかかわらず、Braggピーク近傍で架橋反応が起きていることが ^{19}F -NMR解析から明らかになっている³³⁾。また、100 keV未満のEBでは、物質内の電子との相互作用

が大きくなり、急激にエネルギーを損失するため、この時のLETは、高エネルギーの電子に比べ数倍になり、同一フルエンスであれば、単位時間あたりの吸収線量が高くなる。

2.6 放射線プロセスによるマイクロパウダーの製造

PTFEは、耐熱性、耐薬品性、耐候性に優れ、低摩擦係数、非粘着性、高電気絶縁性等の優れた特性を持ち、電子・電気部品をはじめ、各種摺動部材、防寒着やフライパン等の表面コーティング、人工臓器の部品等として広範囲の産業分野で使用されている。従来は、室温大気中でPTFEを γ 線照射することで酸化分解し、マイクロパウダー化することで、添加剤や潤滑剤として使用しており、その市場規模は、2018年時点で4億USドルになる³⁴⁾。しかし、副次生成物として、パーフルオロオクタン酸(PFOA)を含むPFAS(パーフルオロアルキル化合物、ポリフルオロアルキル化合物および、これらの塩類・パーフルオロ酸化物の総称)が生成する。特に、2020年7月に施行された欧州REACH規制³⁵⁾により、製品中に含有されるPFOAが25 ppb

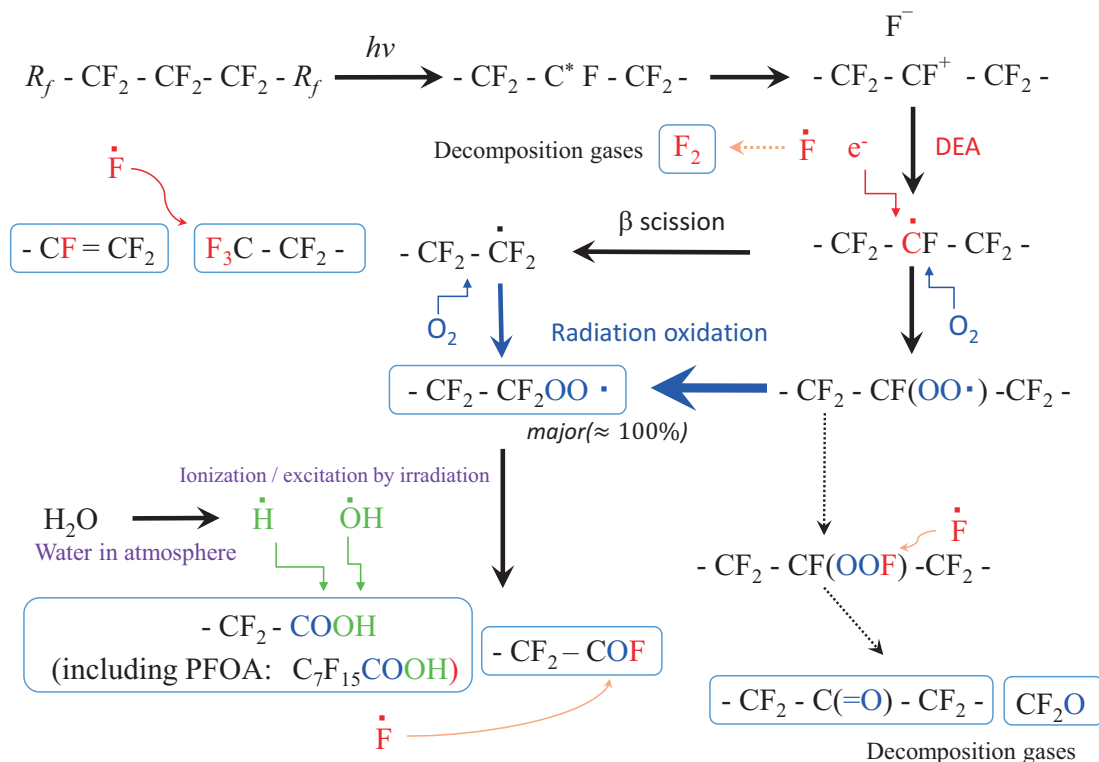


Figure 2. PFOA/PFAS induced mechanism from PTFE irradiated under atmospheric fields.

以上の場合、製造、移動、販売のすべてが禁止されたこと、さらには2020年4月から、POPs条約（残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約）^{36,37)}により、PFOA自体が規制された。従来製法では、法令で定める規制値（25 ppb）以上のPFOAが生成する。残留PFOAを別途熱処理により揮発除去することは可能であるが、この方法は、REACH規則においては、完全に法令違反であり、根本的にPFOA/PFASが生成しないプロセス構築が必須である。著者らの研究チームでは、PFOA/PFASの生成機構を明らかにするとともに、規制をクリアする放射線プロセスの構築を行ったので、本項で紹介する³⁸⁾。

PFOA/PFASの生成機構は、大気下ならびに酸素フリー下での放射線照射後のPTFE残存ラジカルの熱処理による挙動と残留PFOA/PFASの分析結果から、Fig. 2に示すようなモデルが提案でき、照射によりPTFE分子に生成捕捉されたラジカルのうち、分子鎖末端ラジカルがPFOA/PFAS誘起に主要な働きを占めていることが明らかになった。以上の反応機構からPFOA/PFASフリーのPTFEマイクロパウダーを製造するためには、酸素フリーにて照射処理を実施すれば

よいことになる。しかしながら、得られたマイクロパウダー中には、アルキルラジカルと分子鎖末端ラジカルも同時に存在しており、照射直後、大気下に暴露すると、それぞれのラジカルは、大気中の酸素と優先的に反応し、アルキル型ならびに末端型の過酸化ラジカルとなる。末端型の過酸化ラジカルは、室温保管においても時間経過とともに主鎖切断を誘起し、PFOA/PFASを形成する。特に、照射直後の分析では検出感度以下PFOA濃度であったとしても大気中で加熱された場合、25 ppb以上の濃度のPFOAが発生してしまう。

したがって、PFOA/PFASフリーのマイクロパウダーが得るためには、分子鎖末端ラジカルの失活処理を行う必要があり、Table 1は、酸素フリーで照射後、PTFEの α 分散温度（130℃）以上の150℃で熱処理を実施し、ラジカル処理を行った場合のPFOA濃度と溶融粘度の関係を示している。ここで、 α 分散とは、非晶部位ならびに結晶界面付近の運動が活性化する運動モードを示している。本試料を大気中で加熱しても、18ヶ月以上室温で保管しても、PFOAは検出感度以下の濃度であり、酸素フリーにて照射するだけでなくラジカル失活処理をプロセスに組み込むことで各種環境法令

Table 1. Amount of emitted PFOA and melt viscosity. γ -Rays irradiated at room temperature with a dose of 400 kGy under vacuum. Heat treatment was conducted at 24 °C and 150 °C under vacuum over 24 hours.

| Treated temperature (°C) | Amount of PFOA (ppb) | Melt viscosity (Pa s) |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| 24 | 25.6 | 2.9×10^4 |
| 150 | Not detected | 1.8×10^4 |

* The detection limit under these experimental condition is less than 5 ppb.

規制をクリアする放射線プロセスが構築できる。

3 グラフトによる改質・機能性付与

3.1 同時グラフト法と前照射グラフト法

放射線グラフトによる機能性付与には、同時グラフト法および、前照射グラフト法の2つの方法に大別される。どちらの方法も基本的に基材となる幹分子に耐放射線性が必要である。同時グラフト法は、(1) 幹分子の活性種寿命に依存せず、最表面層のみ反応する、(2) 反応が瞬時（高い生産性）であるなどの利点がある一方、(1) 高いグラフト率が得難い、(2) EBなどの照射装置が必要である、(3) ホモポリマーの生成が無視できないなどデメリットがある。

前照射グラフト法は、(1) 照射は委託が可能（低コスト化、つまり照射装置導入が不要）である、(2) グラフト率の制御が反応時間と温度で可能であるなどのメリットがある一方、(1) 活性種寿命に依存（寿命管理のため低温保管が必要）するなどのデメリットがある。後グラフト反応においては、さらに、捕捉ラジカル法と過酸化ラジカル法があり、両者の違いは、照射後、酸素を試料に導入し、物質中に生成した活性種（捕捉ラジカル）を酸化させることで過酸化ラジカルに変換し、それを反応開始点としてグラフト重合した場合かどうかである。ただし、いずれの方法とも被機能付与物に形状の制限があるため、グラフトされる基材は、フィルム/シート、繊維/不織布等の成形体が多く、複雑な成形構造体では、機能化処理が難しいという問題点をもつ。

同時グラフト法による材料開発例としては、セルシード社の細胞培養シート基材³⁹⁾があげられる。前照射グラフト法による材料開発例としては、ボタン電池のセパレータが有名であるが、これは、PEを放射線架橋し、それを基材として放射線照射後、ラジカルを

冷凍保存し、アクリル酸をグラフトすることで得られる⁴⁰⁾。その他、スーパークリーンルーム用の空気清浄ケミカルフィルタ⁴¹⁾、セシウム/ストロンチウム吸着繊維⁴²⁾等が工業化されている。

3.2 フィルム・シートへのグラフトによる材料開発

3.2.1 高分子電解質膜 (PEM)

化学合成で得られる DuPont 社（現：Chemours）の Nafion[®]が、高分子電解質膜（Polymer Electrolyte Membrane / Proton Exchange Membrane: PEM）として有名であり、燃料電池や、食塩製造、アクチュエータ等に用いられているが、Nafion[®]は、高価であり、ガスバリア性が低く、イオン交換基の数を大きく変化できないなどの問題点があり、より安価かつ高性能な PEM が求められている。放射線グラフト法は、イオン交換基濃度の制御がグラフト率で制御でき、基材の特性と組み合わせることで、安価で高性能な PEM の製造が可能なプロセスであり、パーフルオロ系の高分子に炭化水素系スルホン酸基を放射線グラフトすることで部分フッ素化 PEM が得られる。もちろんパーフルオロ系スルホン酸基をグラフトすることも可能であるが、原材料費が高額になるため工業化のためには原材料費を安価なものにする必要がある。

Figure 3 は、PTFE の放射線架橋技術を応用してポリマーアロイ化した材料（PTFE とパーフルオロアルコキシアルカン（PFA）からなるポリマーアロイ: FA2）を基材として放射線グラフトにより得られた部分フッ素化 PEM を用いた固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFC）の発電試験結果であり、市販の Nafion[®]に比べ、10 % の出力が向上している⁴³⁾。また、PEFC の発電には、三相界面（電極/PEM/燃料）の形成が重要である。放射線グラフト膜を PEM とした場合、バインダー物質との相溶性の問題があり、相溶性を改善するため、バインダーに用いるアイオノ

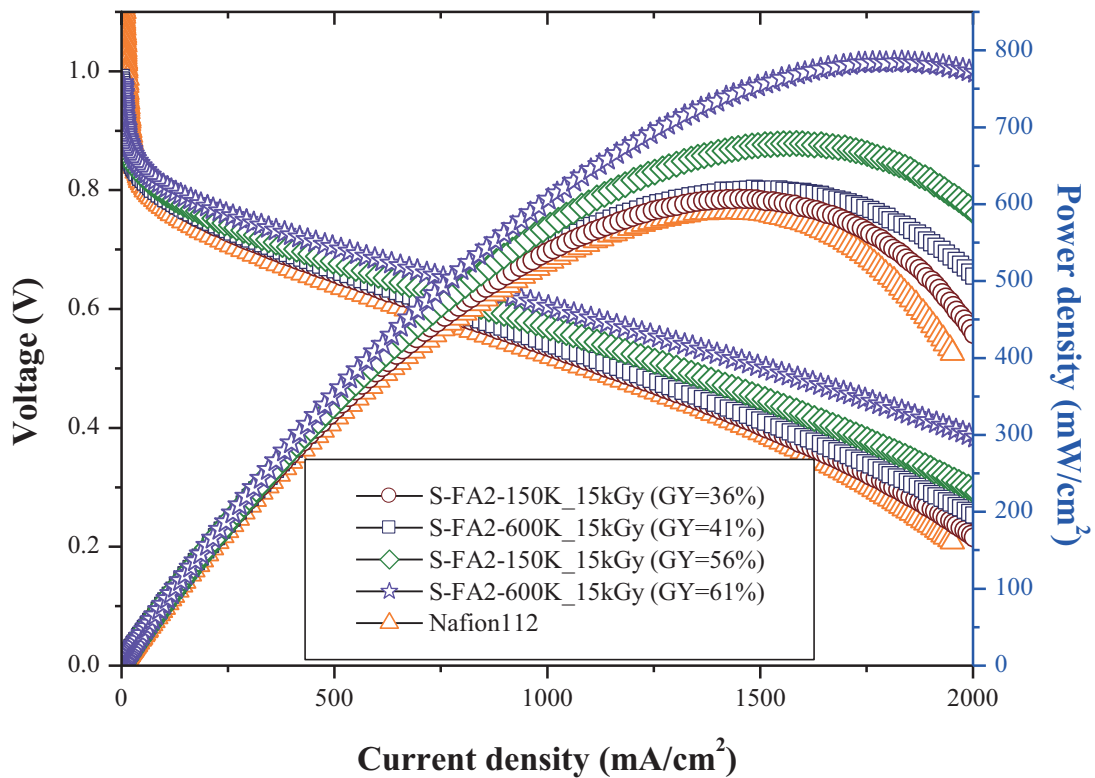


Figure 3. The polarization curves at 60 °C for sulfonated FA2 (S-FA2). FA2: polymer-alloy consist of PTFE and PFA; gas flow: H₂ (wet) 50 mL/min, O₂ (dry) 50 mL/min; gas pressure: 0.2 MPa; bubbler temperature: 60 °C.

マーと放射線グラフトによる部分フッ素化 PEM のハイブリッド材料について紹介する^{44,45)}。ハイブリッド型 PEM “FN” は、バインダーに用いる Nafion®系のアイオノマーに対して、テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロプロピレン共重合体 (FEP) にスルホン化スチレンを放射線グラフトしたフィルム (sulfonated PS-g-FEP) を微粒子化 (平均粒径 22 μm 程度) して添加し、キャスト法により成膜して得た。Table 2 はセル温度 60 °C, 相対湿度 16 % で発電した時の結果をまとめたものである。FN の系に関してはいずれも、500 mA/cm^2 における出力密度, 最大出力密度共にベースとなる部分フッ素化 PEM よりも高い出力が得られ、高い順に FN10, FN20, FN50 であった。特に FN10 では、最大出力は 1 W/cm^2 を示し、市販品の 2 倍近い性能を示した。また開回路電圧 (Open Circuit Voltage: OCV) は、キャスト法により Nafion®アイオノマーから成膜した Nafion®-cast を除き、900 mV 以上であり、三相界面の形成が十分なされていると判断できる。

人工筋肉や能動カテーテル等の医用分野への応用が

期待されている ionic polymer-metal composites (IPMC) は、電極を PEM の両面に配置したものであり、PEFC 同様 Nafion®が広く用いられている。アクチュエータの動作にはカソード・アノード間の、イオン伝導と水和水の移動が重要であり、イオン伝導モデルが、Grotthuss 機構メインのスチレンスルホン酸型 PEM よりも Vehicle 機構メインのアクリル酸型 PEMの方がアクチュエータの PEM にふさわしいことが報告されている⁴⁶⁾。パーフルオロ系共重合体に放射線グラフト法により合成したアクリル酸 (カルボン酸) を PEM とするアクチュエータの性能を評価した結果を Fig. 4 に示す。市販の Nafion®を PEM とした場合、3.9 mm の変位であったが、アクリル酸のイオン交換容量 (Ionic Exchange Capacity: IEC) が約 3 meq/g 以上のものは、基材の種類 (エチレン-テトラフルオロエチレン共重合体 (ETFE)・FEP) にかかわらず、高い変位を示し、IPMC アクチュエータの PEM として有用であるといえる。

Table 2. Cell performance of the hybrid membrane at 60 °C operations.

| Membrane | Amount of ionomer (wt%) | OCV (mV) | Power density (mW/cm ²) | |
|---------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------------|------------|
| | | | at 500 mA/cm ² | peak power |
| FN50 | 50 | 948 | 308 | 523 |
| FN20 | 80 | 972 | 343 | 806 |
| FN10 | 90 | 956 | 349 | 1003 |
| sulfonated PS-g-FEP | — | 952 | 325 | 674 |
| Nafion [®] -cast | 100 | 822 | 336 | 899 |
| Nafion [®] 112 | — | 970 | 320 | 467 |

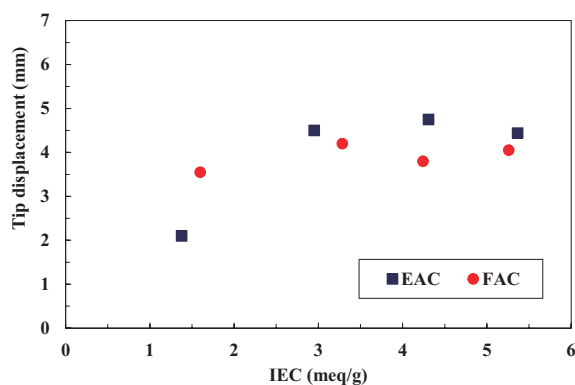


Figure 4. Relationship between IEC and tip displacement. EAC: ETFE based PEM; FAC: FEP based PEM. Operation at 10 V under atmosphere.

3.2.2 表面改質

高分子材料の表面改質は、主に光開始剤と組み合わせた紫外線処理、コロナ放電やプラズマ処理等によるプロセスのほか、最表面層のみで反応する同時グラフト法によるプロセスが主流である。紫外線処理法では、材料中に光開始剤が残るため、使用中の着色や光開始剤由来の劣化が起き、耐久性の改善が必要である。一方、プラズマ処理や同時グラフト処理は、最表面層のみへの効果であり、通常の繰り返し使用によって機能・性能が持続せず、耐久性が低い。

ここでは、100 keV 未満の EB によるエネルギー付与の深度プロファイルを利用した前照射グラフト法によ

る表面改質について紹介する。100 keV 未満の EB は、物質内の電子との相互作用が大きくなり、急激にエネルギーを損失するため、照射試料表面の局所的な領域に不均一なエネルギー付与を行うことが可能になる。この結果、従来、放射線グラフトに適用できなかった低耐放射線性の高分子にも適用できることになる。たとえば、撥水・撥油性に優れる PTFE の場合、50 keV の EB では、真空中、材料表面から飛程長の 10 μm 程度（実質的には 5 μm 程度）の範囲のみに化学反応を誘起することができ、基材の機械的特性を損なわずに改質できる⁴⁷⁾。Figure 5 は、厚さ 500 μm の PTFE シートに対して、真空中で 50 keV の EB を照射後、過酸化ラジカルグラフト法でスチレンを表面にグラフトした時のシクロヘキサンとの相溶性の評価を行った結果である。写真からわかるように、シクロヘキサンに浸漬後、引き上げて 30 秒経過した表面は、(b) の改質していない未処理面 (PTFE) では、シクロヘキサンは相溶性がなく撥液して PTFE 由来の性質が表れている。一方、スチレンをグラフトした改質面 (a) では相溶し、濡れていることがわかる。

3.2.3 温度応答材料

東京女子医科大学の岡野教授が構築した技術をもとに設立された(株)セルシードにおいて、細胞培養用器材が製造・販売されている。これらは、主にポリスチレン皿に温度応答性を示す *N*-イソプロピルアクリルアミド (NIPAAm) を同時グラフトすることで得ているが、グラフトのための吸収線量が数百 kGy⁴⁸⁾ 要すること、ホモポリマーの生成やグラフト層の制御ができないことなどから、著者らの研究チームでは前照射法による検討を行った。

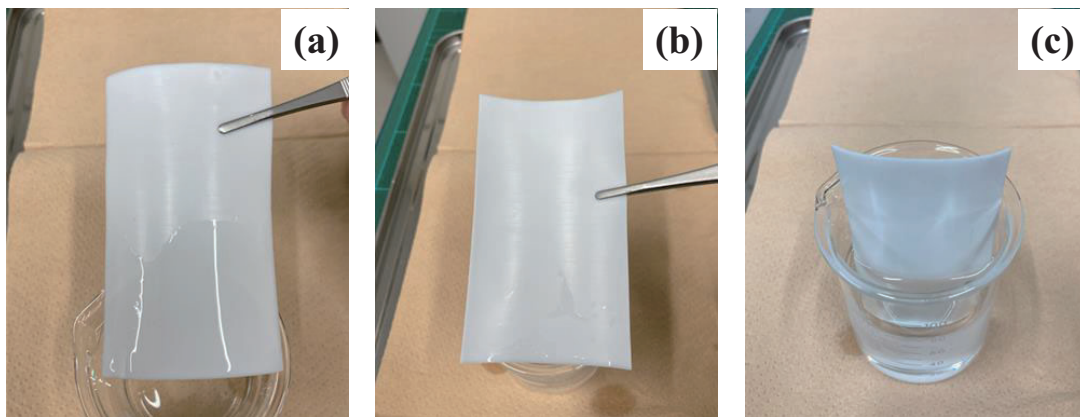


Figure 5. Compatibility of surface modified PTFE and non-modified PTFE. Target solvent: cyclohexane. (a) Grafted PSt-g-PTFE surface, (b) non grafted PTFE surface (c) immersed state of PTFE in cyclohexane for compatibility test.

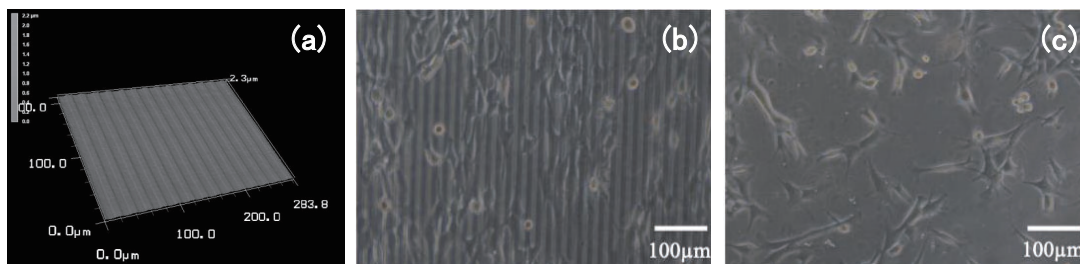


Figure 6. Laser microscopic images of p-TRCCM (a) and phase-contrast microscopic image of C2C12 cells cultured on p-TRCCM (b) and TRCCM (c)⁵⁰⁾.

基材には、ラジカルの G 値が 2.0 の ETFE を用い、過酸化ラジカル法にて、NIPAAm をグラフト重合させ、温度応答性細胞培養用膜 (Temperature-Responsive Cell Culture Membrane: TRCCM) を作製した⁴⁹⁾。水の接触角は、約 30 °C で温度応答性を示し、37 °C、CO₂ 下濃度 5 % の環境で 2 日間培養した C2C12 細胞 (マウス骨格筋芽細胞) は、20 °C で、TRCCM から剥離することが確認でき、前照射による放射線グラフトでも細胞培養用器材として利用できる。

さらに、本方法で得られた TRCCM は、グラフトした NIPAAm 層を反応時間で制御できることから、ナノインプリントリソグラフィ (NIL) を利用して、微細構造を付与することができる⁵⁰⁾。Figure 6 に、ピッチ 20 μm のライン&スペースパターンのもールドを用い、熱 NIL した TRCCM (p-TRCCM) のレーザー顕微鏡写真と、p-TRCCM 上に C2C12 細胞を培養したもの

時の位相差顕微鏡写真を示す。比較のために、従来の平面形状の TRCCM 上で培養した写真も示す。従来の TRCCM 上で培養した場合、細胞成長はランダムなのに対し、p-TRCCM 上に培養した場合は、パターンに沿って細胞成長が進んだことから、特異な細胞シートの培養等の応用に期待できる。

3.3 ペレット/粉末等原料へのグラフトによる材料開発

前項 3.2 では、成形体への放射線グラフトによる材料開発について述べたが、本項では、原料その物への放射線グラフトによる新素材開発について紹介する。UV-NIL 用の高分子モールドとしては、ポリエチレンテレフタレート (PET) やポリカーボネート (PC) などの透明な高分子が使用されているが、これらを使用する場合、フッ素系やシリコン系の離型剤を定期的

に使用する必要がある。離型性の高いパーフルオロ系高分子そのものでは、UV 領域に吸収を持つため、そのままではモールドとして使用できないため、シート基材に、パーフルオロポリエーテル (PFPE) 等を放射線グラフトすることで離型剤フリーのモールド基材を作製することができるが⁵¹⁾、2 層構造になるとともに、数十 wt% のグラフト率が必要となる。そこで、原料自体に放射線グラフトすることで、低グラフト率であっても新たな材料特性を発現する機能性素材の開発を検討した。

光透過性の高いシクロオレフィンポリマー (COP) の原料ペレットに対して、フッ素系モノマーをグラフトさせた後、ヒートプレスによる熱成形を行い、厚さ 500 μm のシート形状に加工した。C6 オレフィン-g-COP ペレットを成形したシート表面の *n*-ヘキサデカンの接触角は、50° であった。COP シートの *n*-ヘキサデカンの接触角は、16° であり、成形した後も撥油性が付与されていることがわかる。また、この時の光透過性率は、i 線で 70 % 以上を保持し、g 線では、80 % 以上であり、良好な光学特性を保持している。熱 NIL 法にて、モスアイ構造を本シートに転写した結果を Fig. 7 に示す。得られたモールドを用いて i 線の UV-NIL を実施した結果、離型剤フリーでの転写が可能であり、離型剤フリーの高分子モールドを作ることができた⁵²⁾。以上のように、ペレットに対して放射線グラフト法による機能性付与を行った後に成形することで、機能化が困難であった複雑な成形体についても適用可能となり、放射線プロセスの技術適用範囲が広がる。

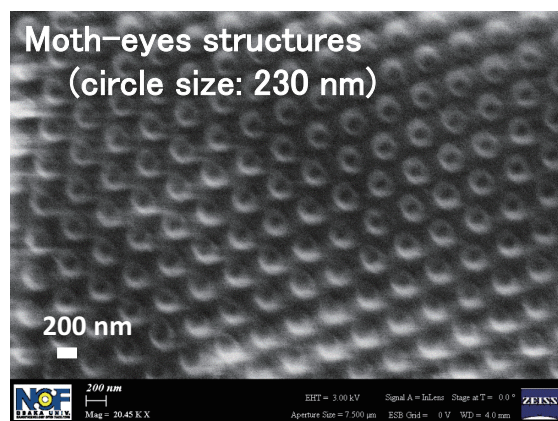


Figure 7. SEM image of moth-eyes patterned C6 olefin-g-COP mold. GY:0.03 wt%.

4 まとめと展望

本稿では、放射線プロセスの基礎となる放射線照射による照射効果について、線源側の条件と、対象材料側の条件に分けて、誘起される化学反応が異なることを第 2 節にて解説した。放射線プロセスによる高分子材料の改質による材料開発においては、照射温度、照射雰囲気、線種等の照射条件のほか、照射対象となる高分子材料の立体構造、分子形態の違いにより、放射線で誘起される現象が異なる。加えて、工業利用されている高分子材料は、多種多様であり、実際には、酸化防止剤、充填剤や安定剤などの各種添加物が微量に含まれており、実際の工業プロセスに適用する上で、適切な条件設定が必要であるが、触媒や反応開始剤が不要で、直接的に化学反応を誘起できる放射線プロセスは、世界的な化学物質の使用制限や規制等の環境問題をクリアするブループロセスとして工業展開が強く期待できる。

第 3 節では、放射線グラフト法による各種改質/機能化について、事例をあげて紹介した。従来の産業利用されている放射線グラフト法は、複雑な成形構造体では、機能化処理が難しいという問題点があったが、ペレットやパウダー等の原材料に対して放射線グラフトによる機能化を行うことで、機能化が困難であった複雑な成形体についても適用可能となる。また、原材料そのものを改質でき、得られた材料を原料として、従来の成形加工プロセスをそのまま適用できることから、新たな設備投資を抑えて産業利用が可能となる。また、最近では、高分子材料単体ではなく、ポリマーアロイやポリマーブレンド、ポリマーコンポジット/強化繊維複合材料といわれる複合高分子材料が多種の産業領域に利用されており、これらの材料の問題点となる層間/界面状態の相溶性の改善を図るための方法としても放射線プロセスは期待できるが、照射条件によっては、反応に伴うガス発生により、マトリクス内に空隙を誘起することもあり、成形体への放射線照射処理には注意が必要となっている。これらの問題を解決する上でも、ペレットやパウダー等への放射線グラフト技術は期待が持てる。

最後に、放射線プロセスは、放射線の工業利用の一つのツールであり、日本では官・学の手を離れて企業が中心となって実施している。しかし、本稿 2 節で解説したように、線源側と対象材料側のそれぞれの条件によって誘起される化学反応が異なることが明らかになり、残念ながら商品開発に追われる企業の研究者・

開発者には、放射線プロセスの系統的な理解を得るための時間に余裕がない状況である。新規高分子材料への照射効果はもちろんのこと、新素材の創製のためには、基本に立ち返って、官・学が中心となって人材育成はもちろんのこと、過去の知見を含めて系統的なライブラリを構築する必要があると考えられる。

〈参 考 文 献〉

- 1) A. Chapiro, "Radiation Chemistry of Polymeric System", Wiley Interscience, New York, 1962. (E. B. Newton U. S. Patent, 1,906,402(1929)).
- 2) A. Charlesby, Atomic Radiations and Polymers, Pergamon Press, Oxford, 1960.
- 3) 田畑 米穂, 放射線化学, 4 (1967) 14.
- 4) 町 末男, 沢柳 正一, 放射線化学, 5 (1968) 10.
- 5) 武久 正昭, 團野 皓文, 放射線化学, 10 (1970) 15.
- 6) K. Okamura, T. Seguchi, J. Inorg. Organomet. Polym. Mater., 2 (1992) 171.
- 7) M. Sugimoto, T. Shimoo, K. Okamura, T. Seguchi, J. Am. Ceram. Soc., 78 (1995) 1013.
- 8) M. Sugimoto, T. Shimoo, K. Okamura, T. Seguchi, J. Am. Ceram. Soc., 78 (1995) 1849.
- 9) KURABO Industries Ltd., <https://kurabonatech.com/>, access at 28th July 2023.
- 10) Y. Tabata, A. Oshima, Macromol. Symp., 143 (1999) 337.
- 11) 雨宮 綾夫編, 放射線化学入門, 上下巻, 丸善, 東京, 1962.
- 12) 岡田 隆行, 東京大学卒業論文, 1957.
- 13) W. K. Busfield, J. V. Hanna, Polym. J., 23 (1991) 1253.
- 14) T. N. Bowmer, J. H. O'Donnell, D. J. Winzor, J. Polym. Sci.: Polym. Chem. Ed., 19 (1981) 1167.
- 15) Y. Tabata, A. Oshima, K. Takashika, T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., 48 (1996) 563.
- 16) K. Takashika, A. Oshima, M. Kuramoto, T. Seguchi, Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem., 55 (1999) 399.
- 17) J. R. Brown, J. H. O'Donnell, J. Appl. Polym. Sci., 23 (1979) 2763.
- 18) R. W. Garrett, D. J. T. Hill, T. T. Le, K. A. Milne, J. H. O'Donnell, M. C. S. Perera, P. J. Pomery, Temperature Dependence of the Radiation Chemistry of Polymers, ACS SYMPOSIUM SERIES 475, Chap. 10, pp. 146–155, ACS, Washington, DC, 1991.
- 19) D. J. T. Hill, D. A. Lewis, J. H. O'Donnell, J. Macromolecular Sci., A29 (1992) 11.
- 20) H. Kudoh, N. Kasai, T. Sasuga, T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., 43 (1994) 329.
- 21) H. Kudoh, N. Kasai, T. Sasuga, T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., 48 (1996) 89.
- 22) H. Kudoh, N. Kasai, T. Sasuga, T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., 48 (1996) 95.
- 23) H. Kudoh, N. Kasai, T. Sasuga, T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., 48 (1996) 695.
- 24) A. Oshima, S. Ikeda, H. Kudoh, T. Seguchi, Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem., 50 (1997) 611.
- 25) K. Ema, Y. Kawakami, H. Nishioka, T. Yamamoto, J. Nucl. Sci. Technol., 27 (1990) 1028.
- 26) K. Ema, Y. Izumi, Y. Kawakami, T. Yamamoto, Radiat. Phys. Chem., 38 (1991) 339.
- 27) K. Ema, Y. Izumi, Y. Kawakami, H. Isogai, Y. Hamada, J. Hirokawa, Y. Kusumi, T. Yamamoto, Proc. of the Int. Symp. on Material Chemistry in Nuclear Environment, pp. 365–374, 1996, Tsukuba, Japan.
- 28) 中村 紘貴, 早稲田大学修士論文, 2014.
- 29) S. Seki, K. Kanzaki, Y. Kunimi, S. Tagawa, Y. Yoshida, H. Kudoh, M. Sugimoto, T. Sasuga, T. Seguchi, H. Shibata, Radiat. Phys. Chem., 50 (1997) 423.
- 30) S. Seki, K. Maeda, Y. Kunimi, S. Tagawa, Y. Yoshida, H. Kudoh, M. Sugimoto, Y. Morita, T. Seguchi, T. Iwai, H. Shibata, K. Asai, K. Ishigure, J. Phys. Chem. B, 103 (1999) 3043.
- 31) S. Seki, K. Kanzaki, Y. Yoshida, S. Tagawa, H. Shibata, K. Asai, K. Ishigure, Jpn. J. Appl. Phys., 36 (1997) 5361.
- 32) T. G. Oyama, A. Oshima, M. Washio, S. Tagawa, Nanotechnology, 23 (2012) 495307.
- 33) A. Oshima, K. Murata, T. Oka, N. Miyoshi, A. Matsuura, H. Kudo, T. Murakami, E. Katoh, M. Washio, Y. Hama, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms, 265 (2007) 314.
- 34) Persistence Market Research, <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/micronized-pt-fe-market.asp>, access at 28th July 2023.
- 35) European Chemicals Agency (ECHA), <https://echa.europa.eu/>
- 36) UNEP/POPS/POPRC.14/2, Fourteenth meeting of the Persistent Organic Pollutants Review Committee (POPRC. 14) of the Stockholm Convention,

- <http://chm.pops.int/tabid/3309/Default.aspx>
- 37) Ninth Meeting of the Conference of the Parties to the Stockholm Convention, <http://www.pops.int/Implementation/Exemptions/SpecificExemptions/tabid/1133/Default.aspx>
- 38) A. Oshima, T. Tanaka, H. Nakaya, R. Senba, K. Satoh, *Sci Rep*, 10 (2020) 13940.
- 39) CellSeed Inc, <https://www.cellseed.com/business/product/>, access at 28th July 2023.
- 40) GS Yuasa Membrane Co. Ltd., https://yms.gs-yuasa.com/jp/products/grafted_membrane/, access at 28th July 2023.
- 41) ECE CO. LTD., <https://www.ece.ebara.com/product/e-pix.html>, access at 28th July 2023.
- 42) (株) 環境浄化研究所, <http://www.kjk-jp.com/ceciium/pg297.html>, access at 28th July 2023.
- 43) F. Muto, A. Oshima, T. Kakigi, N. Mitani, A. Matsuura, K. Fujii, Y. Sato, J. Y. Li, M. Washio, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 265 (2007) 162.
- 44) Y. Sato, K. Fujii, N. Mitani, A. Matsuura, T. Kakigi, F. Muto, J. Y. Li, A. Oshima, M. Washio, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 265 (2007) 213.
- 45) A. Oshima, Y. Sato, F. Shiraki, N. Mitani, K. Fujii, Y. Oshima, H. Fujita, M. Washio, *Radiat. Phys. Chem.*, 80 (2011) 164.
- 46) A. Terui, R. Takenaka, D. Kawaguchi, A. Mino, Y. Nakazawa, H. Endo, K. Iga, M. Washio, A. Oshima, *Radiat. Phys. Chem.* (accepted).
- 47) A. Oshima, F. Shiraki, H. Fujita, M. Washio, *Radiat. Phys. Chem.*, 80 (2011) 196.
- 48) T. Shimizu, M. Yamato, Y. Isoi, T. Akutsu, T. Setomaru, K. Abe, A. Kikuchi, M. Umezu, T. Okano, *Circ. Res.*, 90 (2002) e40.
- 49) Y. Yamahara, N. Nagasawa, M. Taguchi, A. Oshima, M. Washio, *Radiat. Phys. Chem.*, 142 (2018) 88.
- 50) 堀内 寛仁, 志村 亮弥, 武岡 真司, 大島 明博, 鷺尾 方一, *RADIOISOTOPES*, 69 (2020) 129.
- 51) 佐藤 数行, 大島 明博, 成形体およびその製造方法, 特許第 6536571 号 (特願 2016-511971), 3 月 31 日, 2015.
- 52) A. Oshima, Y. Ohmukai, Y. Shiotani, T. Kondoh, K. Satoh, Y. Yoshida, *Proceedings of IRaP2018*, Moscow, Russia.

〈著 者 略 歴〉

大島 明博：1998 年東海大学大学院工学研究科応用理学修了（博士（工学））。1998 年日本原子力研究所博士研究員。2002 年早稲田大学理工総研 客員講師。2008 年大阪大学産業科学研究所 特任研究員，2012 年同研究所 特任准教授。2016 年大阪大学大学院工学研究科 特任准教授，2019 年同研究科 特任教授（現職）。専門：量子ビームプロセス工学，フッ素化学，リソグラフィ，ナノテクノロジー。

放射線照射によって生じた DNA 損傷の構造解析と修復速度

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子生命科学研究所

中野 敏彰*, 赤松 憲, 鹿園 直哉

Radiation-induced locally multiply damaged site in DNA (clustered DNA damage) is thought to be closely related to the biological effects of radiation. A method has been established to evaluate the complexity of clustered DNA damage in genomic DNA extracted from TK6 cells irradiated with a low-dose ionizing radiation. This was achieved by isolating and concentrating the DNA molecules with lesions from the whole irradiated DNA molecules also containing intact ones, and subsequently visualizing lesions by atomic force microscopy (AFM). The purpose of this study is to estimate the level of damage clustering *in vivo*. We found that ionizing radiation produced clustered DNA damage in TK6 cells, whereas hydroperoxide treatment did not, highlighting the importance of clustered DNA damage as a signature of ionizing radiation. We further observed that Fe-ion beams (high-LET radiation) produced various types of clustered DNA damage with higher complexity consisting of more than 2 lesions, which were quite few in the case of X-rays. Surprisingly, analyses of repair of DNA damage revealed that non-DSB clustered DNA damage were repaired efficiently in TK6 cells after irradiation of either X-rays and Fe-ion beams. The repair efficiency of complex DSBs, which were frequently produced after Fe-ion beams, were low.

Keywords: DNA Repair, clustered DNA damage, complex DSBs, atomic force microscopy (AFM)

1 はじめに

放射線は、DNA 損傷を引き起こし、その量は放射線の種類によって異なる。これらの染色体 DNA の損傷は、細胞死、突然変異、癌などの生物学的影響をもたらす可能性がある。誘発される DNA 損傷には、塩基損傷、脱塩基 (AP) 部位、一本鎖切断 (SSB)、二本鎖切断 (DSB)、DNA-蛋白質架橋 (DPC) などが含まれる。特に、細胞内で過酸化水素を用いたフェントン反応によって生じる酸化的 DNA 損傷や、内因性の DNA 損傷は、電離放射線による損傷と化学的にほぼ同一であることが知られている^{1,2)}。しかし、放射線と過酸化水素による損傷の種類や総量に大きな差異がない場合でも、その生物学的効果は著しく異なる³⁾。これらの観察結果から、電離放射線の特徴は DNA 損傷のクラスター化であり、一方、内因性および化学物質による DNA 損傷は主に孤立した損傷であると考えられている。一方、クラスター化された DNA 損傷 (クラスター DNA 損傷) は修復が困難であり、電離放射線の有害な影響の主な要因であると推測されてきた⁴⁾。

これまでの試験管内の研究は、化学的に合成された DNA 損傷を用いて、クラスター DNA 損傷は修復が困難であることを明らかにしてきた。修復の効率は、損傷間の距離の広がり、損傷の種類、クラスター内の損傷数に依存する。また、損傷の種類によっては、損傷の除去機構の違いが存在する可能性もある。修復が困難なクラスター損傷による立体的な障害は、複製抑制や突然変異誘発などの細胞にとって重大な影響をもたらすことが考えられる。

塩基損傷、AP 部位、SSB、DSB、DPC などの電離放射線で誘発される代表的な DNA 損傷を定量的に測定する方法は既に開発されている。しかしながら、従来の手法では DNA 損傷の空間配置を調べることができず、クラスター化された DNA 損傷を測定することはできなかった。そこで、筆者らはまず、クラスター化された DNA 損傷を直接的に可視化する手法を確立した^{5,6)}。次に、その手法を用いて過酸化水素や放射線照

Structural analysis and repair kinetics of radiation-induced DNA damage

Toshiaki NAKANO*, Ken AKAMATSU and Naoya SHIKAZONO (National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)), 〒619-0215 京都府木津川市梅美台 8 丁目 1-7
TEL: 0774-80-3787, E-mail: nakano.toshiaki@qst.go.jp

射によって生じる DNA 損傷を定量することで、クラスター DNA 損傷の誘発の有無や修復速度を測定した。

2 細胞内 DNA 損傷の可視化の方法

DNA 損傷の可視化には DNA 損傷そのままでは DNA との違いが小さいため、顕微鏡で観察することができない。そこで、DNA 損傷の位置に目印を結合させることで損傷の位置の指標とした。方法は、まず、DNA 損傷部位を DNA グリコシラーゼによって脱塩基部位 (AP site) に置換した。次に、AP site に特異的に結合するビオチンを有するアルデヒドリアクティブプローブ (ARP), さらにアビジン (53kDa) を結合させ、原子間力顕微鏡 (AFM) で観察可能なサイズと

した。この方法を用いて DNA 損傷を可視化し、放射線照射によりプラスミド DNA に生じた孤立 DNA 損傷やクラスター DNA 損傷、高複雑度 DSB、高密度クラスター損傷が生成されることを示した^{5,6)}。

細胞内での DNA 損傷解析においては、照射された細胞からゲノム DNA を単離し、数千塩基対 (bp) サイズに切断した後、損傷部位をビオチン/アビジン標識し、AFM で観察する必要がある。しかし、細胞の照射に用いる線量は低いため、損傷を含まない DNA 断片の割合が非常に高くなり、損傷の AFM 観察が極めて煩雑かつ困難となる。そこで、損傷を含む DNA を選択的に濃縮する方法を確立した。具体的には、ビオチン標識された損傷を含む DNA をストレプトアビジン磁気ビーズと結合させ精製することで、損傷のない

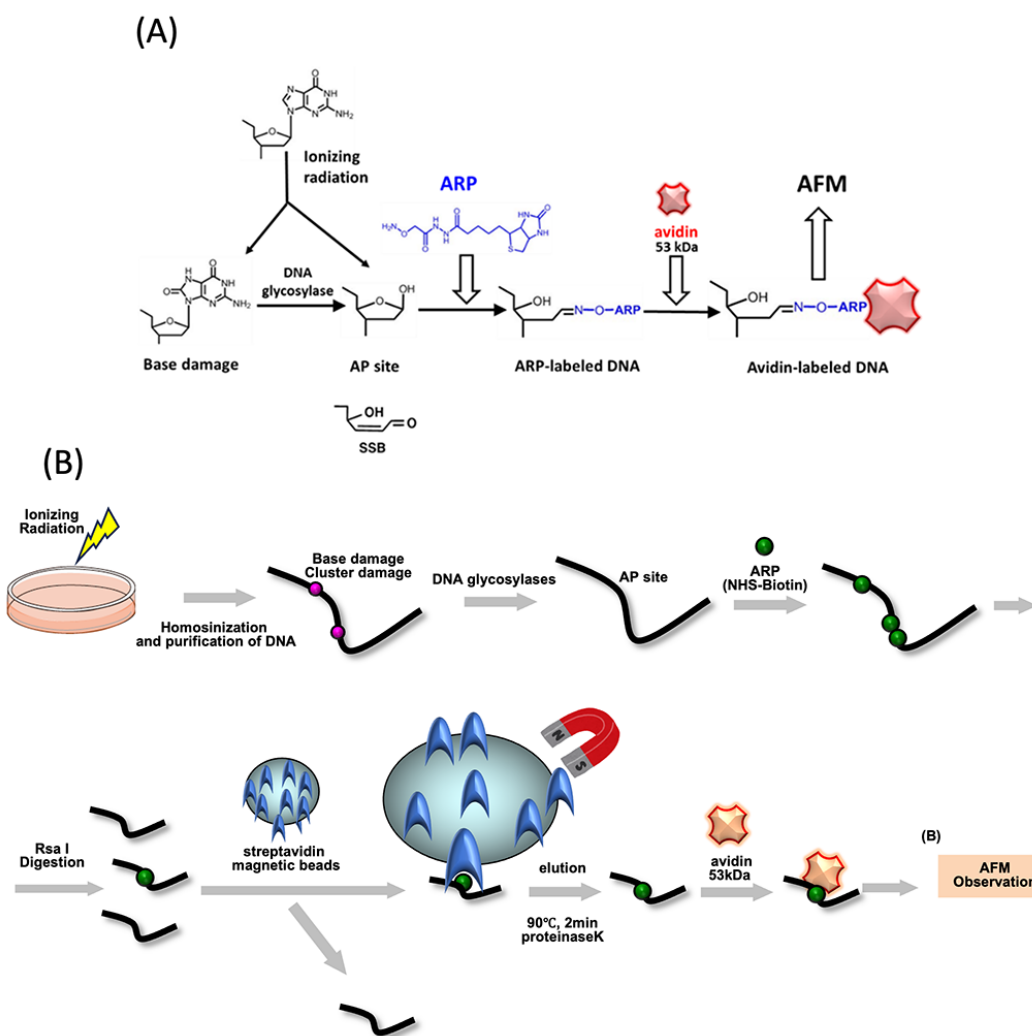


Figure 1. Outline of the experiment.

free DNA を除去し、損傷を持つ DNA 断片のみを選択的に回収する方法を確立した (Fig. 1)。この方法により、細胞内の DNA 損傷のタイプを分類し、線エネルギー付与 (LET) の異なる放射線によって生じる DNA 損傷誘発頻度の違いを調べ、さらに各 DNA 損傷の修復速度を評価することを可能とした。

3 実験手順

3.1 過酸化水素、X 線、鉄イオンビームによる DNA 損傷

TK6 培養細胞 (ヒトリンパ細胞) に対し、過酸化水素を 30 分、0 mM, 0.25 mM, 0.5 mM, 1 mM 処理し、X 線および鉄イオンビームを 0 Gy, 20 Gy, 40 Gy, 60 Gy 照射した。照射後、DNA を精製し、ビオチン標識したクラスター DNA 損傷を AFM で観察し、損傷頻度 (損傷/Mbp) とクラスター DNA 損傷内の損傷数を求めた。

3.2 放射線によって生じた DNA 損傷の修復機構の解明

X 線および Fe イオンビームで照射 (40 Gy) を行い、照射後 0 時間、1 時間、6 時間、18 時間の時間点で DNA を回収した。各時間点におけるクラスター DNA 損傷頻度 (損傷/Mbp) とクラスター DNA 損傷内の損傷数、および孤立損傷頻度 (損傷/Mbp) を AFM 観察により求めた。

4 研究結果と解析結果

4.1 過酸化水素、X 線、鉄イオンビームによる損傷の定量

AFM 解析の結果、磁気ビーズにより精製された DNA 中には、孤立塩基損傷、シンプルクラスター損傷 (塩基損傷を 2 つ含むクラスター)、高密度クラスター損傷 (塩基損傷を 3 つ以上含むクラスター) および高複雑度 DSB (DSB+ 塩基損傷) が含まれていることが明らかになった (Fig. 2)⁷⁾。DNA 精製の回収率が約 30 % であるため、これらの損傷を考慮に入れて全体の DNA 量を算出した。定量結果を Fig. 3 に示す。

過酸化水素で生じるフェントン反応においては、塩基損傷の割合が 90 %、高複雑度 (DSB + 塩基損傷) の割合が約 8 % であった。これらの DNA 損傷割合は、過酸化水素濃度が 0.25 から 1 mM の範囲で変化が見られなかった。ただし、塩基損傷の数は過酸化水素濃度が高くなるにつれて増加した。一方、X 線照射された TK6 細胞では、孤立塩基損傷、シンプルクラスター

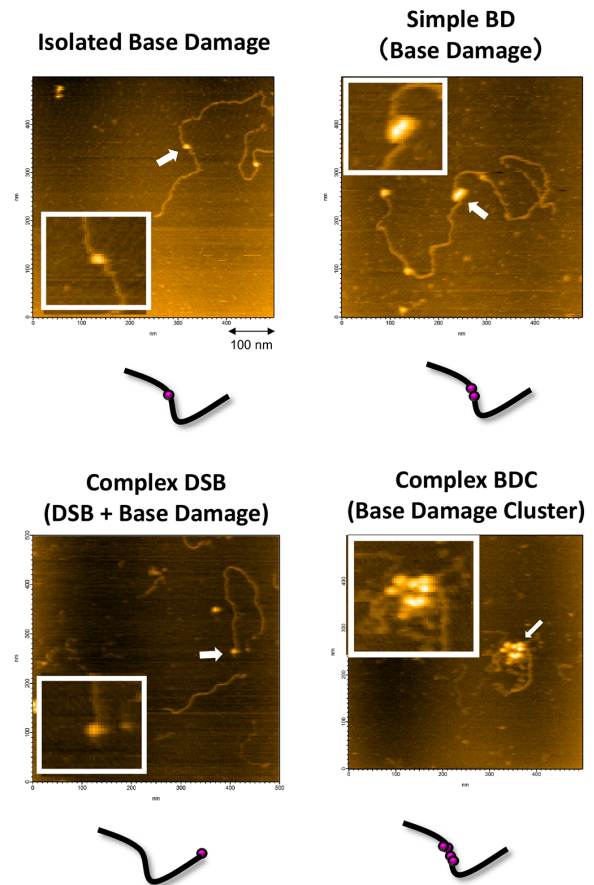


Figure 2. AFM images of genomic DNA damage in irradiated TK6 cells.

損傷および高複雑度 DSB (DSB + 塩基損傷) の割合がそれぞれ 83.5 %, 12.2 %, 5.3 % となった。各 DNA 損傷の割合は X 線照射量が増加してもほとんど変化しなかった。鉄イオンビーム照射では、孤立塩基損傷 (60.3 %), シンプルクラスター損傷 (20.2 %), 高密度クラスター損傷 (4.8 %), 高複雑度 DSB (5.3 %) であった。鉄イオンビームは過酸化水素や X 線処理よりも多様なタイプのクラスター DNA 損傷を生成することがわかった。X 線や鉄イオンビームなどの電離放射線では多くのクラスター DNA 損傷を生じる一方、フェントン反応ではほとんど生じない。この結果は、電離放射線の生物効果を理解する上でのクラスター DNA 損傷の重要性を実験的に示したものである。孤立塩基損傷とクラスター DNA 損傷の比率は、鉄イオンビームでは 11.0:1.0, X 線では 2.1:1.0 であった。鉄イオンビームは、低 LET の X 線よりも多くのクラスター DNA 損傷を生成することが示された。

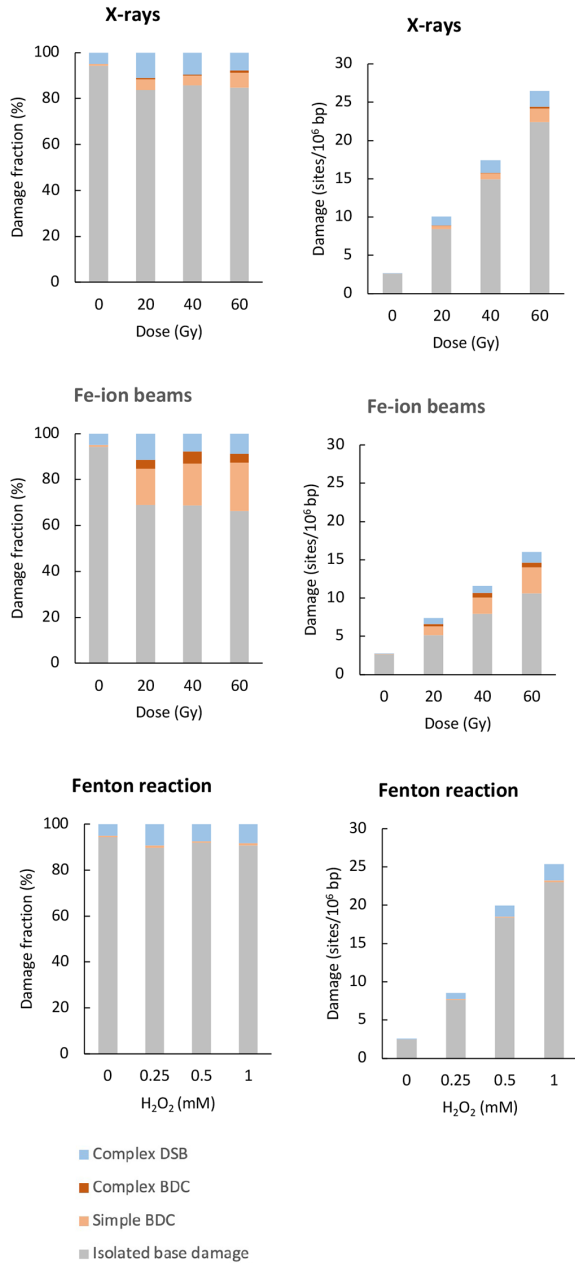


Figure 3. The spectra (left) and yields (right) of DNA damages in treated TK6 cels.

4.2 X線と鉄イオンビームによるDNA損傷の修復

電離放射線照射後、一定時間の培養を行い、生じたDNA損傷の修復速度を観察した (Fig. 4). X線40 Gy照射後1時間では孤立塩基損傷が修復され、6時間後には20%以下まで減少した。照射後18時間では、わずかに孤立塩基損傷は残存するが、損傷数はX線処理前とほぼ同等であった。一方、クラスターDNA損傷

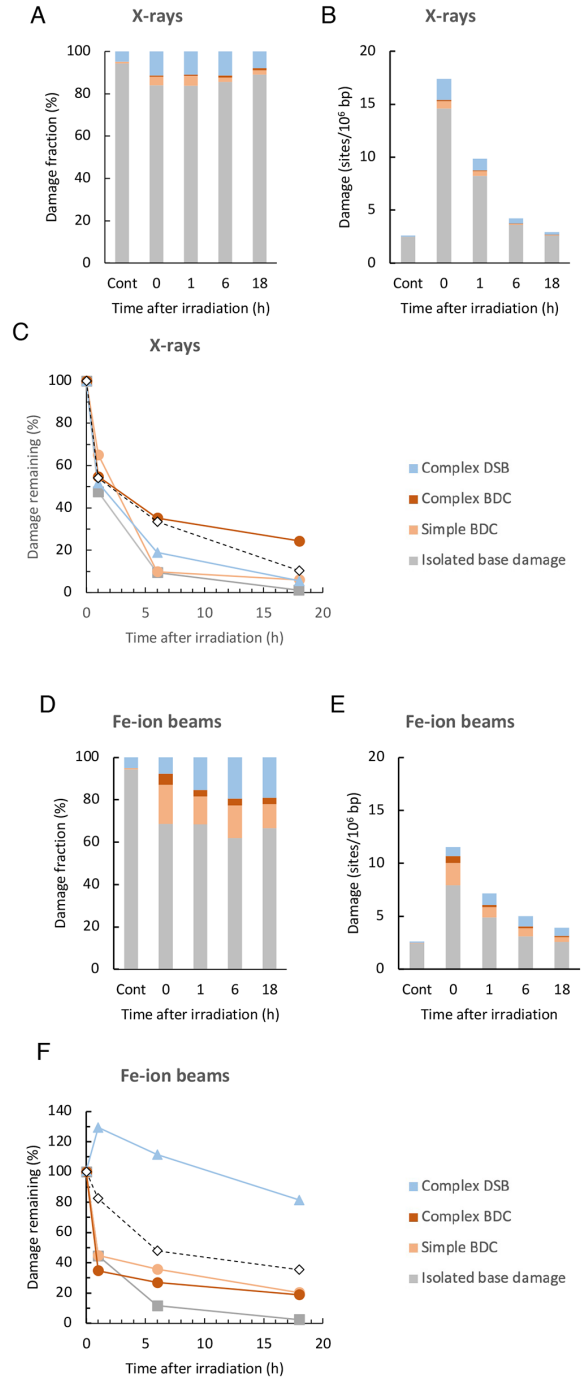


Figure 4. Repair rate of Fe ion beam-induced DNA damages.

は孤立塩基損傷と同程度の割合で修復された。また、高複雑度DSBも、塩基損傷とほぼ同じ割合で修復された。電気泳動で調べた全てのタイプを含むDSBは、6時間までに急速に修復が進み、その後はゆっくりと

したペースで修復が続いた。

40 Gy 鉄イオンビームの場合、照射後 1 時間で半数以上の孤立塩基損傷が修復され、6 時間後には 20 % 以下に減少した。同様に、シンプルクラスター損傷や高密度クラスター損傷も孤立塩基損傷と同程度の速度で修復された。高複雑度 DSB は、1 時間後にわずかに増加し、その後はゆっくりとした速度で修復が進行した。電気泳動検出 DSB では、6 時間後までに迅速に修復が進み、その後は徐々に修復が見られた。修復途中での高複雑度 DSB の増加は、シンプルクラスター損傷や高密度クラスター損傷内の塩基損傷が塩基除去修復機構によって修復される際に生じる DNA 切断が DSB を引き起こしたため生じたと考えられる。鉄イオンビーム照射 18 時間後では、孤立塩基損傷とシンプルクラスター損傷や高密度クラスター損傷の大半が修復されるが、高複雑度 DSB は約 50 % が修復されず残ることが示された。

5 まとめと考察

筆者らは、AFM を用いて、損傷した細胞内 DNA を選択的に濃縮し、生体内における DNA 損傷の種類別定量法を確立した。この方法を用いて解析した結果、X 線や鉄イオンビームなどの電離放射線が生体内で様々なタイプのクラスター DNA 損傷を引き起こすことが明らかになった。一方で、フェントン試薬による処理ではクラスター DNA 損傷はほとんど生じなかった。さらに、高 LET の鉄イオンビーム照射は X 線よりも頻繁にクラスター DNA 損傷を誘発するだけでなく、その複雑性も X 線より高くなることが明らかになった。また、鎖切断を伴わないクラスター DNA 損傷（シンプルクラスター損傷や高密度クラスター損傷）は効率的に修復される一方で、DSB を伴う高複雑度 DSB（DSB + 塩基）は特に高 LET の鉄イオン照射後に長期間生体内に存在し続けることが示された。クラスター DNA 損傷の定量を可能にし、修復効率を明らかにした本研究の結果は、電離放射線の生物学的影響を理解する上で極めて重要である。本研究により、放射線治療や化学療法による腫瘍治療、および正常細胞の発がんリスクに関連するクラスター損傷の生物学的影響を評価するための重要な進展がもたらされると考えられる。

〈謝 辞〉

本研究を進行するにあたり、広島大学大学院理学研究科 井出 博名誉教授、量子科学技術研究開発機構 玉田 太郎博士、廣本 武史博士、平山 亮一博士にご協力いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

〈参 考 文 献〉

- 1) J. F. Ward, *Prog. Nucl. Res. Molec. Biol.*, 35 (1988) 95.
- 2) C. von Sonntag, *Free-Radical-Induced DNA Damage and Its Repair, A Chemical Perspective*, Springer-Verlag, 2006.
- 3) S. S. Wallace, *Free Radic. Biol. Med.*, 33 (2002) 1.
- 4) J. F. Ward, *Int. J. Radiat. Biol.*, 66 (1994) 427.
- 5) X. Xu, T. Nakano, M. Tsuda, R. Kanamoto, R. Hirayama, A. Uzawa, H. Ide, *Nucleic Acids Res.*, 48 (2019) e18.
- 6) Y. Matsuya, T. Nakano, T. Kai, N. Shikazono, K. Akamatsu, Y. Yoshii, T. Sato, *Int. J. Mol. Sci.*, 21 (2020) 1701.
- 7) T. Nakano, K. Akamatsu, M. Tsuda, A. Tujimoto, R. Hirayama, T. Hiromoto, T. Tamada, H. Ide, N. Shikazono, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 119 (2022) e2119132119.

〈著 者 略 歴〉

中野 敏彰：広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻 博士課程修了（博士（理学））、日本学術振興会特別研究員、広島大学助教、バーモント大学客員研究員を経て、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（主幹研究員）、現在にいたる。

赤松 憲：京都工芸繊維大学高分子学科高分子化学専攻、同大学院高分子学専攻修士課程修了、京都大学大学院薬学研究科薬品作用制御システム専攻 博士課程修了（薬学博士）。特殊法人日本原子力研究所博士研究員、JSPS 科学技術特別研究員、日本原子力研究開発機構職員、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（チームリーダー）、現在にいたる。

鹿園 直哉：東京大学農学研究科農業生物学専攻 博士課程修了（博士（農学））、特殊法人日本原子力研究所研究員、英国 MRC 研究所客員研究員、特殊法人日本原子力研究所研究副主幹、特殊法人日本原子力研究所研究主幹を経て、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（上席研究員）、現在にいたる。

可視光を 99.98 % 以上吸収する至高の暗黒シート

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

雨宮 邦招*, 清水 雄平

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

越川 博, 八巻 徹也

We have developed a “supreme black” sheet whose absorptance is more than 99.98 % in the visible wavelengths. Our technology is an extension of a technique in which a master mold having microscopic conical cavities is formed by ion beam irradiation and chemical etching, and the surface texture is transferred as light trapping structures onto a black substrate. Cashew oil black resin exhibits ultra-low intra-matrix diffuse reflection, while the surface specular reflection (glare) is also suppressed along with the light trapping structure, resulting in a deep black that makes the laser pointer light invisible. The hemispherical reflectance in the visible wavelengths is 0.02 % or less, achieving the record-low reflectance as a durable material that can be touched.

Keywords: blackbodies, perfect absorbers, microstructures, surface modification, ion beam fabrication

1 はじめに

黒色材料は、光学機器内の迷光や乱反射の防止、光センサーの吸収体、太陽熱エネルギー利用、熱放射体などの幅広い目的で用いられている。精密な分光分析など、用途によっては 100 % に近い光吸収率も必要とされている。特に、産総研では光の計量標準において、光吸収体で全ての光を吸収・検知することで明るさの単位の基本となる放射束（光パワー、単位：W）の基準

を決めており、反射ロスが誤差要因に直結するため、とにかく黒い材料を必要としている。従来の黒色材料のうち、垂直配向カーボンナノチューブ（VACNT）^{1,2)} は、平板型でありながら可視域から赤外域において吸収率 99.9 % 以上を誇り、世界一黒い人工物とされてきた。VACNT は CNT が互いに十分な距離を保って配向成長することで充填率は 5 % 程度となっており、ほとんどが空気で占められるため、実効屈折率が 1 に近く、表面でのフレネル反射が限りなくゼロとなる仕組みである。一方で、VACNT は接触などにより低反射率性能が損なわれたり、基板から剥離したりしやすく、取扱が困難という課題があった。他の黒色材料技術には、たとえばガの目の表面のごく微小な凹凸を模したモスアイ構造^{3,4)} などのナノ光学技術も知られているが、広帯域に 0.1 % 未満の反射率は得られていなかった。

筆者らは、光吸収率の高い材料の研究開発を行い、材料の表面に微細な凹凸構造を作製して、その鋭さや、サイズを調整すると、光の反射率を極限まで低減できることを見いだした^{5,6)}。サイクロトロン加速器のイオンビームを用いた微細加工法を通じて、丈夫な黒色素材上に微細な凹凸構造を作ることによって、あらゆる光を吸収しつつ、耐久性もあわせ持つ、新しい光吸収材料の研究開発に取り組んだ。その結果、紫外線–可視光–赤外線全域で世界最高レベルの光吸収率（99.9 % 以上）を達成できた^{7,8)}。本稿ではその内容について解説する。

2 光閉じ込め構造の設計

筆者らが開発した微細な表面凹凸構造（光閉じ込め構造）による反射低減の原理を Fig. 1 に示す。光閉じ込め構造に入射した光は、壁面で何度も反射・吸収を繰り返すうちに弱まり、最終的に正味の反射率がゼロに近づいていく。いわゆる空洞黒体と同じ原理で

Supreme-black sheet that absorbs more than 99.98 % of light
Kuniaki AMEMIYA* and Yuhei SHIMIZU (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)), Hiroshi KOSHIKAWA and Tetsuya YAMAKI (National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)),
〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1
E-mail: k.amemiya@aist.go.jp

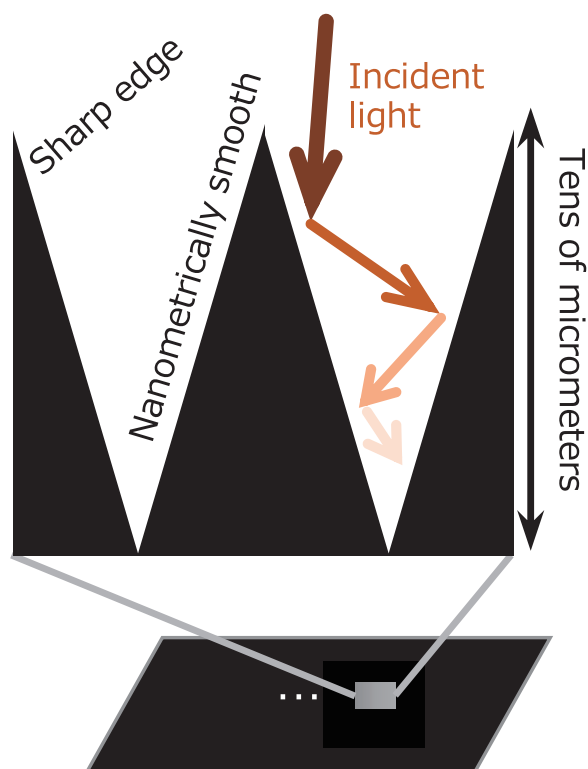


Figure 1. Mechanism of near-perfect optical absorption with microtextured surface. Created by modifying the image in Ref. 12): Copyright National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

ある。この原理がぎりぎり成り立つサイズまで空洞を小さくして黒色素材表面に敷き詰めることで、シート状の黒体材料にできる。最適な光閉じ込め構造の形状設計のために、材料中の光伝搬を波動光学的に計算できる FDTD (Finite Difference Time Domain: 有限差分時間領域) 法コード MEEP⁹⁾ を用いて反射率のシミュレーションを行った。基板上に敷き詰められた各円錐状ピットの深さが $5\text{ }\mu\text{m}$ – $25\text{ }\mu\text{m}$ 、ピットアスペクト比 (h/r , h : 深さ, r : 半径) が 0 – 5 の表面形状をモデル化した。MEEP による詳細なシミュレーションでは、モデル材料の誘電関数のローレンツパラメータを必要とするが、ここでは簡単のため、誘電体光学材料の典型的な値として、屈折率 $n \sim 1.5$ (一定) の条件で計算した。Figure 2 は、光閉じ込め構造の半球反射率の計算結果であり、それぞれ円錐状ピットのアスペクト比依存性と深さ依存性を示している。この結果から、半球反射率が 0.1% を大きく下回ることを目指す場合、円錐孔のアスペクト比は少なくとも 3 以上 (より好まし

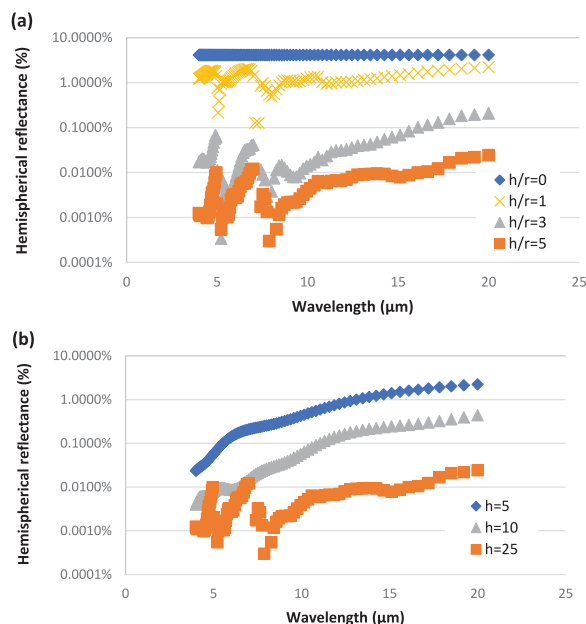


Figure 2. Calculated hemispherical reflectance of the micro-cavity array model: a) cavity aspect ratio dependence at fixed $r = 5\text{ }\mu\text{m}$. b) depth (μm) dependence at fixed $h/r = 5$. Copyright National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

くは 4 以上), 円錐孔の深さは対象とする波長よりも十分に大きいことが望ましいと確認された。ただし、光閉じ込め構造は単に深く急こう配な円錐孔構造というだけではなく、隣接ピット同士のエッジは十分に鋭くし、ピットの壁面はナノレベルで滑らかにしないと光閉じ込め効果が十分に機能しない。従来の微細加工技術では、このような構造を丈夫な素材上に形成することが難しい。

3 光閉じ込め構造原盤の加工

我々はこのような難加工を、サイクロトロン加速器からのイオンビームを用いた加工で解決した。イオントラックエッチング法と呼ばれる本技術では、樹脂基板に高エネルギーイオンビームを照射して、イオン飛跡に沿った高分子切断を生じさせ、選択的にエッチングすることでイオン飛跡を円錐孔に拡大形成する。CR-39 樹脂を基板に用いることで、エッチング処理後でも極めて表面粗さの小さい加工面が得られ、精巧な微細空洞構造を実現できる。実験手順は、まず CR-39 樹脂基板 ($100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 程度, 厚さ

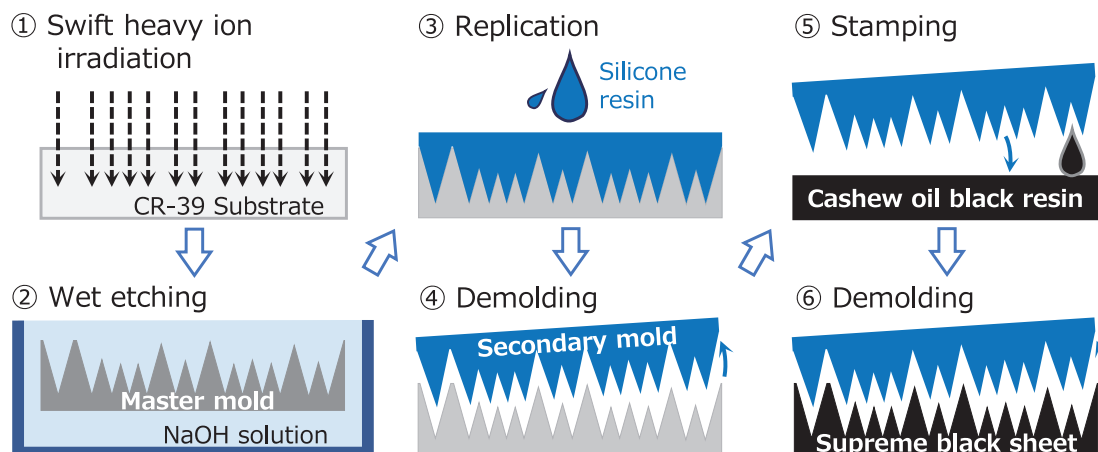


Figure 3. Fabrication process of a supreme-black sheet from microtextured cashew oil black resin.
Created by modifying the image in Ref. 8) (licensed under CC BY 4.0).

0.8 mm) に、QST 高崎量子応用研究所イオン照射研究施設 TIARA の AVF サイクロトロンからの Ne イオンビーム (200 MeV) を室温、真空中にて $10^6/\text{cm}^2$ 程度照射した。次いで、70 °C の 6.4 N NaOH 水溶液中で数-十数時間エッチングし、表面に円錐状エッチピットが敷き詰め、平坦部が残らないようにした。ここで、CR-39 樹脂基板は元々が無色透明なため、光閉じ込め構造の加工をただけでは黒色素材とはならない。

4 光閉じ込め構造の転写

そこで、光閉じ込め構造を作製した CR-39 樹脂基板は原盤として用い、シリコンゴムの表面に光閉じ込め構造を転写した。シリコンゴムはカーボンブラック顔料を混練して黒色化したものを用いた。その結果、得られた「暗黒シート」は紫外-可視-赤外の全域にわたって光吸収率 99.5 % 以上を実現し、特に熱赤外線 (波長の長い赤外線) 領域では世界最高レベルの吸収率 99.9 % 以上を達成した⁷⁾。しかし、光閉じ込め構造のシミュレーション結果によれば、表面反射率は可視光でも 0.1 % を十分に下まわるはずであり、実験結果と整合しない。原因を調べたところ、従来の暗黒シートで用いていたカーボンブラック粒子は可視光の波長と同程度以上の凝集体を作り、光の Mie 散乱が生じるため、光閉じ込め構造から散乱光が一部逃げてしまうことがわかった。そこで、カーボンブラック顔料を用いない低散乱な黒色基材の探索を進めた。漆塗りの代用にも用いられるカシューオイル樹脂は、成分のポリフェノール類が鉄と錯体を作ると、顔料を加えな

くてもポリマー自体が黒くなる。このため、カシューオイル黒色樹脂は基材内部からの散乱反射が極めて少ないことがわかった。これとあわせて、様々な黒色素材に光閉じ込め構造を転写できるように製造方法も改良した (Fig. 3)。

こうして、カシューオイル黒色樹脂に光閉じ込め構造を形成した「至高の暗黒シート」を作製した (Fig. 4)。試料は紫外-可視域-近赤外において、分光光度計 (PerkinElmer LAMBDA 1050) により分光反射率を計測した。半球反射率 (鏡面反射成分と拡散反射成分の合計) を評価するため、積分球を備えた測定ポートに試料を設置し、標準反射板 (Spectralon: 反射率約 99 % UV-VIS-NIR 用) との比較を通じて反射率を算出した。その結果、従来の暗黒シートと比較して可視光の反射率が一桁以上低い 0.02 % 以下 (光吸収率 99.98 % 以上, Fig. 5) と確認された。このように、鏡面反射も散乱反射も抑えられた「至高の暗黒シート」の深い黒は、レーザーポインターの光も消えてしまうほどである。触れる素材としては世界一の黒さを達成した⁸⁾。

5 暗黒シートの応用

今回開発した暗黒シートは、シリコンモールドを介して複製できるため、量産性もよい。また、触っても性能が損なわれにくく、取り扱いが容易である。人間の目は、実は黒さに敏感であり、反射率 0.2 % 以上の黒と 0.1 % 以下の黒を比べると肉眼で十分に判別できる。「至高の暗黒シート」は背景の映り込みも防止

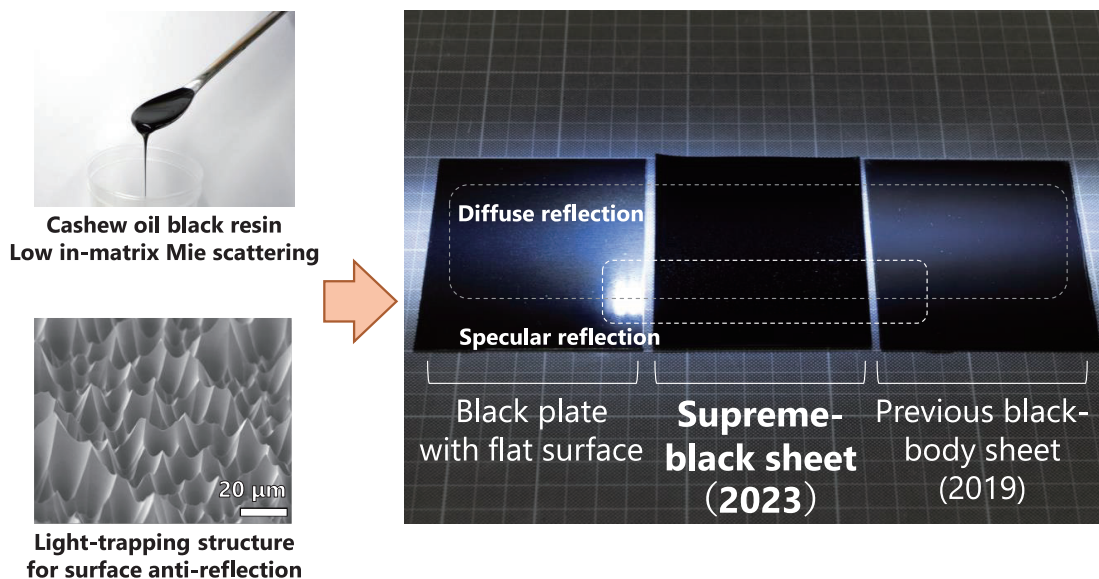


Figure 4. Supreme-black sheet developed in this study. Created by modifying the image in Ref. 12): Copyright National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

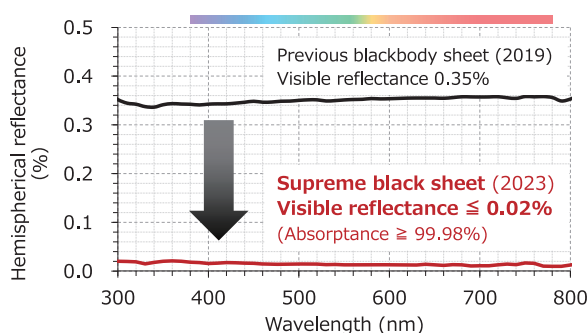


Figure 5. Spectral reflectance of the developed supreme-black sheet. Created by modifying the image in Ref. 8) (licensed under CC BY 4.0).

して圧倒的に沈む黒さを表現でき、視覚表現に従来にない高いコントラストを提供可能である。

また、開発した暗黒シートは平面状の黒体であり、プランクの法則により黒体放射スペクトルがシートの温度だけで決まるため、基準赤外線放射体として用いられれば温度と赤外線放射量の関係を精確に関係づけられる。新規感染症の流行に伴い、非接触の体温計やサーモグラフィが普及した。暗黒シートを黒体面とした平面黒体炉は、これら非接触体温計を高精度に校正できる。温度調節ステージに黒鉛シートを挟んで暗黒シー

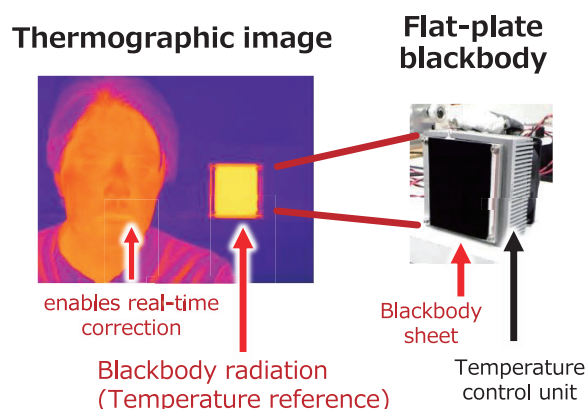


Figure 6. Conceptual image of the flat-plate blackbody infrared radiation source. Copyright National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

ト黒体プレート¹⁰⁾を実装すると (Fig. 6), 面内温度分布を均一に保持できる。このほか、放射率、温度安定性、上位標準による校正の不確かさを評価した結果、輝度温度の不確かさは 0.1°C にできた¹¹⁾。市販品の平面黒体炉は放射率 (= 赤外線吸収率) が不十分なために、不確かさが 0.5°C 程度あるので、暗黒シートを実装した平面黒体炉では精度を大幅に向上できた。これにより、サーモグラフィによる精確な表面温度計測が

実現でき、発熱者検知の信頼性向上に繋がると期待される。

6 おわりに

サイクロトロン加速器のイオンビームを用いた微細加工法を通じて、丈夫な黒色素材上に微細な凹凸（光閉じ込め構造）を作ることで、あらゆる光を吸収しつつ、耐久性もあわせ持つ、光吸収材料の研究開発に取り組んだ。その結果、紫外線-可視光-赤外線全域で世界最高レベルの光吸収率（99.9 % 以上）を達成できた。本成果は、*Science Advances* 誌に掲載され⁸⁾（同誌公式ツイッターでもピックアップ）、成果のプレス発表¹²⁾も行ったところ、日本経済新聞、朝日新聞、毎日新聞、読売新聞ほか新聞 20 紙に掲載され、3 件のテレビ報道、1 件のラジオ出演、4 件の雑誌掲載などにも至った。多くの問合せも頂戴しており、今後は、具体的な用途開発や実用化に向けた検討を進めたい。将来的には光の乱反射を極力抑えたいという専門向け用途だけでなく、身近な場面も含め、光制御・利用技術の格段の性能向上に貢献したい。

〈謝 辞〉

本研究の一部は、AMED の令和 2 年度ウイルス等感染症策技術開発事業（JP20he0822011）、日本学術振興会の科学研究費助成事業（JP21H03753）と、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻（専門職大学院）が推進する量子科学技術研究開発機構 施設利用共同研究制度による支援を受けた。また、本研究の一部は国立研究開発法人 産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門の井邊 真俊 主任研究員、笹嶋 尚彦 主任研究員、神門 賢二 主任研究員、部 洋司 研究グループ長の協力の下、実施された。ここに感謝の意を表す。

〈参 考 文 献〉

- 1) Z.-P. Yang, L. Ci, J. A. Bur, S.-Y. Lin, P. M. Ajayan, *Nano Lett.*, 8 (2008) 446.
- 2) N. A. Tomlin, A. E. Curtin, M. White, J. H. Lehman, *Carbon*, 74 (2014) 329.
- 3) Z. Diao, M. Kraus, R. Brunner, J.-H. Dirks, J. P. Spatz, *Nano Lett.*, 16 (2016) 6610.
- 4) G. Tan, J.-H. Lee, Y.-H. Lan, M.-K. Wei, L.-H. Peng, I.-C. Cheng, S.-T. Wu, *Optica*, 4 (2017) 678.
- 5) K. Amemiya, D. Fukuda, T. Numata, M. Tanabe, Y.

Ichino, *Appl. Opt.*, 51 (2012) 6917.

- 6) K. Amemiya, H. Koshikawa, T. Yamaki, Y. Maekawa, H. Shitomi, T. Numata, K. Kinoshita, M. Tanabe, D. Fukuda, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 356–357 (2015) 154.
- 7) K. Amemiya, H. Koshikawa, M. Imbe, T. Yamaki, H. Shitomi, *J. Mater. Chem. C*, 7 (2019) 5418.
- 8) K. Amemiya, Y. Shimizu, H. Koshikawa, H. Shitomi, T. Yamaki, *Sci. Adv.*, 9 (2023) eade4853.
- 9) A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, *Comput. Phys. Commun.*, 181 (2010) 687.
- 10) Y. Shimizu, H. Koshikawa, M. Imbe, T. Yamaki, K. Godo, N. Sasajima, K. Amemiya, *Opt. Lett.*, 46 (2021) 4871.
- 11) Y. Shimizu, M. Imbe, K. Godo, N. Sasajima, H. Koshikawa, T. Yamaki, K. Amemiya, *Appl. Opt.*, 61 (2022) 517.
- 12) 産 総 研・量 研 共 同 プ レ ス リ リ ー ス, https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230118/pr20230118.html.

〈著 者 略 歴〉

雨宮 邦招：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 応用光計測研究グループ 研究グループ長。2005 年産総研入所。2003 年東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 助手。

清水 雄平：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 応用光計測研究グループ 主任研究員。

越川 博：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 水素エネルギー変換デバイスプロジェクト 主幹技術員。

八巻 徹也：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門 研究企画部長。（併任）高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 水素エネルギー変換デバイスプロジェクト 上席研究員。

32nd Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告

2023年6月3日～8日の会期で行われた32nd Miller Conferenceに参加してきました。場所はとにかく海が綺麗なフランス・コルシカ島でした(写真1)。日本からの参加者は4人(内訳は、日本原子力研究開発機構から2人、量子科学技術研究開発機構から1人、早稲田大学から1人)でした。口頭発表が2件とポスター発表が2件。示し合わせしていたかのような完璧なわけ方!! 場所もいいし、もう少し日本からの参加者がいるかなーと思っていた訳ですが、そんなことも無かったです。というか航空券高すぎ、円安深刻すぎ問題で、海外出張のハードルがかなり高くなってしまいましたね。フランス大好きな著者としてはトホホな現状です。

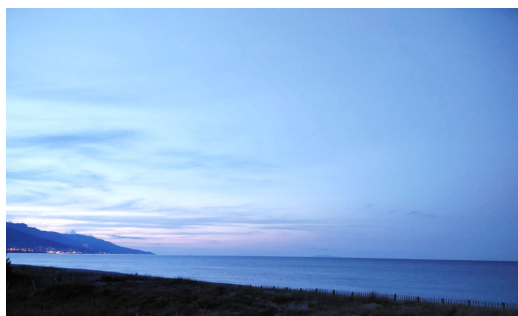


写真 1. 海が綺麗なコルシカ。



写真 2. 会期中のツアーで訪れたコルテの様子。雨の合間を縫って撮影!!!

高線量率放射線がん治療 FLASH の作用メカニズムについて話しました。かなりの人が興味をもってくれたみたいで、Geant4-DNA の開発チームとの情報交換や、超短パルス電子線照射実験を共同で実施することな

さてさて、肝心の会議ですが、トラブルの連続! まず、運営側が用意してくれるはずのバスが空港に来ず、1時間以上待たされた挙句、運賃を要求されました(んなアホな...). 同乗していたフランス人研究者が電話で運営側と連絡を取り、なんとか解決! ようやく会場に着いたら最初のセッション終わりかけ... Wifi が激弱でメールのチェックすらままならない... といった感じでした。そして安定のシャワー室の建付けが悪く、周囲が水浸しになる(ヨーロッパの水回りの弱さってなんなんやホンマに!). まあ、これくらいはよくある話ですね。これがあるあるとして楽しめるようになってくると上級者です(知らんけど)。

会議の前半は大体雨が降っていました。会期中のツアーでもしつかり雨に打たれて、ずぶ濡れになりました(雨の合間でなんとか撮れたコルテの様子(写真2)。後半は晴れて、昼休みに海水浴に行く人も結構いました。もちろん自分は冷房の効いた部屋にいました。

自分は Miller Conference には初参加ながら、招待講演者として会議に呼んでいただきました。非常に光栄なことでした。初めての招待講演かつ、参加者のほぼ全員が揃う2日目の最初の発表であったことなど、期待されているなーと感じました。発表は、最近話題の

ど、新しい共同研究の可能性についても話すことができたのはかなりの収穫でした(写真3)。

他の発表についてもヨーロッパ各国からはもちろん米国からの参加者も多くいました。国際的にも斜陽と

言われている分野ではありますが、重要な学問分野であり、まだまだ頑張らなければいけない。そして、若手が分野を引っ張って、発展させていかなければならないという風に感じました。いずれにせよ、ダンスパーティーの後は一気に距離が近くなりますね。こういうのは基本的に万国共通。むしろ飲み会等の重要さは海外の方が高いような気がしています。あれやろーこれやろーが夜の飲み会の席でどんどん決まります(実際に行動に移されるかどうかはさておき・・・)。



写真 3. 発表の様子。

放射線化学関係の国際会議としては、コロナ禍後、初めての対面での開催でした。海外勢の現状をお互いに確認する意味でも大きな意義を持つものだったのではないのでしょうか？シミュレーションの開発や水中のペプチドの分解に関する演題など、興味深い話が多く

ありました。それとは別に『誰々はどうしている？』みたいな声も多く耳にしました。自分も『ヤマシ〇さんは元気～？なんでいないの～？』って何回聞かれたか分かりません(マジで10回は聞かれた。人気者なの羨ましい!!)。改めて感じたのは、発表は広告的な意味が強く、それをもって会期中に新しい友人に出会い、そして新しい共同研究を創っていく。国際会議のもつ意義としてはこういう側面が大きいというかほぼ全てだということです。今回同行してもらった学生に話を聞くと、フランスチームと常に行動していたこともあり、「共同研究チームとして、そして家族の一員として認識してもらえていると感ずることができて嬉しい。が、就職で次年度はこのチームから離れるのが寂しい。研究職の魅力が分かった気がする。」とのことでした。実際の研究とは別に国を超えた人と人との繋がり大切さを少しでも伝えられたようで、自分としても嬉しかったです。な～るほど！こうやって、ほっこりエピソードを体験してもらうことで、博士の学生をリクルートすればいいのか～グへへ(*'ω'*)とかコッソリ思ったりもしましたが、それはそれということで(オチ)。

今回は2025年にクロアチアで開催。クロアチアといえば日本とは因縁が深いですね(サッカー的な意味で)。いやまあ、関係ないといえませんが、そういった意味でも参加を検討してみてもどうでしょうか？

最後になりましたが、参加した皆さま、お疲れさまでした。また、運営に携わってくださった皆様に感謝の意をここに表します。

(量子科学技術研究開発機構 楠本 多聞)

20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20) 参加報告

2023年9月17日-22日にイタリア・ヴィアレージョで開催された20th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD20)に参加した。ピサ空港の海岸沿いの町で、気温も高くなく、過ごしやすい気候であった。筆者はフォーマルな服装で参加したものの、リゾート地であることもあり、ラフな服装の参加者も多かった。

この会議は、International Solid State Dosimetry Organization (ISSDO)が主体となり、3年に1回のペースで開催されている。前回、2019年に広島国際会議場にて開催された。コロナ禍のため、2022年の開催予定から1年遅らせての開催となった。ヨーロッパ開催であることもあり、ヨーロッパからの参加者が非常に多く、また、ブラジルの参加者も毎回比較的多い。日本

からの参加者も（会場でざっと数えたところ）30名以上であり、国別の参加者数としては上位であった。



写真 1. メインのセッション会場の様子。

会議のスコープは、線量計測に関連する技術全般である。放射線化学会ではなじみ深いゲル線量計などの化学線量計や、熱蛍光やラジオフォトルミネッセンスなどの蓄積型蛍光現象を利用する線量測定、あるいはシンチレーション検出器を用いるリアルタイム線量測定技術などが主要要素技術である。これらの動作機序に関するモデリングや新規材料開発、新規の検出器開発と個人被ばく線量測定や医療被ばくにおける線量分布測定、あるいは新たな放射線治療手法における既存技術の適用可能性の検討が主なトピックである。日本からの参加者の多くは、新規材料開発に関する成果を報告していた。写真 1 はメインのセッション会場の様子である。セッション会場すぐ隣のテラスで昼食が供されていたこともあり、セッション終了後にも、ワイン片手で活発な議論が展開されていた。

エクスカーシオンでは、cinque terre というところに船で向かった。これは、イタリア語で 5 つの村を意味し、切り立った海岸沿いに位置する小さな 5 つの村の色とりどりの建物のなす景色が美しく、ユネスコの世界遺産にも登録されている箇所である。船からの景色も美しく、上陸してからは小さい港湾を囲んだ村を散策し、景色を堪能することができた（写真 2）。エクスカーシオンに加えて、近隣にはピサやフィレンツェなどの観光地もあり、セッションの合間や帰りがけに寄った研究者も多かったと聞いている。



写真 2. Cinque terre での上空からドローンで撮影した様子（産総研の藤原氏より提供）。

次の開催国はメキシコで、今回の開催がコロナ禍のため 4 年ぶりとなったことを受け、2 年後の開催となった。筆者個人としては、2013 年のブラジル開催時から連続で参加しているだけに、次回も参加したい。

（静岡大学 越水 正典）

17th International Congress for Radiation Research (ICRR 2023) 参加報告

2023 年 8 月 27 日から 8 月 30 日にかけて、カナダ・モントリオールのモントリオール国際会議場で 17th International Congress for Radiation Research (ICRR 2023) が開催された（写真 1, 2）。15 件の Topical Review に加えて、150 件の口頭発表が 5 会場で同時並行して行われた。ポスター発表会場は企業の展示ブースと併設されており、合計 518 件のポスター発表が行われた。日本からの発表は口頭発表 2 件とポスター発表 57 件

であり、発表数は前回の ICRR 2019 の時の 118 件から半分近くになっていた。

発表内容は多岐にわたり、DNA を含む生化学的な損傷と修復の線量応答特性、トラック構造とナノ・マイクロドジメトリ、放射線防護、放射線治療、粒子線治療、FLASH（超高線量率放射線照射）治療、AI と数学モデリング、バイスタンダー効果、二次がんリスク、バイオマーカー、放射線増感・防護剤、火星探索における放

射線影響などが含まれていた。放射線化学に関する発表では、Prof. Jay Laverne を chair とする Prof. Mehran Mostafavi による pulse radiolysis の Topical Review や、ノートルダムの研究グループからのポスター発表が多数あり、有益な議論ができた。

さて、筆者は “Ferric iron-pyridine-doped DHR123 gel dosimeter for high-LET radiation: investigation of LET-independent range and mechanism” のタイトルでポスター発表を行った。LET に非依存な感度特性を有する蛍光ゲル線量計に関する報告で、25 eV/nm–8000 eV/nm の幅広い LET の範囲で使用できることや、考えられる反応メカニズムについて議論した。写真 2 では Prof. Jay Laverne と、このポスター発表に関して議論している様子を示している（左下）。また、放射線影響を研究する分野において、正確な線量評価手法を確立することは非常に重要であり、筆者が国際学会に参加し、知らない海外の研究者から筆者の研究を評価していただいたことは大きな意義を持った。

その他の印象に残る研究として、proton boron capture therapy に関する報告があった。これまでの研究で生物学的な有効性が否定的に報告されていたが、研究は続けられていた。こうしたテーマについては、放射線化学線量計の観点からも一度議論する価値があるかもしれない。ウェルカムレセプションでは、海外の研究者と気軽に話す機会があり、タイムリーな話題として、日本における福島第一原子力発電所の処理水海洋放出（8月24日）に関して意見をきかれた。この学会には

専門分野に近い研究者もおり、多くの学びがあった。

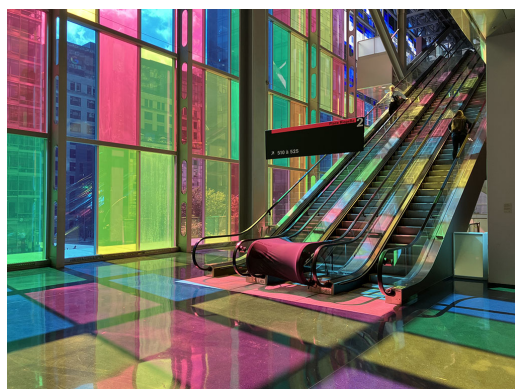


写真 1. 会議が行われたモントリオール国際会議場。

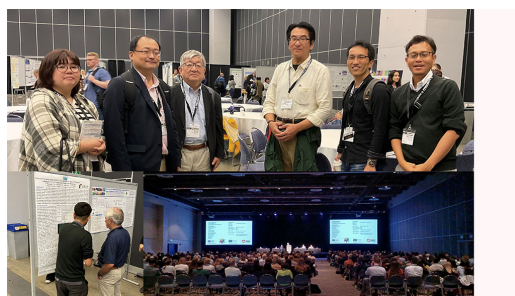


写真 2. ポスター・口頭発表会場の様子。

（北里大学 前山 拓哉）

第1回シンポジウム 一次世代放射線計測に向けた 放射線化学のアプローチ 報告

会員メールでご連絡したとおり、2023年7月4日の午後、都立産業技術研究センター（東京お台場）の会議室にて、企画継承委員会の一環として表題のシンポジウムを開催した。

理事会・総会でも報告されているが、近年、会員数の減少が顕著であり、関連分野との連携が不可欠である。放射線関連分野間で共通の課題である「線量測定」に焦点を当て、材料開発から機器開発、さらには医療応用に向けた研究展開について、各分野で線量計に関わる研究者に講演いただいた。

当日のプログラムは、下記のとおりであった。会誌113号で三次元ゲル線量計の特集があったこともあり、ここ1-2年以内に会誌で取り上げられた話題もあったが、いわゆる「化学線量計」だけでなく、現場で使用されている個人線量計から、DNA損傷の測定による線量評価やシミュレーションまで幅広い分野から話題提供があった。コロナ禍以来の懇親会も開催し、充実した会であった。



写真 1. 懇親会の様子。

<プログラム>

- 13:00-13:20 水の放射線分解反応を用いた化学線量計のマルチイオン線量分布計測への展開
前山 拓哉（北里大）
- 13:20-13:40 銅イオンによる PVA-KI ゲルの増感反応の研究
砂川 武義（福工大）
- 13:40-14:00 重粒子線の可視化を目指した PHITS によるシミュレーションおよび色素ゲル線量計の反応解析
五東 弘昭¹，豊原 尚実^{1,2}，草野 陽介³，小林 直久¹，上杉 歩己¹，蓑原 伸一³，下野 義章²（1. 横国大，2. 東芝エネルギーシステムズ（株），3. 神奈川県立がんセンター）
- 14:00-14:20 反復利用型 PVA-I ラジオクロミックゲル線量計の臨床応用
小野 薫¹，池田 幸恵¹，藤野 圭介¹，栗原 凌佑¹，林 慎一郎²，廣川 裕¹（1. 広島平和クリニック，2. 広国大）
- 14:20-14:40 休憩
- 14:40-15:00 PADC 飛跡検出器の検出感度を記述する化学パラメータとしてのヒドロキシル基生成密度
山内 知也¹，貞光 俊斗¹，小日向 大輔¹，保田 賢¹，石原文太¹，森 豊¹，金崎 真聡¹，楠本 多聞²，小平 聡²，藤乗 幸子³，クアンタン ラフィ⁴，レミ バリオン⁴（1. 神戸大，2. 量研機構，3. 大阪大，4. ストラスブール大）
- 15:00-15:20 放射線を可視化する繊維
木梨 憲司（京都工繊大）
- 15:20-15:40 PCR を用いた放射線による DNA 損傷の定量評価に関する研究
松尾 陽一郎，山口 雅，清水 喜久雄，泉 佳伸（福井大）
- 15:40-16:00 電子スピン共鳴法による人の爪を用いた週及的被曝線量評価の現状
廣田 誠子（広島大）
- 16:00-16:20 休憩
- 16:20-16:40 C3CA 化学線量計を使用した加速器中性子場における線量評価手法
楠本 多聞¹，小川原 亮²（1. 量研機構，2. 京都大）
- 16:40-17:00 チェレンコフ光閾値以下の放射線照射による水の発光現象の発見と応用
山本 誠一（早稲田大）
- 17:00-17:20 個人線量計に求められるものとガラスバッジの開発
宇部 道子，上野 智史，篠崎 和佳子，小口 靖弘

(千代田テクノル)

- 17:20-17:40 放射線生物影響の初期過程研究における線量分布の重要性
渡辺 立子 (量研機構)

線量計開発においては、感度・線量応答性のみならず、線量計素材の分子構造に始まり、測定の対象が生成するメカニズムを理解する必要がある。反応系の設計・制御、測定法の高感度化、シミュレーション等の研究を組み合わせることで、新しい線量計開発の共同

研究・外部資金の獲得につなげることを目指している。具体的には、医療や農業分野での利用が見込まれている低温プラズマ中の活性種の反応メカニズム解明に使う線量計開発を目指した申請を検討しており、来春にはそれを念頭に置いて第2回のシンポジウムを開催したいと考えている。ご興味のある会員にはぜひ参加していただきたい。

(都立産業技術研究センター 中川 清子)

峯岸 安津子さんを偲んで

長年にわたり会員として放射線化学会を支えてこられた峯岸 安津子さんが、2023 年 5 月 2 日にご逝去された。峯岸さんは、東京都立アイソトープ総合研究所（東ア研、現東京都立産業技術研究センター）で、アミノ酸の放射線照射で生成するラジカル種の ESR 研究に従事された。1989 年 3 月に東ア研を退官後、北海道大学から神奈川大学に移られた故相馬純吉先生の研究室に研究員として所属され、研究活動を継続された。

私が峯岸さんと初めてお会いしたのは、東ア研に入所した直後、職員組合女性部の歓送迎会の席であった。峯岸さんの退官と私の入所は、ちょうど入れ違いであった。峯岸さんは、私と交代する事を大変喜び、激励していただいたのを今でも覚えている。

その後、放射線化学討論会に参加して、神奈川大学で研究を続けていた峯岸さんと再会することとなった。さらに、ESR を使った研究を本格的に始めたため、電子スピンスサイエンス学会に参加したところ、ここでも峯岸さんとお会いした。峯岸さんは ESR の研究に長く貢献し、電子スピンスサイエンス学会では名誉会員という立場で、ほとんど雲の上の人であった。東ア研では入れ違いで一緒に研究することはなかったが、学会では必ずお会いしたので、研究の話から相談事まで、楽しい時間を過ごさせていただいた。また、峯岸さんが放医研の HIMAC で照射をしていたことが、私の HIMAC 利用のきっかけになり、神奈川大学で相馬先生の後任だった天野先生も紹介していただいた。天野先生が退官される時、峯岸さんが持ち込んで

いた実験用品を整理する事になり、荷物の運びだしのお手伝いをした。その際、HIMAC 照射用に脱気したアラニンの試料や、未使用の試料管・デュワー瓶などを譲っていただき、アラニンの試料はその後の研究にしっかり利用させていただいた。今となっても、お世話になりっぱなしだった。

コロナの影響もあり、ここ数年はお会いできなかった。峯岸さんと最後にお話したのは、2022 年 9 月に「放射線化学会の総会に出られないけれど、宜しく」という電話だった。2023 年 3 月に、元名工試の鳥山和美さんから、「峯岸さんの自宅に電話したが、繋がらない」と連絡をいただき、携帯電話、メール等で連絡を試みたが、返信いただけなかった。その後、鳥山さんは手紙を出されたが、戻って来た、との事で、心配になり住所を頼りに自宅に行ってみた。愛車はあるものの門の鍵はかかっており、不在なのは確かなのだが、近所の人もどうしているかわからない。介護保険を利用されていたのを思い出し、世田谷区の介護業者に連絡して、親族に連絡していただいた結果、ご逝去が判明した。親族は、大阪在住の姪なので、詳細な状況をうかがう事は叶わなかった。

コロナが明けたらもう一度お会いしたいと思っていましたが、かなわず残念です。私事ではありますが、心の支えになっていただき、ありがとうございました。心からご冥福をお祈りいたします。

（都立産業技術研究センター 中川 清子）

吉良さんから教わった基礎科学への心構え

去る 7 月 13 日、吉良さんが亡くなった。満 85 歳の誕生日の翌日。ずっと患ってはおられたが、約 1 か月前の 6 月 9 日には、勝どきから和光市まで理研 OB 会にひとりで出向かれたし、私は 6 月下旬には電話でお話もした。しかし肺の病は呼吸器への負担が大きく、急ぎ足であつという間のできごとであった。

放射線化学会誌の追悼文なので吉良さんが若い時の話を中心にしたい。関連論文も少し読んでいただけた

らと思う。吉良さんは光化学で有名な東北大理学部の小泉 正夫研究室の出身。1958 年に理研は特殊法人になって 1966 年に和光市への移転が始まったころ、原子力の重要度が増している中で、放射線、放射化学、放射線化学、放射線生物学などの研究室が一度に立ち上がった時期だった。「放射線化学も光化学と同じようなものだよ。」と言われたとかで、光化学に詳しい今村 昌先生が阪大から招かれて、理研で放射線化学研

研究室を立ち上げることになった。そこで博士号を取ったばかりの吉良さんがお供することになったのだ。とにかく放射線化学というキーワードは、光化学に比べてまだ斬新であった。ノートルダム大のHamil研でマトリックス法を使って目覚ましい成果をあげていた志田 忠正先生（博士課程は駒込理研の斉藤 信房研）が戻ってきて、技師の中野 和城さん等も加えて研究室が始まった。 ^{60}Co のガンマ線照射とバンドグラフを使ったパルスラジオリシスを始めることになって、電気や機械に強い吉良さんが後者を担当することになった。少しあとに、東工大の志田 正二研究室出身の荒井 重義先生が「パルスラジオリシスの唯一の日本人経験者」として合流され、志田、吉良、荒井の3人はご本人たちの好むと好まざるにかかわらず「理研放射線化学三羽ガラス」と呼ばれていた。一人だけ年少の吉良さんは、経験不足だし遠慮気味でもあった。残しておいた予算を買いたいもののあった志田さんにすっかり使われてしまったこともあったそうだ。（もちろん吉良さんは怒っていない。）そんなこともあったが、とにかく志田さんと吉良さんは、双方が亡くなるまで、本当の意味での終生の友であったことは知っていただきたい。

1960年代後半には海外ではパルスラジオリシスはLINACを使う方向で、すでにナノ秒の時代になっていた。500 nsの一発打ちのバンドではなかなか戦えない。吉良さんは、反応の遅い低温マトリックスに活路を見出そうとした。光化学の研究室出身ということもあり、当時から世界のサイエンスシーンで話題になっていたRehn-Wellerの実験（D. Rehm, A. Weller, *Isr. J. Chem.*, 8 (1970) 259）やMarcus理論（R. A. Marcus, *J. Chem. Phys.*, 24 (1956) 966）にも造詣が深く、荒井さんのアドバイスもあって、電子移動反応に焦点を当てることにした。トンネル過程であるかホッピングであるかが問題になっていたガラスマトリックスの長距離電子移動、そしてマトリックスに溶質を2つ入れて、その間の電子移動やホール移動を観察して、Marcusの予言した逆転領域を探そうという2つのテーマがあった。しばらくアルゴンヌのJ. D. Millerとの競争関係になったわけだ。

遅い時間分解能で低温の固体電子移動を追うしかなく、マトリックスではDonorとAcceptorの距離には分布が生じるので、それを積分した井口-平山（Inokuti-Hirayama）の式（M. Inokuti, F. Hirayama, *J. Chem. Phys.*, 43 (1965) 1978）を使って靴の上から足裏をかくような

ことしかできない。しかも礼儀正しくMillerに電子を任せてホール移動の解析に集中された。しかし、逆転領域は見つからない。Rehn-Wellerの実験と同じく自由エネルギー差の大きいほうで反応速度定数がばらつくのだ。

そんな時に発表されたのがCloss-Millerの実験（J. R. Miller, L. T. Calcaterra, G. L. Closs, *J. Am. Chem. Soc.*, 106 (1984) 3047）で、DonorとAcceptorを連結して距離を固定した化合物のアニオンの電荷シフト反応で逆転領域が見いだされた。Marcusの1992年のノーベル化学賞の公式声明にあるように、決定的証拠となった実験である。それに先駆けた吉良さんの結果（A. Kira, *J. Phys. Chem.*, 85 (1981) 3047）でも、よく見ると逆転領域が見えなくもないが、吉良さんは自分の結果に納得せず、強引なことはされなかった。そのあと光化学分野で又賀先生と大須賀先生のグループ（たとえばA. Osuka, S. Marumo, N. Mataga, S. Taniguchi, T. Okada, I. Yamazaki, Y. Nishimura, T. Ohno, K. Nozaki, *J. Am. Chem. Soc.*, 118 (1996) 155）を筆頭にWasielwski（M. R. Wasielewski, M. P. Niemczyk, W. A. Svec, E. B. Pewitt, *J. Am. Chem. Soc.*, 107 (1985) 1080）などMarcus理論を支持する結果が次々と提出されるようになった。

Closs-Millerの実験を吉良さんが実行することが可能だったかという、少なくとも理研のバンドでは時間分解能の関係で不可能だったし、そもそも有機合成により化合物を用意することもできなかった。（有機化学者に意義を理解してもらえなかった。）吉良さん個人は基礎研究の研究者として学力、実験力、どれをとっても劣ってはいなかったと思うが、環境と時の運で他の人が先に到達してしまったので、それはそれでゼロだと潔かった。吉良さん自身の価値観に基づけば、あと付け論文でテーマを長らえさせる気はさらさらない一方、挫折であり敗北でもあった。

放射線化学討論会は「基礎と応用」などと30年くらいは言い続けていると思う。でも基礎の部分は、ノーベル賞の研究にもつながったこの当時のレベルではないと私は思っている。（ダイマーイオンラジカルだって最初はNatureに載ったのだ（B. Badger, B. Brocklehurst, *Nature* 219 (1968) 263）。「もののあはれ」を好む日本において、基礎研究は、好きな研究対象を長々と相手しながら、いつまでも花鳥風月を愛でるような貴族的で優雅な態度が、正しく美しいと思われがちだが、欧米のサイエンスはもともと神学を起源にするので、容赦なく徹底的に神の作った世界の真理を追及する

ことが美しいとされる。そして、広く重要であるとされている問題に真摯に答えを出すのが基礎研究の熾烈な役割であると考えられている。それが最初にできなければ（神様に最初に囁かれなければ）負けを認めて降りるという、潔い態度で研究者はあるべきであるということも若い人は知っておいてほしい。ノーベル賞だって最初にやった人しか評価されないし、基礎科学では残した研究の意義と狙いと結果が多くの人に支持され、たくさん論文が引用されることのみが最大の関心事である。一方、我が国における応用研究は、経済的側面や生産的側面を含めると、勝ち残る技術はたった一つなのにも関わらず、普及しなくても小さな成功で赦免される。私個人は研究費も返さなくてよいのは不公平だと思っている。

その後... の話を少し。主任研究員になられて4年目の吉良さんに呼ばれて、1990年に理研に入所したときには「大学でもできる研究を理研でやってはいけない」と言われたので、私は電子移動反応の不可逆性に電子状態の位相緩和がかかわっていることを明らかにしたいと企んでいた。つまり束縛励起状態が連続状態になるきっかけが見たかった。吉良さんの理解を得て苦勞して予算を取ろうとしたけど、研究所からはさっぱり認めてもらえなかった。某大臣のポケットマネーのお金はもらったけど、そっくり播磨研究所に取られてしまった。一方で当時はフェムト秒で見えると思ったのだが、実際はそれよりずっと高速の緩和過程であることが予測違いだった。（時間を遅くするために液体ヘリウム実験が必要だったのは吉良さんのバンデと事情が似ている。）ちなみに、半導体固体を除いて30年以上経ってもそれはまだ見えていない。これは私にとっての敗北だった。

その頃、放射線化学に関する財源はすっかり消えていて、日米条約に沿った大きなソーラーのプロジェクトが充当されていた。2期目に入っていて炭酸ガス削減もテーマの一部で「人工光合成」という予算名だった。（これも数年で廃止されることになる。）一方で放射線化学はすでに流行遅れで、理研のバンデもコバルト線源も外環開通のために設備ごと廃棄された。吉良さんは、その少し前に常温核融合騒動に巻き込まれたが、理研内でグループを組んで、ごく短期間に「クロ」

の判断を下し、科技庁は無駄な予算を使わずに済んだこともある。理研とはそういう場所である。

私が移籍した当時に主任会議長だった吉良さんはその手腕を買われ、数年で、有馬理事長と長柄副理事長から一本釣りされて理事に昇格された。のちに副理事長、そしてJASRIの理事長へと進まれてサイエンスからは離れられたように見えるだろう。語学も堪能で外国人と電話で喧嘩もできたし、ヒトゲノムプロジェクト、SPRING-8、横浜研などを次々とプロデュースされていったわけだが、優れたサイエンティストとして、これらの後押しと切り盛りをされたのが吉良さんの生きざまであった。予算の論理をぶつけてくる役所に寝技をかけながら、科学者として仕事しやすい環境を理研に創出することによって、多くの研究者がのびのびと暮らす恩恵を受け、理研が大きな発展の時期を迎えたのは明らかであった。たとえば、ヒトゲノム日本班のカギは分光装置の開発であったが、イニシャチブを取って、いち早く企業を巻き込んでの体制を整えられたのも吉良さんだった。それは世界のサイエンスの状況を「潔い哲学」として理解している優れたサイエンティストが、ガバナンスを取る意義を広く見せつけたものだと思っている。理研に自らをささげる覚悟＝理事になられたときの心境は80歳を越えられて、古希のお祝いを開催したときに、はじめて言葉としてうかがった。その言葉はその日に聴いたお得意のピオラ演奏の調べとともに忘れることはできない。理事に就任された当時、研究室は廃止になり、私はひ弱な研究員として置いてけぼりにされたわけだけど、そういった吉良さんの決意は重々理解していたつもりで、自分のことは自分でやることにして頼もしく遠くから見ていたものである。

2000年頃副理事長になられたとき理研所員の前で「こんなに科学技術に予算が付くのは、そう長くは続かないから、今のうちにきちんとした研究を残しておけ。」というスピーチをされたことがある。当時は誰もそれを本気で信じなかった。思ったより長くかかったかもしれないが、それはその通りになった。日本の科学技術の行方を最後まで案じておられたことを皆さんにはお伝えしたい。

（北里大学理学部化学科 丑田 公規）

吉良 爽 元高輝度光科学研究センター理事長の思い出

(財) 高輝度光科学研究センター (JASRI) 理事長だった吉良さん(理研ではさん付けで呼んでいましたので)が 2023 年 7 月 13 日(木)にご逝去されました。吉良さんが放射線化学会誌(104 号 p. 47)に書いていた今村先生の追悼記事で「理研が和光に移って大型装置が稼働し始めてからのおよそ 10 年間は日本の放射線化学の発展に貢献した理研の放射線化学研究室の黄金時代だったと書いた頃の吉良さんとの楽しかった思い出を書きます。吉良さんがもっとも張り切って研究をしていた時代です。そして理研の放射線化学の全盛期の終わる頃に吉良さんが放射線化学会誌(32 号 p. 33)に書かれた非常にユニークなパルスラジオリシスへのコメントは、私自身が既に開始したばかりの放射線の光に対する優位性が明確な産業技術であるリソグラフィの世界です。開始前はまだ実用化されていたのは 365 nm 露光技術で、放射線を使うのはずいぶん先かなと思いましたが確実に優位な技術である放射線に置き換わりました。それまで NTT, NEC, 日立等、多くの企業から KrF エキシマー, ArF エキシマーについての問い合わせがありました。NTT や電機メーカー、化学メーカーから次々とコンタクトがあるし、米国で発表してくれと頼まれ、発表するとすぐベル研(正確にはベルコアに移行中でした)や IBM から招聘され、すごい熱気になりました。それまで、あまり興味なかった田畑先生も退官後に急に関心を持たれるようになりました。最終的には放射線の EUV やそれより高いエネルギーの Beyond EUV になるが、KrF エキシマー, ArF エキシマーとステップを踏み、2019 年からは放射線である EUV リソグラフィでの半導体の量産が始まっています。ようやく放射線による最先端 EUV リソグラフィでの半導体の量産が始まりました。

1989 年には非常に多くの電気、化学、繊維メーカーが参加した Polymers for Microelectronics が開催されました。吉良さんのいう提案を拡大解釈すると最終的には放射線が優位なプロセスを用いるが、それまでは光には助けてもらう。私個人としても理研で大変よい経験をさせていただき、大きく発展できて、感謝しています。卒論生としてサイクロトロンを用いた高分子の LET 効果の研究をし、大学院を中退して助手になるまで、パルスラジオリシスを習得させていただき、東大のピコ秒パルスラジオリシスの建設時の唯一のパルス

ラジオリシスの経験者として非常に大きな恩恵を与えてもらったことは大変感謝しています。建設予算確保に大きな貢献をしていただいた大島先生、日本で最高の線形加速器の権威の田中先生をはじめ協力体制を組織され、慎重にも建設直前にナノ秒パルスラジオリシス用加速器を確保して自分たちだけでナノ秒パルスラジオリシスシステムを作製する経験をさせていただいた田畑先生、そして建設後に小林 仁助手(後に高エネルギー研究所教授)、上田 徹技官、小林 利明技官という、欧米に勝るとも劣らないサポート部隊を組織し、サポート部隊にも、アイディアも含めた研究リーダーとして自由に研究開発をしてもらっていました。このような体制が東大のピコ秒パルスラジオリシスの成功に非常に大きな貢献をしていると思います。

理研の放射線化学研究室は放射線化学会の初代の事務局が置かれ、理研の初代と 2 代目の主任研究員の千谷 利三先生と篠原 健一先生は放射線化学会の初代と 2 代目会長で放射線化学会の設立に大きく貢献した研究室です。放射線化学会の 12 代目の会長で初代の学会事務局長を務め、3 代目の放射線化学研究室の主任研究員だった今村さんでした。その 4 代目の主任研究員の吉良さんは放射線化学研究室の最後の主任研究員でした。その後、理研の副理事長になった吉良さんは最後に JASRI の会長として現役生活を終えました。お目にかかっただけの初代主任研究員の千谷先生は別として、2 代目の主任研究員の篠原先生は軍に頼まれて、九州大の教授時代、広島と長崎の原爆調査をされ、理研を定年後は早稲田大の教授になっていました。篠原先生とは研究室の共通利用テーブルで何十回も二人で茶飲み話をし(職員は業務があったので)、後々大変参考になる話を聞きました。研究室に物理系の人がないのに、加速器等があったこともよく理解できました。そして、3 代目の主任研究員の今村さんには本当にいろいろなことで大変お世話になりました。理研の放射線化学研究室の黄金時代に、週の半分以上理研にいた最初の大学院生だった私は高分子の LET 実験では今村さん、松井さん、関さん、パルスラジオリシスの実験では荒井さん、吉良さんと実験し、先に亡くなられた吉良さんの生涯の盟友だった志田さんには大学院生の時に米国化学会の当時非常に盛会だった電荷移動重合の国際会議の招待講演を頼まれるきっかけになる荒

井さんたちとの論文の重要なモノマーカチオンラジカルの吸収スペクトルを測定してもらいました。(志田さんには共著者になってもらうために伺ったら、カチオンラジカルの測定だけで共著者かといわれ、あっさり没、化学会の会誌に志田さんに放射線化学の新しい研究紹介の記事を頼まれて書いた時も共著者は没でした。)しかし、若い研究者を支援することが好きな方でした。吉良さんは今村さんの感覚もあり、志田さんに少しは今村さんに感謝したらとはっきりいいつつ、志田さんとは本当に気が合っていました。志田さんは非常に評価の高かった精密で膨大な実験データをまとめるだけでなく、理論的に体系化することを強く望んでいました。たとえば長倉研の岩田さんたちのような方たちに協力してもらうことを期待していました。京都の会議から吉原先生と長倉先生のご自宅の関係で、「ひかり」でなく、「こだま」で帰った時も、長倉先生は窓側で私は隣に座らされ、長倉先生はまったく休まねずにほとんど一人で喋っていて、そのタフさに、本当に驚きましたが、その時も志田さんのことは非常に高く評価していたし、すごく好意的でした。若い理論屋さんにとっての問題は、志田さんの膨大なデータを体系化する予測できない期間の長さが私なんかでも共同研究は無理だなと思いました。その頃、珍しく、志田さんに研究室のご愛用の駅の近くの飲み屋でなく、ご自宅に食事に来ないかといわれ、そこで、実は京大に助教授として招へいされているがどう思うかといわれました。そんな重大な事項に大学院生が応えられるはずもないし、志田さんのような研究者になれて、理論の不勉強を後悔する学生はいるかなといいかけて、志田さんは返事なんか期待していないと気づき「わかりません」といったらそれでこの話は打ち切りでした。志田さんの大学行きが、膨大なデータを体系化するために自分で理論を勉強するしかないと思ったのか、自分ができなかった実験と理論の両方ができる大学院生を育てようとしたのか、今となってはわかりません。

一つだけ残念だったのは、講演会は知りませんでした。「放射線化学の歴史と未来」を送付してもらい、桜田 一郎先生と桜田先生のお亡くなりなれた後を引き継がれた岡村 誠三先生たち多くの方々の放射線高分子化学の産業応用の活動が一休みに入ったことでした。卒論で理研のサイクロトロンを利用した桜田先生と関係の深いポリビニールアルコールの LET 効果の研究をしました。その時、桜田先生の「高分子化学とともに」を購入し、なぜ高分子化学の大先生が原子力、放

射線高分子化学に夢を見たのか前から知りたかったことがわかりました。東大の工学部の機械系学科に進学したのに、私もなぜか原子力工学科に夢を見て、一年棒に振って転科し、小さなクラブの後輩の今は京大数学科名誉教授になっている柏原 正樹君に同学年になってしまったよと笑いあったことを思い出し、その後、この本のあとがきで、同じクラブだったことも知り本当にびっくりしました。原子力に同じような夢を見、同じクラブにいて、同じ放射線高分子化学ですから、それだけに桜田先生の夢が一休みしたことにごく残念だったことを覚えています。特に、前述の Polymers for Microelectronics の国際会議が盛会だった年だったので複雑な気持ちでした。

最後に吉良さんには、吉良さんの始めた高輝度光科学研究センターでの目玉業績であったセンターと利用者の効率的運用の要となるアドバイザー制度に、半導体産業のような先端的な産業への放射光利用が理解できる人、高分子も放射光もわかり、高分子学会にも影響のある人を探してくれと頼まれました。吉良さんのご要望にピッタリの方はいました。東大の名誉教授になったばかりで、私の研究室の特任教授として、私や学生たちにアドバイスしていた堀江 一之名誉教授の研究分野は高分子構造物性(含繊維)、高分子物性・高分子材料、高分子合成、工業分析化学で、高分子学会や高分子研究者への影響力や知名度は私と比較することなど、全くできない人なのに、研究も一緒にやったこともあり、年上なのに Polymers for Microelectronics 会議や後述の ACS Symposium Series の仕事でも私をサポートしてくれました。前述の Polymers for Microelectronics 会議と同様な国際会議をこの分野の責任者のベル研の Larry F. Thomson, IBM の C. Grant Willson (日本国際賞受賞者)と3人で毎年行なった時も堀江さんにサポートしてもらいました。当時米国化学会(ACS)の ACS Symposium Series の本で最も売れたシリーズ本になりました。私にとっては研究室の特任教授でいてくれる方が本当にありがたかったが、どう比較しても研究は別として、堀江先生の才能を発揮するのにどちらがいいかは明白でしたが、二人の仲からして、これだけ親密な関係でも田川研にとって役立っていることはわかっていました。田川研にとっては財政的にも全く問題ないことも明白でしたが、「堀江先生はどうですかと訊いても答えられないですよ、吉良理事長はいい人だし、私も恩義があるので、どうですか。」というようなことをいったら、嬉しそうに引き受けた

いといわれました。しばらくして、吉良さんから期待した以上に素晴らしい人ですねと感謝の電話がかかってきたし、車ですぐの所だったのと、結構、吉良さんとは視察などの公的な関係もあったし、そのうち、実験もしにいったので、よく SPring-8 に行くようにもなったし、堀江先生が亡くなられ、吉良さんが引退するまで、よく理事長室に行きました。

吉良さんは理研に来る前の東北大学時代から SPring-8 の理事長を退職するまで、光化学、放射線

化学、太陽エネルギー、放射光利用等にかかわって、広い視点から放射線化学の将来を見ていたと思います。吉良さんの放射線化学への思いの一部は放射線化学会誌に書かれた今村 昌元理研主任研究員の追悼文などからも伺えます。研究室のメンバーはみんな本当にいい人たちでした。

吉良さんの数々のご功績を偲び、心から哀悼の意を表するとともに、謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

(大阪大学産業科学研究所 田川 精一)

本 会 記 事

第 118 回 日本放射線化学会 理事会議事録

日時 令和 5 年 4 月 3 日 (月) 18:00-

場所 オンライン (Zoom)

出席者 中川 清子 (都産技研), 平出 哲也 (原子力機構), 前川 康成 (量研), 高橋 憲司 (金沢大工), 浅井 圭介 (東北大院工), 辻 正治 (九大), 丑田 公規 (北里大理), 伊藤 賢志 (産総研), 田口 光正 (量研), 鷲尾 方一 (早大理工学術院), 駒口 健治 (広大院工), 関 修平 (京大院工), 熊谷 純 (名大), 鈴木 信三 (京産大理), 青木 昭二 (イー・シー・イー), 泉 佳伸 (福井大), 林 慎一郎 (広島国際大), 山路 稔 (群馬大院工), 加藤 隆二 (日本大), 岡 壽崇 (原子力機構), 廣木 章博 (量研), 楊 金峰 (阪大産研), 間嶋 拓也 (京大院工), 山下 真一 (東大), 池田 時浩 (理研), 山沖 留美 (大阪薬大), 勝村 庸介 (原子力システム研究懇話会), 田川 精一 (阪大産研), 南波 秀樹, 小嶋 拓治 (ビームオペレーション), 越水 正典 (静岡大)

議題

1. 前回 (第 117 回理事会) 議事録 (案) (事務局)
第 117 回理事会の議事録が確認された (事務局).
2. 令和 4 年度役員等名簿 (事務局)
 - 令和 4 年度の新役員等名簿が承認された (事務局).
3. 令和 4 年度賛助会員名簿 (事務局)
 - 令和 4 年度賛助会員名簿が紹介された (事務局).
4. 予算執行状況 (事務局)
 - 予算執行状況が紹介された (事務局).
5. 入退会者一覧 (事務局)

- 入退会者一覧が示され, 2 名 (正会員 1, 学生会員 1) の入会, 2 名 (正会員 2) の退会, および 3 名 (正会員 3) の退会が報告された (事務局). 正会員 1 名の退会が承認された (事務局).

6. 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).
7. 編集委員会報告 (田口編集委員長)
 - 編集委員会から 115 号は 4 月末発行予定と報告があった. (田口編集委員長).
8. 企画継承委員会報告 (越水企画継承委員長)
 - 企画継承委員会から, 時期は未定であるものの座談会を実施予定である旨の報告があった (越水企画継承委員長).
9. 放射線化学討論会報告
 - 第 65 回放射線化学討論会について, 参加者数および収支決算についての報告があった (越水氏). 第 66 回放射線化学討論会について, 名古屋大学での開催予定について, 概要が報告された (熊谷氏).
10. 線量計に関するシンポジウムについて
 - 線量計に関するシンポジウムの計画について報告があった (中川会長, 林氏, 越水氏). 大型予算への応募を考慮すると, 早く動くことが必要との指摘があった (伊藤氏). また, 学術変革に応募するのであれば, 中心となる学術の新規性が必要との指摘があった (関氏).

以上

本 会 記 事

令和5年度役員等名簿（令和5年10月6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） 斎藤 恭一（早大理工総研） 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） | 篠野 嘉彦 南波 秀樹 中川 和道（阪大産研） |
| 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） 青木 祐太郎（福井工大） | 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） |
| 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 4 年度会計決算報告書（令和 5 年 8 月 31 日現在）

収入の部

（単位：円）

| 項目 | R4 年度予算案 | R4 年度決算 | 内容等 |
|------------------|-----------|-----------|--|
| 賛助会員 (14 社 24 口) | 240,000 | 240,000 | R4 年度契約数 24 口 (14 社) |
| 個人会員 (172 名) | | | |
| 正会員 (147 名) | 770,000 | 680,000 | 正会員 147 名 (未納 32 名：累計 367,000 円) |
| 学生会員 (12 名) | 13,500 | 10,500 | 学生会員 12 名 (未納 8 名：累計 39,000 円) |
| 雑収入 (利息等) | 5,000 | 106,195 | 著作権料 106,186 円 受取利息 (国際文献分 9 円, 事務局分：3 円) |
| 積立基金からの繰り込み | － | － | |
| 前年度繰越金 | 2,078,589 | 2,078,589 | |
| 合計 | 3,107,089 | 3,115,287 | |

支出の部

| 項目 | R4 年度予算案 | R4 年度決算 | 内容等 |
|------------------------|-----------|-----------|--|
| 通信連絡費 | 20,000 | 1,110 | レターパック |
| 振込手数料 | － | 4,870 | 国際文献社分 330 円, 事務局分 4,540 円 |
| 事務委託費 年間業務費 | 700,000 | 609,378 | R4.6-8 月分 87,414 円 R4.9-11 月分 379,656 円 R4.12-R5.2 月分 69,564 円 R5.3-5 月分 72,744 円 |
| 会議費 | 22,110 | 22,110 | Zoom (Standard Pro プラン) 1 年契約 |
| 放射線化学討論会援助 | 200,000 | 16,388 | 第 65 回 放射線化学討論会：16,388 円 |
| 先端放射線化学 シンポジウム補助 | 100,000 | 70,000 | 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 旅費補助 10,000 円× 7 名 |
| 若手の会 夏の学校補助 | 70,000 | － | |
| 学会賞 | 100,000 | － | 学会賞楯 (昇栄産業) 3 名 分 |
| 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 | 49,500 | Dropbox 利用料金 (49,500 円) |
| 日本放射線研究連合負担金 | 50,000 | 50,000 | R4 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 | 10,000 | R5 年度会費：10,000 円 |
| ホームページ運営費 | 60,000 | 5,808 | ドメイン利用料金 1,848 円 レンタルサーバー利用料金 3,960 円 |
| 予備費 | 200,000 | － | |
| 次年度繰越金 | 1,224,979 | 2,177,123 | |
| 合計 | 3,107,089 | 3,115,287 | |

本 会 記 事

令和4年度入退会者一覧

入会

| 会員種別 | 会員番号 | 会員名 | 所属機関名 | 紹介者 |
|------|------|--------|----------|-------|
| 正会員 | 765 | 井上 典洋 | 日立造船株式会社 | |
| 正会員 | 766 | 水野 るり恵 | 東京大学 | 櫻井 博儀 |

退会

| 会員種別 | 会員番号 | 会員名 | 所属機関名 | 退会日 |
|------|------|-------|---|-----------|
| 正会員 | 98 | 神谷 富裕 | 群馬大学 量子ビーム科学研究部門 | 2023/3/31 |
| 正会員 | 101 | 河合 潤 | 京都大学大学院工学研究科 材料工学教室 | 2022/9/20 |
| 正会員 | 166 | 篠原 信好 | 横浜市立大学 理学部機能科学科 | 2023/8/31 |
| 正会員 | 306 | 伴 弘司 | 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所放射光科学第二研究系 | 2023/8/31 |
| 正会員 | 435 | 平田 浩一 | 産業技術総合研究所 | |
| 正会員 | 499 | 越川 博 | 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門高崎量子応用研究所 | 2023/8/31 |
| 学生会員 | 751 | 志村 亮弥 | 早稲田大学先進理工学研究科 共同原子力専攻 | 2023/7/20 |
| 学生会員 | 764 | 稲吉 琴子 | 東邦大学 | 2023/8/31 |

令和5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116号〈WEB版〉

令和5年10月31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