

放射線化学

2016 No. 101

RADIATION CHEMISTRY

日本放射線化学会

JAPANESE SOCIETY OF RADIATION CHEMISTRY

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

〈巻頭言〉

これからの 50 年に向けて

〈展望・解説〉

放射線物理化学過程に関する最近の進展

〈受賞記事〉

放射線による新しい DNA 損傷過程の提案

〈とびっくす〉

イオン液体中の多糖類の放射線架橋反応に関する研究

〈放射線利用紹介〉

神奈川県重粒子線治療プロジェクトの現状

〈SARAC の話題から〉

放射線加工技術を駆使した生体親和性材料の医療への応用

シンクロトロン放射光を用いた放射線生物研究

〈書評〉

「放射化学の辞典」日本放射化学会編

〈海外レポート〉

13th Tihany Symposium on Radiation Chemistry 参加報告

環太平洋国際化学会議 (Pacifichem 2015) 参加報告

TSRP-APSRC-2016 参加報告

〈ニュース〉

ICRR 2015 報告

日本原子力学会 2015 年秋の大会 参加報告

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告 (1)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告 (2)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告 (3)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」報告

第 10 回高崎量子応用研究シンポジウム参加報告

〈お知らせ〉

放射線化学賞の選考結果について

第 59 回放射線化学討論会のお知らせ

〈本会記事〉

〈賛助会員名簿〉



〈巻頭言〉

これからの 50 年に向けて 小嶋 拓治 ... 1

〈展望・解説〉

放射線物理化学過程に関する最近の進展

..... 甲斐 健師, 横谷 明德, 藤井 健太郎, 渡邊 立子 ... 3

〈受賞記事〉

放射線による新しい DNA 損傷過程の提案

..... 岡 壽崇 ... 13

〈とびっくす〉

イオン液体中の多糖類の放射線架橋反応に関する研究

..... 木村 敦, 長澤 尚胤, 島田 明彦, 田口 光正 ... 19

〈放射線利用紹介〉

神奈川県重粒子線治療プロジェクトの現状

..... 竹下 英里, 草野 陽介, 山田 聡, 中山 優子, 古川 卓司, 水島 康太, 原 洋介, ... 23
早乙女 直也, 丹正 亮平, 皿谷 有一, 野田 耕司

〈SARAC の話題から〉

放射線加工技術を駆使した生体親和性材料の医療への応用

..... 廣木 章博, 大山 智子, 田口 光正 ... 31

シンクロトロン放射光を用いた放射線生物研究

..... 藤井 健太郎 ... 35

〈書評〉

「放射化学の辞典」日本放射化学会編

..... 小林 慶規 ... 39

〈海外レポート〉

13th Tihany Symposium on Radiation Chemistry 参加報告

..... 西井 聡志 ... 40

環太平洋国際化学会議 (Pacifichem 2015) 参加報告

..... 渡邊 俊 ... 41

TSRP-APSRC-2016 参加報告

..... 田中 真人 ... 42

〈ニュース〉

ICRR 2015 報告

..... 吉田 陽一 ... 45

日本原子力学会 2015 年秋の大会 参加報告

..... 山嵜 優 ... 45

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告 (1)

..... 吉田 哲郎 ... 46

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告 (2)

..... 西井 聡志 ... 47

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」参加報告(3)	黒田 勇樹	48
SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」報告	越水 正典	49
第10回高崎量子応用研究シンポジウム参加報告	天田 春代	50

〈お知らせ〉

放射線化学賞の選考結果について	柴田 裕実	51
第59回放射線化学討論会のお知らせ	前川 康成	52

〈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, Danvera, MA01923, USA. TEL (978)750-8400, FAX (978)750-4747; www.copyright.com) へ。

Overseas

Report of 13th Tihany Symposium on Radiation Chemistry ·····	Satoshi Nishii ···	40
Report of the 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies ·····	Shun Watanabe ···	41
Report of the TSRP-APSRC-2016 ·····	Masahito Tanaka ···	42

News

Report of ICRR 2015 ·····	Yoichi Yoshida ···	45
Report of 2015 Fall Meeting of Atomic Energy Society of Japan ·····	Suguru Yamaso ···	45
Report of SARAC2015 and JSRC Summer School (1) ·····	Tetsuro Yoshida ···	46
Report of SARAC2015 and JSRC Summer School (2) ·····	Satoshi Nishii ···	47
Report of SARAC2015 and JSRC Summer School (3) ·····	Yuki Kuroda ···	48
Report of SARAC2015 and JSRC Summer School ·····	Masanori Koshimizu ···	49
Report of the 10th Takasaki Advanced Radiation Research Symposium ·····	Haruyo Amada ···	50

Information

Notice of the Selection Committee for 2014 Award ·····	Hiromi Shibata ···	51
Announcement of the 59th Annual Meeting of Japanese Society of Radiation Chemistry ·····	Yasunari Maekawa ···	52

Announcements

List of Support Members

これからの 50 年に向けて

日本放射線化学会会長

小嶋 拓治



我が国における放射線化学研究者の組織として、日本放射線化学会は、1965年11月13日に発足して昨年50周年を迎えた。時を同じくして発行された「放射線化学会誌第100号記念特集」を引くまでもなく、放射線化学は、初期過程等における物質と放射線との相互作用に係る基礎研究、放射線源の開発・用途拡大、材料・生物・医療への応用と、非常に多くの領域にわたる共通基盤をなす学問となっている。改めて、放射線化学の大いなる進展をもたらしてくださった諸先輩方の弛まざるご努力に心から敬意と感謝を表します。

さて、この機に、学会の設立趣旨をたどると、学会の範囲は、放射線化学は、いわゆる化学やの化学といったものとは趣を異にするものであり、例えば初期過程などにおいては重要な物理領域を包含し、また生物作用なども密接に関係する「放射線化学に関する物理、化学及び関連分野」の領域とされている（放射線化学 No.1, p.2）。そして、放射線化学を周辺分野との関連で研究する、あるいは、放射線の特色を利用して科学研究をする、言い換えると放射線を特異的に見るよりも自然科学の1つとして普遍的な視点でとらえる（放射線化学 No.80, p.15 一部変更）という当時の欧米にはない日本独自の基本姿勢による取り組みが進められてきた。学会創立40周年の平成18年に発行された教科書「放射線化学のすすめ（学会出版センター）」、及び放射線化学会誌第100号にこの成果及び進捗がそれぞれまとめられているように、着実にその方向に進んでいる。

これからの50年も、時の流れとともに、放射線源や測定機器類の進歩も伴って、放射線化学は常に新たな

面を拓いていくことになるが、この基本姿勢を堅持することには変わりはないだろう。ただ、世の常として範囲が広がると密度が低くなることもままあり、「放射線化学」における研究の集合体は、その共通基盤として波及範囲を拡大する一方で、集合体を形成する個々の研究がどのように連携・融合しているかが外部からも自らも次第に見えにくくなってきているのではとの危惧はある。また、東日本大震災の影響、研究・学校法人の仕分け・再編などの体制変化、また質的成果だけでなく時間（期限）が求められる環境の中、放射線化学のこれまでの足跡が今現在目立たなく翼を休めているようにも見えてしまい、その中の自分の立ち位置に自信を持ち続けることが大変であることも予想される。

これまでの50年の成果は、幾多の困難を乗り越えての普遍事実の積み重ねであり、これから50年あるいはそれ以降に、今は点に見えるものでもいずれはつながり1つの体系をなすことに違いない。研究者は、自分が放射線化学の中のどこにいて、何をすべきかを常に確認しながら、それを貫き通して進めばよいと考える。そうはいつても、処々ある激流を乗り越えるには、孤軍奮闘では大変である。そんな時こそ、表裏の顔の使い分けや人材・予算の獲得・有効活用も含めて、同志の集まりである日本放射線化学会を頼り、情報を共有して、その組織力を上手く利用すべきと考える。

また、当学会は、継続して、国内外における放射線化学の基礎あるいは応用に携わる研究者の横断的連携、放射線化学周辺の異なる学問領域との緊密なコミュニケーションの場の提供、また、将来を担う若手研究者・技術者の育成を推進して、放射線化学の量的質的な発展への環境を整える努力をする所存である。

学会員諸賢には、これからの50年に向けて、ますますのご活躍とともに、学会へのご支援、ご協力、ご鞭撻をお願い申し上げます。

For the Next 50 Years

Takuji KOJIMA (National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology),

〒370-1207 群馬県高崎市綿貫町 1233

TEL: 027-347-3766, FAX: 027-347-3306,

E-mail: kojima.t@beamope.co.jp

放射線物理化学過程に関する最近の進展 (前編)

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

甲斐 健師*

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

横谷 明德, 藤井 健太郎, 渡邊 立子

We calculated cross sections, stopping powers, and energy loss rates for rotational and phonon-mode excitations caused by the impact of an electron in an energy region from 0.1 meV to 100 eV injected into liquid water. We performed calculations assuming an optical approximation with the dielectric functions that are experimentally reported in the literature. The values for rotational excitation processes in the liquid phase are less by three orders of magnitude than those in the gas phase because of the screening effect of neighboring water molecules on the interaction between the incident electron and water molecules. These results suggest that the cross sections in the liquid phase are significantly different from those in the gas phase. The values for phonon-mode excitations in the liquid phase are close to those reported for amorphous ice. Furthermore, we observed that the energy loss rates, which are derived from the stopping power, depend significantly on the electron energy, particularly below 1 eV. The values obtained here will allow us to precisely estimate the decelerating process of an electron in liquid water to predict radiation effects such as chemical processes in water radiolysis or biomolecular damage induction strongly involved in low energy electron processes.

Keywords: liquid water, electron impact, cross sections, stopping powers, energy loss rates, rotational and phonon excitations

Recent progress of radiation physicochemical process (first part)

Takeshi KAI* (*Japan Atomic Energy Agency*), Akinari YOKOYA, Kentaro FUJII and Ritsuko WATANABE (*National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology*),

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

TEL: 029-282-5583, FAX: 029-282-6122,

E-mail: kai.takeshi@jaea.go.jp

1 はじめに

著者らは、放射線物理化学過程に注目し、低エネルギー領域における液体水の電子衝突断面積を計算し、水中における低エネルギー電子の減速過程の基礎研究をシミュレーションにより行ってきた。それらの研究成果を基に、孤立スパーの様な最も簡単な系において、DNA 内部から電離した 2 次電子が関与する修復され難いクラスター DNA 損傷生成過程を新たに理論予測した。これら一連の研究成果を本稿前・中・後編として解説する。

2 放射線による DNA 損傷研究

細胞中に高エネルギー荷電粒子 (1 次電離放射線) が照射されると、荷電粒子が細胞中に進入する中、媒質との相互作用により、半径 10 nm 程度の微小領域に、2 次生成物である電離した低エネルギー 2 次電子やフリーラジカルが生成される。この微小領域は孤立スパーとよばれ、放射線作用の最小単位であり、高エネルギー荷電粒子の飛跡に沿って疎らではあるが無数に生成される。また、X 線や γ 線のような高エネルギー光子を照射しても、コンプトン効果、光電離、および Auger 過程により高エネルギー電子が生成され、その高エネルギー電子も同様に細胞中に無数の孤立スパーを生成する。これらの 1 次電離放射線や高エネルギー電子は、媒質との衝突によるエネルギー付与を繰り返すことにより徐々に減速し、電子線の場合、エネルギーが数百 eV 程度になるトラックエンド近傍で最も密にエネルギーを付与する。この 2 次生成物が密集する領域はブロッブとよばれ放射線作用が最も高い領域となる。これらの 1 次電離放射線、および 2 次生成物が細胞中の DNA と相互作用すると、DNA の鎖切

断, 塩基損傷, DNA から塩基が脱離した AP サイトのような不可逆的な損傷が生成される. 細胞には DNA 損傷を修復する酵素が備わっているが, この修復作用が正常に機能しないと, 最終的に染色体異常や細胞死のような生物影響を誘発する要因の 1 つになると考えられている.

放射線により生成された DNA 損傷のほとんどは, 損傷を除去する酵素の働きにより数時間以内に修復される. しかしながら, DNA の 1 もしくは 2 ヘルカターン (約 7 nm) 以内に複数個の損傷が局在化して生成されると, DNA の化学修飾変化, および複雑な構造的ゆらぎが原因となり修復酵素の働きが阻害される. この様な損傷が局在化したタイプの損傷はクラスター DNA 損傷とよばれている^{1,2)}. しかしながら, 実際の放射線照射実験では, DNA 損傷の空間分布を数 nm 単位で詳細に分類することは非常に困難であるため, 塩基損傷, AP サイトまたは鎖切断等を人工的に組み合わせ, 様々なタイプのクラスター DNA 損傷を人工合成し, 修復酵素と作用させることで, クラスター DNA 損傷の修復効率を調べる研究がなされている³⁾. これらの研究成果から, クラスター DNA 損傷のタイプは更に大きく 2 つに分類できることがわかってきた.

1 つ目のタイプは互いの損傷部位が数 nm 以内に局在化したクラスター DNA 損傷で, 修復酵素の損傷部位への結合を強く阻害し, 修復酵素が DNA の損傷部位を取り除く作用 (損傷除去) が正常に機能しないタイプである. この理由として, 修復酵素のサイズが数 nm 程度であるため, 数 nm 以内に密集した損傷部位へのファン・デル・ワールス力による結合力が極端に低下することが主な要因であると考えられている. この場合, 放射線により生成された損傷は不適切なゲノムコードとして残り, DNA の誤った複製を繰り返すことで染色体異常を誘発し, 細胞が将来的に発癌する可能性があると考えられている. 2 つ目のタイプは損傷部位が数 nm 以上離れて局在化したクラスター DNA 損傷で, 修復酵素の損傷部位の一部への結合にあまり影響を与えない. この場合, 修復酵素による損傷除去が促進され, その部位は正常な DNA 構成分子が新たに結合するまでの間, 一時的に DNA 鎖切断となる. そのため, 損傷が除去された部位から数 nm 離れた場所に放射線照射による 1 本鎖切断部位が対岸の鎖に存在していると, 損傷除去の結果として変換された鎖切断と合わせ, 2 本鎖切断が生じる. この場合, DNA 複製等の機能が失われ, 最終的な生物影響として発癌に関与しない細胞死にいたる可能性が考えられている. たとえば, 数塩基対以内 (損傷の相対距離が 1 nm 以

内) に生成された 2 つの塩基損傷から構成されるクラスター DNA 損傷は, 塩基除去修復酵素 (グリコシラーゼ) の結合を強く阻害する一方, これら塩基損傷の相対距離が数塩基対以上 (損傷の相対距離が 1 nm 以上) であれば, 修復酵素は損傷部位を除去可能である. すなわち, 放射線が照射された細胞の最終的な生物影響は, 各損傷部位の種類や空間分布 (相対距離) に強く依存することがわかる. そのため, 放射線により生成される DNA 損傷の空間分布についての研究は, 細胞が発癌にいたるか, または細胞死にいたるかの運命を予測するための主な要因の 1 つになる.

今日まで, 様々な要因が DNA 損傷の空間分布に影響を与えることが知られているが, それらの放射線作用は大まかに “間接効果” と “直接効果” に分類される^{4,5)}. 間接効果は, 水の放射線分解により生成される OH ラジカルのような拡散性のフリーラジカルによる作用で, ピコ・ナノ秒の時間スケールで媒質中を拡散し, DNA と相互作用する. この間接効果については, 実験, および計算機を利用したモデルシミュレーションの両面からよく研究されている. また, 間接効果と直接効果の比率はおおよそ 3 対 1 であると考えられているが, 間接効果は拡散性の反応であるため, 損傷の取量は多いが DNA 上にまばらに反応し, クラスター化への寄与は少なく, そのほとんどが修復される可能性が高いと考えられる. その一方, 直接効果は, 1 次放射線, および生成された 2 次電子による直接的なエネルギー付与によるもので, 低エネルギー電子の電離や電子的励起の平均自由行程は数 nm と非常に短く, 媒質と密に反応する⁶⁾. 放射線照射による DNA 損傷の空間分布を推定するには, これらの間接効果・直接効果共に解明する必要があるが, 特に, 2 次電子のような低エネルギー電子の放射線作用は, 半径 10 nm の微小空間領域においてフェムト秒オーダーの短時間に起こる現象であるため, 実験による測定, および理論シミュレーションを用いた解析が共に困難である. そのため, 低エネルギー 2 次電子の放射線作用は, DNA 損傷の空間分布を推定するために重要であると考えられているが, 未だに多くの不確定要素が存在する.

3 放射線物理化学過程研究の現状

近年の DNA 損傷に対する, 低エネルギー電子の放射線作用についての研究に注目する. これまで, 電離や電子的励起の閾値エネルギー以下である亜励起電子エネルギー (約 7 eV) 以下の電子を DNA に照射しても, 2 本鎖切断のような細胞死を誘発しやすい DNA 損

傷はあまり生成されないと考えられていた。2000年になり、カナダの Sanche グループにより、電離により生じる2次電子のエネルギーにほぼ等しい、3 eV–20 eV という非常に低いエネルギーの電子線を用いた DNA 照射実験が行われた⁷⁾。その結果から、DNA 鎖切断の収量は 10 eV 付近で最大値を示し、亜励起電子エネルギー以下の領域においても、DNA の2本鎖切断が生成されることがわかった。これは入射電子の解離性電子付着によるもので、解離性電子付着は電子が一時的に分子の解離状態にトラップされることで負イオン分子の電子状態が不安定になり、分子が解離する現象である。この研究成果がきっかけとなり、2000年以降、低エネルギー電子による解離性電子付着に着目した DNA 損傷の実験的研究が注目され始めた。

電子のエネルギーが更に低い 1 eV 以下になると、電子は媒質分子の振動励起、フォノン励起、および回転励起を誘発し、更に弾性散乱による運動量移行を繰り返しながら徐々に熱化していく。ここで、振動励起は水分子内部の原子の振動、フォノン励起は水分子自身の振動を示す。水のような極性分子液体中で熱化した電子は、その後、水分子の作る捕捉サイトに捕まることで一時的に水和前電子(束縛エネルギー: -1.0 eV–-1.5 eV)となり、その水和前電子は、周囲の水分子の配向分極が完了すると、より寿命の長い水和電子(束縛エネルギー: -3 eV)になる⁸⁾。これら一連の水和過程の中で、Wang らは、フォトリシス法を用い、一時的(約 500 fs)に存在する水和前電子が DNA 構成分子を分解することを見出した⁹⁾。これは水中の負イオン DNA 構成分子の解離エネルギーが、水和前電子の束縛エネルギーとほぼ同程度であるために誘発される現象で、解離性電子移行とよばれている。一方、水和電子は負イオン DNA 構成分子の解離エネルギーよりも深く束縛されるため、DNA 構成分子の解離状態に電子が移行することができず、解離性電子移行を誘発しない。これらの状況から、水和前電子の寿命は非常に短いため、DNA から離れた位置で生成された水和前電子は、DNA に接近する前に水和電子になることが考えられる。すなわち、DNA 近傍である DNA 水和層において生成された水和前電子が解離性電子移行に関与することが予測される。このように低エネルギー電子の放射線作用は、電離や電子的励起のみならず、解離性電子付着、および解離性電子移行により誘発されることが実験的アプローチによりわかってきた。

一方、計算機シミュレーションでは、飛跡構造コードが主に利用され、水の放射線分解過程の計算結果を基に、DNA 損傷の空間分布の推定が行われてきた^{10,11)}。

飛跡構造コードは放射線作用における一連の物理、物理化学、化学過程を含むため、DNA 損傷の空間分布を推定するための非常に有効なツールである。飛跡構造コードのほとんどは、電子衝突断面積の結果から、解離性電子付着の収量は電離や電子的励起の収量に比べて比較的少ないと考え、電離および電子的励起のみが考慮されている。そのため、電子線のカットオフエネルギーは電離や電子的励起が誘発されない 7 eV となっている¹¹⁾。しかしながら、Sanche グループの実験により、解離性電子付着のクラスター DNA 損傷への寄与も検討課題の1つとなってきた。このカットオフエネルギー以下の電子は、解離性電子付着を除き、水分子の振動励起、フォノン励起、および回転励起を誘発し、更に弾性散乱による運動量移行を繰り返すことで徐々に減速し熱化するのであるが、これらの液相の励起断面積の実験および計算値が共に存在していなかったため、熱化過程についての詳細なシミュレーションは行われていない。その代わりに、熱化した電子の位置は、Konovalov らによる熱化距離 (0.2 eV–2 eV) の実験結果¹²⁾を基に推定された空間確率分布¹³⁾を用いて確率的にサンプリングすることで決定し、そこに水和電子が生成されると仮定している。また、飛跡構造コードはモンテ・カルロ法を基礎としているため、荷電粒子の動力学計算は行われていない。そのため、ジェミニートイオン対再結合のような、2次電子と親カチオンとのクーロン力が関与するような物理現象は含まれていない。実験によりクラスター DNA 損傷に関与する可能性がある物理現象が指摘され始めたにも関わらず、DNA 損傷を対象とした物理化学過程のシミュレーション研究は、考慮されているがパラメータ化されていない物理現象や、考慮されるべき物理現象が含まれていないなど、2000年以降、あまり進展していない。

4 本研究の目的

上述のように、これまでの低エネルギー2次電子の減速過程のシミュレーションは不確定要素が多い。そこで、本研究では、meV 以上の電子衝突断面積を利用した、水中における電子の減速シミュレーションを行い、その結果を基に、クラスター DNA 損傷の生成に低エネルギー2次電子がどのように関与するか理論予測することを研究目的とした。

これらの研究目的を達成するために、著者らは、まず、電子の熱化をシミュレートするために必要となる液相の回転・フォノン励起断面積を新たに計算した。その知見を活かし、液相の振動励起断面積を推定

し、既存の実験値（エネルギー損失率）と比較検討した。それらの計算結果を基に、水中における電子の熱化について、従来予測と異なる点について議論した成果¹⁴⁾を前編で解説する。前編で得られた液相の断面積や既存の断面積を利用し、著者らが独自に開発している時間発展を含む電子挙動計算コードを用い、水中に照射された電子の熱化過程をシミュレートした。その際、入射電子の熱化距離に対するエネルギー依存性や、時々刻々変化する減速電子の空間確率分布・エネルギー分布を求めた。その計算結果を基に、電子の熱平衡化と水和前過程の関係について議論した成果¹⁵⁾を中編で解説する。本計算コードは水中の電子挙動を計算する際、ニュートン方程式を解く機能も実装しているため¹⁶⁾、媒質内に生成されたカチオンが作るクーロン場中を運動する電子の挙動を計算することも可能である。そこで、本計算コードを利用し、水中で電離した2次電子の動力学計算を行い、水中のクーロン場内で減速している電子の空間確率分布を計算すると共に、電離、電子の励起、解離性電子付着が誘発される衝突数の空間分布も計算した。これらの計算結果を基に、DNA 内部から電離した2次電子が関与する修復され難いクラスター DNA 損傷の新たな生成過程について予測した成果¹⁷⁾を後編で解説し、今後の展望について述べる。

5 電子衝突断面積の研究背景および計算方法

気相における電子と水分子の衝突断面積は、様々な分子過程において、実験および理論計算において報告されている。Itikawa と Mason はこれらの値を基に各分子過程の断面積推奨データを報告している¹⁸⁾。固相については、Sanche グループにより、アモルファスアイス薄膜を用いた断面積の測定結果が報告されている¹⁹⁾。彼らの実験では、電子のエネルギーが 1.7 eV–100 eV の領域において、フォノン・振動励起断面積の個別の実験値の他、解離性電子付着、電子的励起および電離断面積を足し合わせたデータが報告されている。Mozumder は Sanche グループによりなされたアモルファスアイスの実験結果を基に、入射電子のエネルギーが 0.5 eV のとき、エネルギー損失率が 2.1×10^{13} eV/s になると見積もっている²⁰⁾。液相についての電子照射実験は非常に困難で、光学近似を用いた電子的励起および電離の断面積および阻止能の理論計算値が報告されている²¹⁾。電子的励起および電離が誘発されないエネルギー領域について、Fröhlich と Platzman は 1 eV–10 eV のエネルギー領域において、水

のエネルギー吸収と誘電緩和の観点から、エネルギー損失率が 1×10^{13} eV/s 程度になると理論予測している (Platzman 予測)²²⁾。これらの背景から、1 eV 以下の領域において、液相の基礎データはほとんど報告されていないのが現状である。本研究では、まず、凝縮相における電子衝突過程の計算方法を述べ、1 eV 以下の低エネルギー領域の衝突過程となる回転励起、およびフォノン励起に関する断面積、阻止能、およびエネルギー損失率を計算する。

電子衝突における凝縮相の平均自由行程および阻止能は、誘電関数 $\epsilon(q, \omega)$ により特徴づけられる。ここで、 q と ω は電子の運動量移行およびエネルギー移行である。電子と凝縮相の衝突において、媒質のエネルギー吸収と電場の遮蔽効果は $\epsilon(q, \omega)$ を用いて表される。ここで、遮蔽効果は媒質による分極効果を表している。原子単位系を用い、平均自由行程の逆数 $\lambda^{-1}(E)$ は以下の式で表される²³⁾。

$$\lambda^{-1}(E) = \int d\omega \tau(E, \omega), \quad (1)$$

ここで、 $\tau(E, \omega)$ は微分平均自由行程の逆数で以下のように表される。

$$\tau(E, \omega) = \frac{1}{\pi E} \int_{q^-}^{q^+} \frac{dq}{q} \text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(q, \omega)} \right),$$

ここで、 q^+ および q^- は運動量移行の最大値と最小値であり、

$$q^{\pm} = \sqrt{2}(\sqrt{E} \pm \sqrt{E - \omega}),$$

また、 E は入射電子のエネルギーで、 $\text{Im}(-1/\epsilon)$ はエネルギー損失関数とよばれている。誘電関数 $\epsilon(q, \omega)$ を測定することや理論計算で求めることは非常に困難であるため、エネルギー損失関数を光学的誘電関数 $\epsilon(0, \omega)$ を用いて以下の (2) 式のように展開する。

$$\text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(q, \omega)} \right) = \int_0^{\infty} d\omega' \omega' \text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(0, \omega)} \right) \times \frac{\delta(\omega - (\omega' + q^2/2))}{\omega}, \quad (2)$$

ここで、

$$\text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(0, \omega)} \right) = \frac{\epsilon_{\text{Im}}}{\epsilon_{\text{Re}}^2 + \epsilon_{\text{Im}}^2} = \frac{\epsilon_{\text{Im}}}{|\epsilon(0, \omega)|^2},$$

であり、 ϵ_{Re} および ϵ_{Im} は光学的誘電関数の実部と虚部で、分子はエネルギーの吸収を表し、分母は誘電率による分極効果を表している。(1)、(2) 式を用いて、平均自由行程の逆数 $\lambda^{-1}(E)$ は Ashley により、(3) 式のよ

うに求められた²⁴⁾.

$$\lambda^{-1}(E) \approx \frac{1}{2\pi E} \int_0^{E/2} d\omega' \text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(0, \omega')} \right) L \left(\frac{\omega'}{E} \right), \quad (3)$$

ここで,

$$L(a) = (1-a) \ln \frac{4}{a} - \frac{7}{4} a + a^{3/2} - \frac{33}{32} a^2 \quad (a \ll 1),$$

である. 同様の計算手法で阻止能 $S(E)$ も以下の式で計算できる²⁴⁾.

$$S(E) \approx \frac{1}{2\pi E} \int_0^{E/2} d\omega' \omega' \text{Im} \left(\frac{-1}{\epsilon(0, \omega')} \right) G \left(\frac{\omega'}{E} \right), \quad (4)$$

ここで,

$$G(a) = \ln \left(\sqrt{\frac{e2}{8a}} \right) - \frac{3}{4} a - \frac{a}{4} \ln \frac{4}{a} + \frac{1}{2} a^{3/2} - \frac{a^2}{16} \ln \frac{4}{a} - \frac{31}{48} a^2,$$

また, 断面積 $\sigma(E)$ とエネルギー損失率 $R(E)$ は, $\sigma(E) = \lambda^{-1}(E)N^{-1}$, および $R(E) = S(E)v$ により求められる. ここで, N は 3.0×10^{22} 分子数/cm³ であり, v は電子の速度の絶対値である.

上記のように, 媒質の光学的誘電関数がわかると, 断面積, 平均自由行程, 阻止能, エネルギー損失率が計算可能である. 電子的励起および電離が誘発されるエネルギー領域については, Heller らにより光学的誘電関数が測定されている²⁵⁾. そのデータを基に, Tomita らは液相の電子衝突による電子的励起および電離が関与する光学的誘電関数のフィッティング関数を求め, 断面積を求めている¹¹⁾. 今日まで, マイクロ波および遠赤外領域における光学的誘電関数は, 様々な実験グループにより報告されている. Yada らはこれらのデータを基に, 光学的誘電関数を (5) 式のようなフィッティング関数で表し, それぞれのパラメータを決定した²⁶⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon(0, \omega) = & \frac{\Delta\epsilon_1}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_2}{1 + i\omega\tau_2} \\ & + \frac{A_T}{\omega_T^2 - \omega + i\omega\gamma_T} + \frac{A_L}{\omega_L^2 - \omega + i\omega\gamma_L} \\ & + \epsilon_\infty, \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, (5) 式の第 1, 2 項目は回転モードであり, 配向分極に対応し, 第 3, 4 項目はフォノンモードであり, イオン分極に対応し, 第 5 項目は電子分極に対応している. また, (5) 式の各パラメータは Yada らの文献²⁶⁾ に掲載されており, 回転・フォノン励起についての断面積, 平均自由行程, 阻止能およびエネルギー損失率が計算可能になる. Figure 1 に, (5) 式から得られ

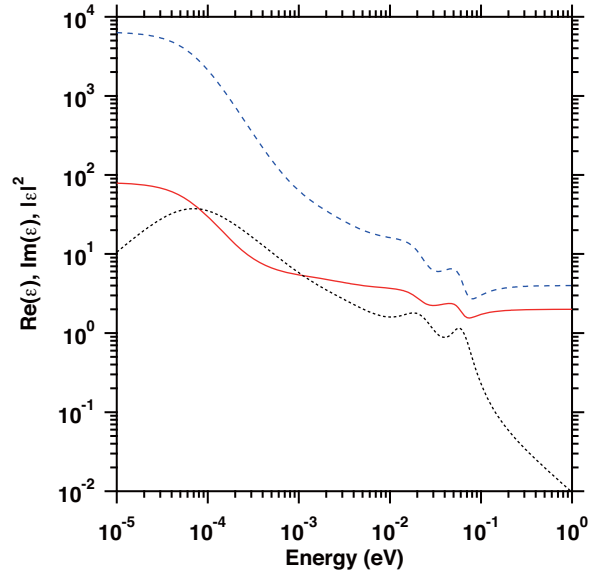


Figure 1. Energy dependence on real part, imaginary part, and square of the absolute value of the optical dielectric function. Solid line; imaginary part, dotted line; real part, dashed line; square of the absolute value.

た光学的誘電関数の実部 (点線), 虚部 (実線), および絶対値の二乗 (破線) の値を示す. これらの結果から, エネルギーの減少に伴い, 誘電関数の虚部 (ϵ_{im}) が増加するため, エネルギーの吸収率は増加する一方, 分極による双極子の長距離ポテンシャルの遮蔽効果 ($|\epsilon(0, \omega)|^2$) もまた増加する. これらの増加率は, エネルギーの減少に伴い, エネルギー損失関数の分母の方が大きいため, 凝縮相特有の分極効果が回転・フォノン励起断面積の減少に大きく寄与することがわかる. Figure 2 に, (5) 式から得られるエネルギー損失関数の結果 (実線) を示す. 比較のために, 電子的励起および電離のエネルギー損失関数の結果 (破線)¹¹⁾ も示す. これらの結果から, 回転・フォノン励起のエネルギー損失関数は, 電子的励起および電離のエネルギー損失関数よりも 3 分の 1 程度と若干小さく, 回転・フォノン励起断面積は電子的励起・電離断面積 (最大値: 3×10^{-16} cm²)¹¹⁾ よりも若干小さくなることが予測される.

6 結果と議論

この節では, 本研究における液相の回転・フォノン励起の断面積, 阻止能およびエネルギー損失率の計算

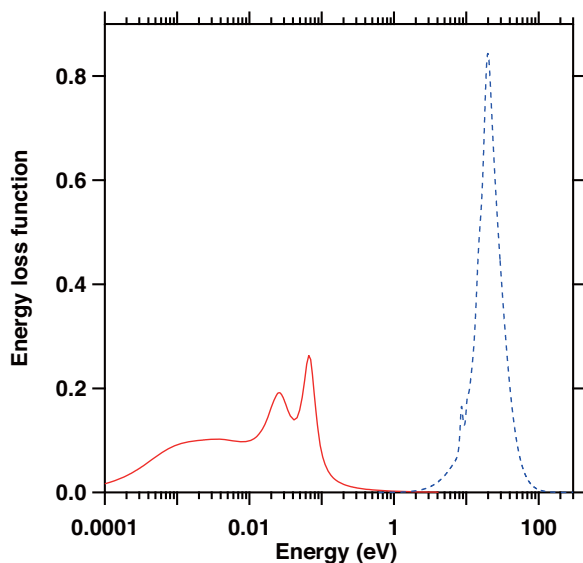


Figure 2. Energy dependence on energy loss functions. Solid line; rotation and phonon excitation, dashed line; electronic excitation and ionization.

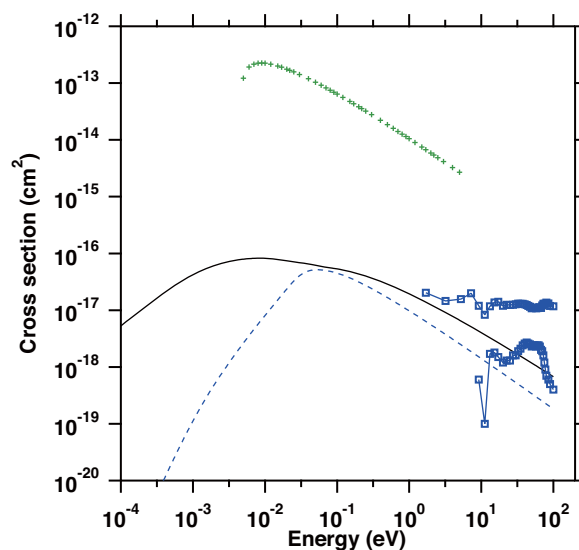


Figure 3. Cross sections of rotational excitation and translational phonon processes by electron impact. Solid line; rotational excitation for a liquid phase, dashed line; translational phonon for a liquid phase, +; rotational excitation for a gas phase¹⁸⁾, □; translational phonon in amorphous ice¹⁹⁾.

値と、気相の推奨データ、およびアモルファスアイスの実験値を比較検討し、その結果について議論する。Figure 3 に液相の回転・フォノン励起断面積の計算値、気相の回転励起断面積の推奨データ、およびアモルファスアイスのフォノン励起断面積の実験値を示す。本研究の計算条件 (297 K) はアモルファスアイスの実験条件 (14 K) と媒質の温度がかなり異なるが、液相のフォノン励起断面積の計算結果 (破線) は、アモルファスアイスの実験値 (□) と概ね近い値・傾向を示す。その一方、液相の回転励起断面積の計算結果 (実線) は気相の推奨データ (+) と比べ 3 桁以上減少する。回転励起の場合、気相と凝縮相とでは、水分子間の結合や Fig. 1 で示した配向分極の影響が強く関与することで、断面積の値が極端に減少することが考えられる。凝縮相の場合、液相のフォノン励起断面積の計算値とアモルファスアイスの実験値は概ね一致した。この結果から、振動励起断面積も、凝縮相であれば液相と固相で大きく異なることが予測される。振動励起断面積については、励起閾値以上のエネルギー領域において気相の推奨データが報告されているが、固相の場合、1.7 eV 以下のエネルギー領域においては報告されていない。これらの断面積の実験値を Fig. 4 に示す。アモルファスアイスの結果 (□) は気相データ (○) と比べ 1 桁程度低い、断面積の形状は概ね等し

いことがわかる。そこで、凝縮相の振動励起断面積については、1.7 eV 以上のエネルギー領域については、アモルファスアイスのデータを採用し、1.7 eV 以下のエネルギー領域については、気相のデータをアモルファスアイスのデータに結合することで推定した (実線)。その結果も Fig. 4 に示す。

気相の場合、回転励起断面積は入射電子のエネルギーに対して概ね $1/E$ に比例して増加する²⁷⁾。これは、水分子は空間内に孤立しているため、その他の水分子の影響をほとんど受けず、水分子の永久双極子モーメントが作るポテンシャルは長距離にまで到達することや、電子のド・ブロイ波長もエネルギーの減少と共に増加することに由来する。その結果、電子と水分子の相互作用領域が広範囲におよび、たとえば電子のエネルギーが 25 meV のとき、回転励起断面積は $1.6 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ にまで到達する。しかしながら、凝縮相の場合、水分子は密集しているためその周囲の分子の影響を受ける。永久双極子の長距離ポテンシャルの遮蔽効果は Fig. 1 に示されるように、低エネルギー領域に行くにつれて劇的に増加する。そのため、入射電子が低速化しても、分極による長距離ポテンシャルの遮蔽効果が増加するため、回転・フォノン励起断面積は、

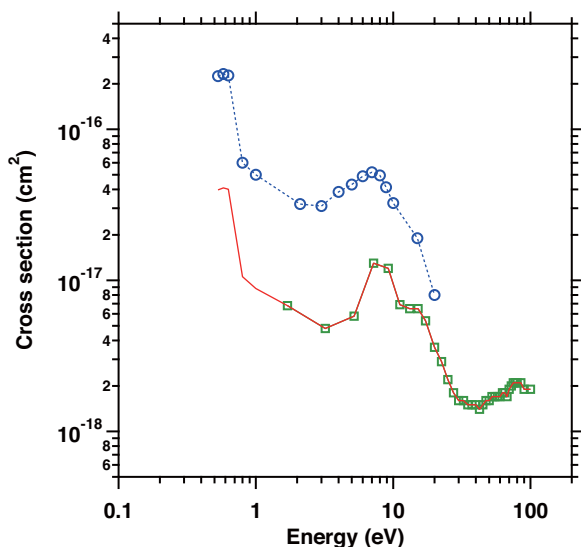


Figure 4. Cross sections of stretching-vibrational excitation by an electron impact. Solid line; present study, ○; for a gas phase¹⁸⁾, □; for amorphous ice¹⁹⁾.

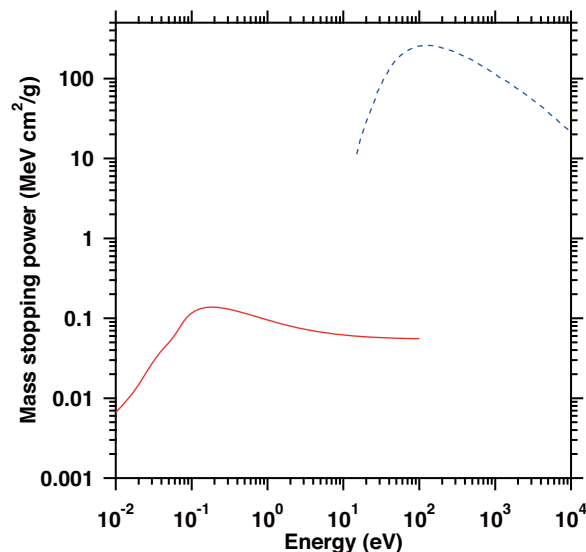


Figure 5. Mass stopping powers for liquid water by electron impact. Solid line; rotational excitation plus total phonon (present), dashed line; electric excitation plus ionization²¹⁾.

電子的励起・電離断面積の最大値 ($3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$)¹¹⁾ よりも若干小さい, Fig. 3 の実線で示されている最大値 $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 程度の値を示すことがわかる。

Figure 5 に, 本研究による回転・フォノン励起を足し合わせた, 液相における電子の阻止能の計算結果 (実線) を示す. 比較のため, 液相における電子的励起・電離の阻止能の結果 (破線)²¹⁾ も示す. 本研究の結果から, 阻止能の値は 200 meV 付近においてピークが存在し, 電子的励起・電離の阻止能の計算結果よりも 3 桁程度小さい. これは電子的励起・電離に比べ, 回転・フォノン励起の閾値エネルギーが 3 桁程度小さいことに由来する. Figure 6 に本研究による回転・フォノン励起を足し合わせた液相のエネルギー損失率の計算結果 (実線) を示す. Platzman 予測では, 入射電子のエネルギーが 1 eV–10 eV のとき, $1 \times 10^{13} \text{ eV/s}$ 程度であり, 本計算結果とよく一致する. Mozumder が見積もった結果 (○) も Fig. 6 に示す. 本研究の回転・フォノン励起を足し合わせた計算結果は, Sanche グループの実験結果から Mozumder が見積もった値より低いことがわかる. そこで, 回転・フォノン励起に, Fig. 4 で示した振動励起の結果も加えたエネルギー損失率の値 (破線) も示す. その結果, 本研究の液相のエネルギー損失率は実験結果とよく一致した. 本研究で予測した振動励起断面積もまた, 電子の減速過程を

シミュレートする際に有用であることが予測される。

入射電子のエネルギーが 1 eV のとき, 先行研究の結果ではエネルギー損失率が $1 \times 10^{13} \text{ eV/s}$ 程度であると考えられていたため, 電子は約 50 fs で熱化すると予測されていた²⁰⁾. この熱化時間は, 1 eV 以下のエネルギー領域においても電子のエネルギー損失率が一定であるとの仮定のもと予測された. その結果, 水中における電子の熱平衡化は非常に速いと予測されていたため, 水中で減速した電子は熱平衡化した後, 水の捕捉サイトに捕まり, 水和前電子になると予測されてきた. しかしながら, 本研究における新たな理論予測では, エネルギー損失率はエネルギーの減少に対して一定ではなく, 特に 1 eV 以下の領域に対して急激に減少する. 今日まで, Mozumder による評価²⁰⁾ を基に, 水中における電子の熱化は非常に速いと考えられてきたが, 電子の熱化時間は従来予測に比べ, ゆっくり起こる現象であることが新たに予測され, 電子の熱平衡化と水和前過程は同時並行して進行する可能性も考えられるようになった。

7 まとめおよび今後の展開

本研究により幅広い低エネルギー領域 (0.1 meV–100 eV) において, 液相の回転励起およびフォノン吸収過程における断面積, 阻止能およびエネルギー損失

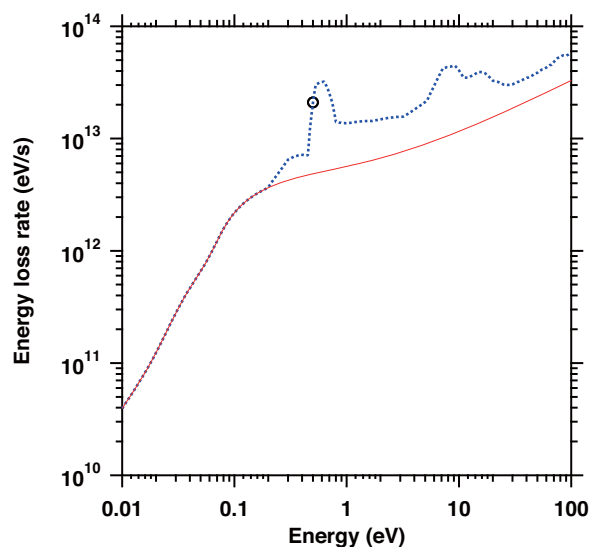


Figure 6. Energy loss rates for water by an electron impact. Solid line; rotational and phonon excitations for liquid water, dotted line; rotational, phonon and vibrational excitations for liquid water, O; experimentally reported value for amorphous ice²⁰.

率の計算が初めてなされた。本研究では水に注目したが、計算手法自体は一般的なものであるため、光学的誘電関数が既知の様々な液体媒質への展開も期待される。本研究の液相の計算結果は気相・アモルファスアイスの先行研究の結果と検証され、これらの基礎データは、水中における電子の熱化過程を解明するための重要な基礎データになること期待される。放射線によるDNA損傷の空間分布の推定を行う上で、電子の熱化と水和前過程の関係を解明することは非常に重要であると考えられるため、今後の展開として、本計算結果を利用した、水中における電子の熱平衡化と水和前過程の関係についての研究成果を本稿中編で解説する。

〈謝 辞〉

本研究の一部は科学研究費補助金(15H02823)、ならびに日本原子力研究開発機構内競争的研究資金制度(H25, H26)の援助を受けて行われました。また、共同研究者の東京農工大学・鶴飼正敏教授から放射線物理過程の観点から様々なご助言を頂き、大阪大学産業科学研究所・吉田陽一教授および同研究室の方々から

は、放射線化学過程の観点から様々なご助言を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

〈参 考 文 献〉

- 1) D. T. Goodhead, *Int. J. Radiat. Biol.*, 65 (1994) 7.
- 2) J. F. Ward, *Prog. Nucl. Res. Molec. Biol.*, 35 (1988) 95.
- 3) A. G. Georgakilas, P. O'Neill, R. D. Stewart, *Radiat. Res.*, 180 (2013) 100.
- 4) P. O'Neill, E. M. Fielden, *Adv. Radiat. Biol.*, 17 (1993) 53.
- 5) H. Nikjoo, P. O'Neill, W. E. Wilson, D. T. Goodhead, *Radiat. Res.*, 156 (2001) 577.
- 6) W. A. Bernhard, D. M. Close, in *Particle and Photon Interactions with Matter: Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications*, A. Mozumder, Y. Hatano (eds.) (Marcel Dekker, Inc., New York, 2004), Chap. 15, pp. 431–470.
- 7) B. Boudaiffa, P. Cloutier, D. Hunting, M. A. Huels, L. Sanche, *Science*, 287 (2000) 1658.
- 8) C.-R. Wang, T. Luo, Q.-B. Lu, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 10 (2008) 4463.
- 9) C.-R. Wang, J. Nguyen, Q.-B. Lu, *J. Am. Chem. Soc.*, 131 (2009) 11320.
- 10) H. Nikjoo, P. O'Neill, D. T. Goodhead, M. Terrissol, *Int. J. Radiat. Biol.*, 71 (1997) 467.
- 11) H. Tomita, M. Kai, T. Kusama, A. Ito, *Radiat. Environ. Biophys.*, 36 (1997) 105.
- 12) V. V. Konovalov, A. M. Raitsimring, Yu. D. Tsvetkov, *Radiat. Phys. Chem.*, 32 (1988) 623.
- 13) R. H. Ritchie, R. N. Hamm, J. E. Turner, W. E. Bolch, in *Computational Approaches in Molecular Radiation biology: Monte Carlo Methods (Basic Life Sciences)*, M. N. Varma, A. Chatterjee (eds.) (Plenum Press, New York, 1994), pp. 33–48.
- 14) T. Kai, A. Yokoya, M. Ukai, R. Watanabe, *Radiat. Phys. Chem.*, 108 (2015) 13.
- 15) T. Kai, A. Yokoya, M. Ukai, K. Fujii, R. Watanabe, *Radiat. Phys. Chem.*, 115 (2015) 1.
- 16) T. Kai, A. Yokoya, M. Ukai, K. Fujii, M. Higuchi, R. Watanabe, *Radiat. Phys. Chem.*, 102 (2014) 16.
- 17) T. Kai, A. Yokoya, M. Ukai, R. Watanabe, 5th Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry (2014).
- 18) Y. Itikawa, N. Mason, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 34 (2005) 1.

- 19) M. Michaud, A. Wen, L. Sanche, *Radiat. Res.*, 159 (2003) 3.
- 20) A. Mozumder, *Radiat. Phys. Chem.*, 32 (1988) 287.
- 21) J. C. Ashley, *Radiat. Res.* 89 (1982) 25.
- 22) H. Frohlich, R. L. Platzman, *Phys. Rev.*, 92 (1953) 1152.
- 23) J. Lindhard, *Mat. Fys. Medd. Kgl. Danske Vid. Sels.*, 28 (1954) 1.
- 24) J. C. Ashley, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, 50 (1990) 323.
- 25) J. M. Heller Jr., R. N. Hamm, R. D. Birkhoff, L. R. Painter, *J. Chem. Phys.*, 60 (1974) 3483.
- 26) H. Yada, M. Nagai, K. Tanaka, *Chem. Phys. Lett.*, 464 (2008) 166.
- 27) K. Takayanagi in *Electron-Molecule Collisions*, I. Shimamura, K. Takayanagi (eds.) (Plenum Press, New York, 1984), Chap. 1, pp. 1-87.

エネルギー学研究センター特任研究員。2008年日本原子力研究開発機構特定課題推進員。2011年同機構博士研究員。2014年同機構研究員。2015年同機構研究副主幹(現職)。博士(工学)。専門:原子分子物理,放射線物理。

横谷 明德: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 主席研究員(現職)。理学博士。専門:放射線生物物理学。

藤井 健太郎: 2000年広島大学大学院理学研究科物性学専攻博士後期過程修了。同年,日本学術振興会特別研究員。2001年日本原子力研究所入所,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(現職)。博士(理学)。専門:放射線化学,放射線生物,放射光科学,表面科学。

〈著者略歴〉

甲斐 健師: 2005年宮崎大学大学院物質エネルギー工学専攻博士後期課程修了。2005年大阪大学レーザー

渡邊 立子: 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(現職)。博士(理学)。専門:放射線生物物理学。

放射線による新しい DNA 損傷過程の提案

東北大学 高度教養教育・学生支援機構/東北大学大学院 理学研究科
岡 壽崇*

This article depicts a proposal of a novel DNA modification mechanism induced by irradiation, and is written as an award work from Japanese Society of Radiation Chemistry. The mechanism of DNA modification induced by K-shell photoabsorption of nitrogen and oxygen atoms was investigated by electron paramagnetic resonance and x-ray absorption near edge structure measurements of calf thymus DNA film. The EPR intensities for DNA film were twofold times larger than those estimated based on the photoabsorption cross section. This suggests that the DNA film itself forms unpaired electron species through the excitation of enhanced electron recapturing, known as the postcollision interaction process.

Keywords: soft x-ray, DNA, electron paramagnetic resonance (EPR), electron spin resonance (ESR), postcollision interaction (PCI)

1 はじめに

2015年9月に「放射線による新しい DNA 損傷過程の提案」というタイトルで、日本放射線化学会より放射線化学賞を受賞した。

本稿では、本受賞の対象論文となった「T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, Unpaired Electron Species in Thin Films of Calf-Thymus DNA Molecules Induced by Nitrogen and Oxygen K-Shell Photoabsorption, *Physical Review Letters*, 109 (2012) 213001¹⁾」の解説と、分量制限のために論文に執筆できなかった内容について

の説明を行う。

2 軟 X 線を用いた DNA 損傷の研究

重粒子線をはじめとする各種放射線が DNA に照射されると、直接あるいは間接的な効果によって DNA 変異や鎖切断などの DNA 損傷が形成されるが、形成される損傷の種類や収量は放射線の線質やエネルギーによって大きく異なる。一方で、軟 X 線は、その照射エネルギーを選ぶと（単色化すると）、DNA 構成元素である炭素、窒素、酸素、リンなどを選択的に励起・イオン化できるという利点があるため、DNA や DNA 関連分子に対する照射効果の研究が広く行われてきた。最近では、Fujii らが DNA 塩基損傷や DNA 鎖切断などの収量が軟 X 線のエネルギーによって変化することを報告するなど、軟 X 線による選択的な DNA 損傷導入は、放射線 DNA 損傷の修復の研究や DNA のナノデバイスへの応用など、幅広い分野への応用が期待される。

一般的な放射線の照射によって形成された DNA 損傷は電気泳動法などで調べることでできる、いわば「最終生成物」である。我々のグループでは、この最終生成物を調べるだけでなく、照射から最終生成物にいたる過程における中間生成物である「DNA ラジカル」にも注目し、細胞致死や突然変異などの放射線生物影響の原因の1つである DNA 損傷の物理化学的なメカニズムを明らかにしたいと考えている。より具体的に言えば、軟 X 線を DNA に照射し、DNA を構成する元素に生じた内殻イオン化と、これに引き続いて起きる Auger 過程によって、どのように DNA 損傷が形成されるのかを明らかにしたい、ということである。

DNA ラジカルの研究は、通常は放射線を低温で照射し、低温に保持したまま電子常磁性共鳴 (electron paramagnetic resonance, EPR, 電子スピン共鳴 (electron spin resonance, ESR) とも) 装置まで輸送し、低温で安定なラジカルを対象とすることがほとんどである³⁻⁵⁾。しかし、このような多段階の手法では、内殻イオン化

A proposal of a novel DNA modification mechanism induced by irradiation

Toshitaka Oka* (*Institute for Excellence in Higher Education / Graduate School of Science, Tohoku University*),

〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41

TEL: 022-795-6597, FAX: 022-795-6597,

E-mail: kotobuki@m.tohoku.ac.jp

と Auger 過程のようなごく初期に形成されるラジカルを測定することは不可能である。そこで、横谷らは、SPring-8 の BL23SU のビームラインに EPR 装置を直接接続し、*in situ* で EPR 測定可能な装置を開発した⁶⁾。EPR のキャビティが真空ラインの中にあり、 10^{-7} Pa の高真空内で軟 X 線を照射しながら EPR 測定が可能である。なお、本論文では DNA ラジカルではなく「不對電子」という表現を用いるが、これは通常の低温で安定な DNA ラジカルと区別するためである。

3 実験

仔牛胸腺 DNA を蒸留水に溶かして清浄な基板に滴下し、大気中・室温で乾燥させた。基板上から DNA 薄膜を剥離し、短冊状に切り出し、金を蒸着した無酸素銅のロッドの上に固定し⁷⁾、銅のロッドを直線導入器に取り付け、ロードロック室 (10^{-5} Pa) を経由して高真空チャンバー (10^{-7} Pa) に導入した。軟 X 線が試料を透過してロッドに照射されるとロッド由来のラジカルが生成されてしまう。仔牛胸腺 DNA と X 線との断面積^{8,9)} から、軟 X 線は 1 枚の試料でも十分に吸収されロッドに到達しないことを確かめたが、DNA は鎖状分子のために軟 X 線が薄膜を通り抜ける可能性があるため、これを極力減らすよう試料は 3 枚重ねにした。また、ロッドのシグナルがどのエネルギーにおいても検出されなかったことから、薄膜を透過してロッドに照射された軟 X 線は無視できるレベルであり、観測されたシグナルのほとんどは DNA 試料由来のものであると判断された。

高真空チャンバー導入後、窒素 (370 eV–425 eV) および酸素 (525 eV–600 eV) の K 殻吸収端を含むエネルギー領域で EPR 測定を行った。エネルギーを変化させながら EPR 測定を行い、得られたシグナルの 2 回積分の値を、集光ミラーのドレインカレント (\propto 光子量) で割って EPR の強度とした。EPR の測定条件は掃引時間 1 分、掃引幅 ± 1 mT、マイクロ波出力 250 μ W である。

さらに、DNA 薄膜の X 線吸収スペクトルも取得した。軟 X 線の透過力は弱いいため、いわゆる x-ray absorption fine structure (XAFS) 測定では Si 基板上に形成した薄膜に軟 X 線を照射し、試料のドレインカレントを測定して X 線の吸収を見積もることが多いが、今回は文字通り「X 線吸収測定」を行うこととした。DNA の自立薄膜を作製し穴あきのホルダに取り付け、フォトダイオードで透過光の強度 (I) を、さらに薄膜を光軸から完全に外して入射光の強度 (I_0) を測定し、

Beer-Lambert の法則 ($A = -\log(I/I_0)$) で吸光度 A を計算し、エネルギーを掃引することで「真の X 線吸収測定」による XAFS を得た。

4 結果と考察

Figure 1 に DNA 薄膜の窒素および酸素の K 殻吸収端近傍における EPR スペクトルの例を示す。チミンやシトシンなどと同じような 1 本線で、ビームを止めるとすぐに消失する短寿命のラジカル^{10,11)} が 370 eV から 700 eV のエネルギー範囲で得られた。 g 値は Mn マーカーから 2.000 と見積もられ、自由電子 (g 値 2.0023) とは異なるラジカルであることがわかった。

EPR 強度とマイクロ波出力の平方根 (\sqrt{P}) の関係を Fig. 2 に示す。通常、EPR 強度と \sqrt{P} の間には直線関係があり、 \sqrt{P} が大きくなると飽和するのだが、軟 X 線のエネルギーにかかわらず \sqrt{P} が小さいところでは EPR 強度は \sqrt{P} の増加とともにゆるやかに増加し、 \sqrt{P} が大きくなると発散するという関係が得られた。そこで、原点に外挿すると曲線関係を示す領域 ($13 \mu\text{W}^{1/2}$ – $18 \mu\text{W}^{1/2}$) のちょうど真ん中あたりの 250 μ W で実験を行うこととした。また、軟 X 線のスリットを広げて線量 (光子量) を増やすと EPR 強度が線量に比例して大きくなることも確かめた。

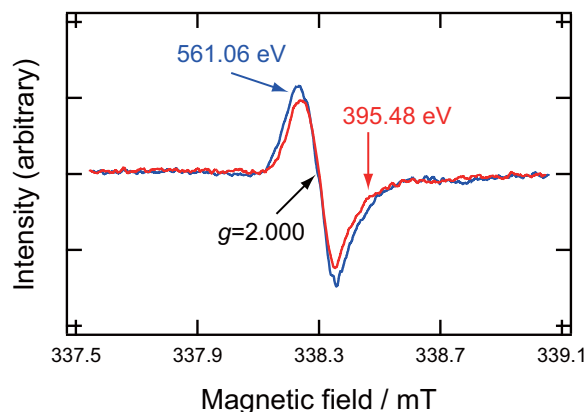


Figure 1. EPR spectra for calf thymus DNA during soft x-ray irradiation around the nitrogen and the oxygen K edge at room temperature. The EPR spectra were obtained at energies of 395.48 and 561.06 eV. (Reprinted figure with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

このような条件で測定した EPR 強度の軟 X 線エネルギー依存性を Fig. 3 に示す。右軸は X 線吸収測定か

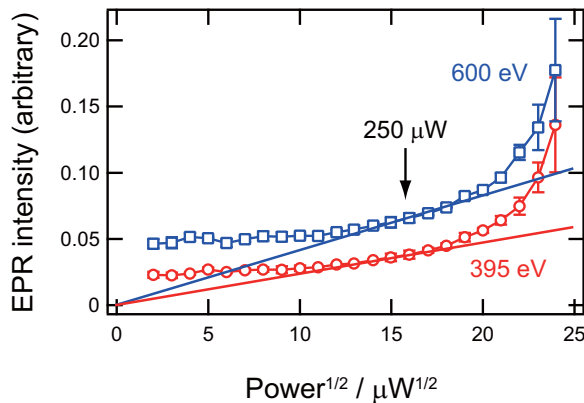


Figure 2. Plot of the DNA film EPR intensity vs the square root of microwave power. The soft x-ray energies were 395 and 600 eV, and the solid lines are visual guides. Hereafter, a microwave power of 250 μ W was used for all EPR measurement. (Reprinted figure with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

ら求めた x-ray absorption near edge structure (XANES) スペクトルである。2つのスペクトルは K 殻吸収端よりも低いエネルギー (プレッジ) で規格化した。EPR のエネルギー依存性は窒素・酸素の両方の領域において XANES と似たような微細構造を示すが、図を見てもわかるように K 殻吸収端近傍で XANES スペクトルよりも高くなっており、仔牛胸腺 DNA 上に誘起された不対電子 (DNA ラジカル) が窒素や酸素の K 殻吸収端において増感していることを示唆している。横谷らは仔牛胸腺 DNA の EPR 強度と 1 本鎖切断の取量が酸素の K 殻吸収端近傍において多くなった原因を DNA の水和水の酸素による効果ではないかと報告している⁷⁾が、本研究では窒素の K 殻吸収端近傍でも EPR 強度の増感も観測できたことから、水和水以外の原因があることが示唆された。

Figure 4 に、Fig. 3 の (a) 窒素と (b) 酸素のエネルギー領域それぞれを拡大したものを示す。破線は仔牛胸腺 DNA の吸収断面積を、DNA を構成する元素の断面積から見積もったもの (ベースライン) である⁸⁾。 α は K 殻吸収端のプレッジの強度、 β は破線のベースラインよりも大きな値、すなわち α の影響を除いた強度と定義すると、たとえば α_{EPR} は水素の K 殻、炭素の K 殻、窒素の L 殻と酸素の K 殻の和、 β_{EPR} は窒素 K 殻のイオン化のみによって得られる EPR 強度となる。この指標を利用して、EPR と XANES のそれ

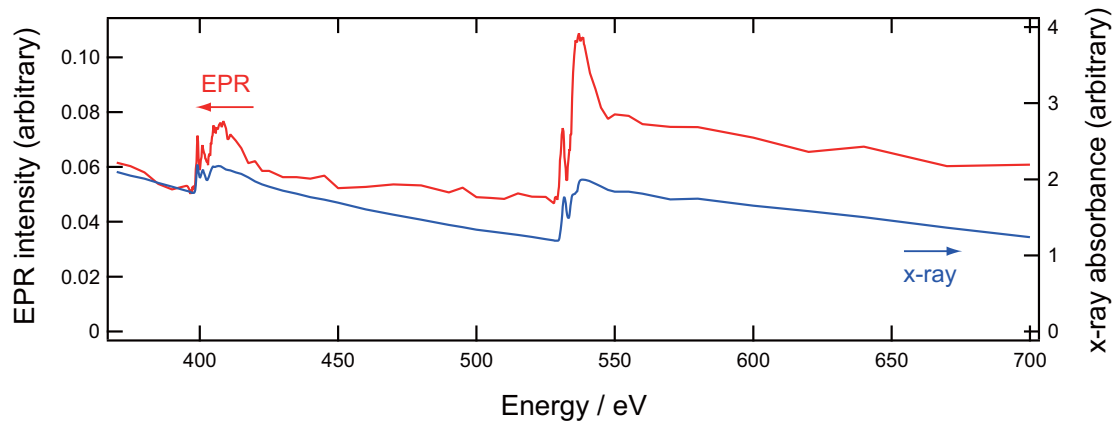


Figure 3. The dependence of the double-integrated EPR intensity of the calf thymus DNA film on the soft x-ray energy, from 370 to 700 eV including the nitrogen and the oxygen K edges. The right-hand axis shows the XANES spectrum of the calf thymus DNA film. The yields of the unpaired electron species produced in the calf thymus DNA film were significantly enhanced by the nitrogen and the oxygen photoabsorption. (Reprinted figure with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

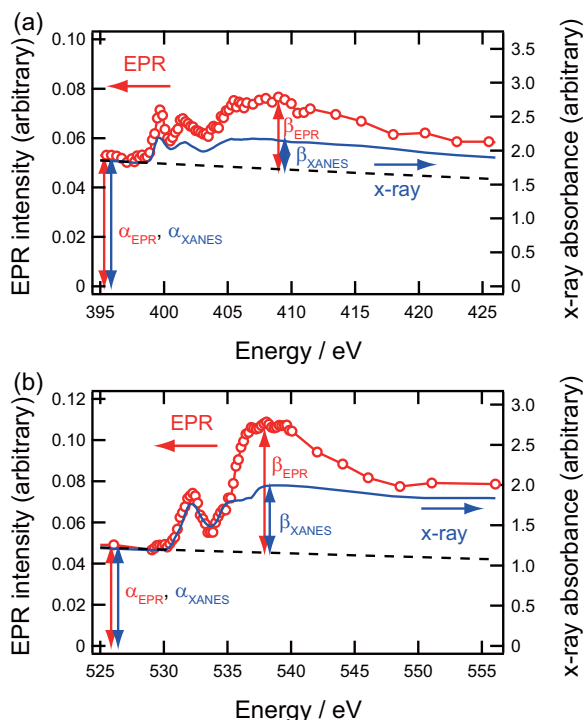


Figure 4. The soft x-ray energy dependence of the double-integrated EPR intensity of the calf thymus DNA film around (a) the nitrogen K edge, and (b) the oxygen K edge. The right-hand axes show the x-ray absorption spectra of the calf thymus DNA film. The dotted curves represent the baseline of the spectra. (Reprinted figure with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

それぞれについての α と β の比および EPR と XANES の比 (EPR:XANES) を Table 1 にまとめた。ここで、 α はプレエッジのエネルギーを、 β のエネルギーは π^* , σ^* そしてイオン化閾値よりも十分高いところを選択した。EPR の強度は全てのエネルギー領域において XANES のそれよりも高かった。特に σ^* で顕著であり、EPR:XANES が 2 倍程度と最も高くなったことから、EPR 強度は $1s \rightarrow \sigma^*$ で著しく増感されることがわかった。

DNA ラジカルは軟 X 線照射に起因する光電子放出とそれとともに Auger 電子の放出によって形成されると考えられるが、これだけでは K 殻イオン化閾値より上のエネルギーにおける著しいラジカル増感を十分に説明することはできない。となると、最初に放出さ

Table 1. Ratios of β to α for EPR and XANES spectra at the nitrogen K-edge (α : 395.48 eV, β : 399.68 eV (π^*), 408.98 eV (σ^*), 420.48 eV and 450.48 eV) and the oxygen K-edge (α : 526.06 eV, β : 532.26 eV (π^*), 538.06 eV (σ^*), 561.06 eV and 621.06 eV), for the calf thymus DNA film. (Reprinted table with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

	EPR β/α	XANES β/α	EPR:XANES
Nitrogen K-edge			
399.68 eV	0.39	0.20	1.93
408.98 eV	0.55	0.23	2.39
420.98 eV	0.33	0.19	1.77
450.48 eV	0.29	0.16	1.75
Oxygen K-edge			
532.26 eV	0.56	0.48	1.17
538.06 eV	1.29	0.69	1.88
561.06 eV	0.71	0.62	1.15
621.06 eV	0.82	0.68	1.20

れた光電子の電子付着や再結合をこの原因と考えるのが自然である。

K 殻から放出された遅い光電子の電子付着^{12,13)}が、まず思い浮かぶ。もしこのような電子付着が起きると閾値よりも 1 eV や 2 eV 高いエネルギーにおいて鋭いピークを見せるはずであるが¹³⁾、窒素・酸素のどちらの閾値以上においても電子付着に起因する共鳴構造のピークが観測されなかった。我々がチミンやシトシンで同様の測定をした際も¹¹⁾ 鋭いピーク^{14,15)}は得られなかったし、チミンではラジカル増感もなかった。また、我々が測定しているラジカルは数 10 μs –数 100 μs と短寿命であり¹⁶⁾、文献 [12,13] で報告されている鎖切断のような安定な生成物とは異なる。これらのことから、我々は解離性電子付着はこの DNA ラジカルや塩基ラジカル増感の原因ではないと考えた。もう 1 つの可能性は電子とイオンの再結合であるが、本論文の照射条件では体積再結合は考えにくい。このように消去法で検討したところ、Auger 電子放出前の 1 価イオンによる再結合、特にイオン化閾値付近で強調される親イオンへの再結合 (ジェミネート再結合) が起きているのだろうと予想されたが、通常のジェミネート再結合では電子が周囲との多段階の非弾性衝突によって減速される必要があるので、クーロンポテン

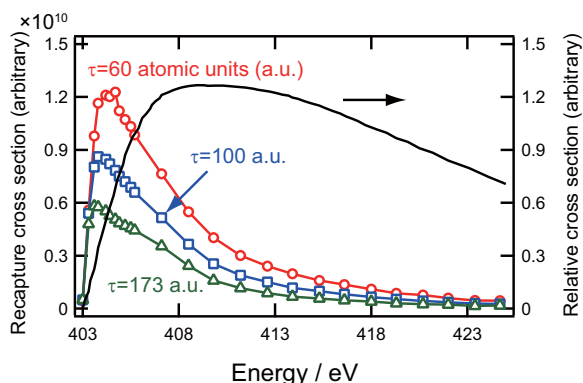


Figure 5. Recapture cross section of the calf thymus DNA film vs the photon energy above ionization potential of nitrogen. The units for τ in the figure are atomic units (a.u.). The right-hand axis shows the relative cross section of DNA. The threshold peak of the recapture cross section above the ionization potential is similar to the enhancement of the EPR intensities shown in Figs. 3 and 4. (Reprinted figure with permission from T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters*, **109**, 213001, 2012. Copyright (2011) by the American Physical Society.)

シャル内に再捕獲される可能性は低い。しかし、Auger 電子放出によるポテンシャルの急激な変化による減速ならば再捕獲可能である。この過程は気相の原子・分子を扱う研究領域では衝突後相互作用 (postcollision interaction, PCI) として知られている¹⁷⁾。これは、入射光子のエネルギーがイオン化閾値に十分近い場合、イオン化する光電子が遅く、後続の Auger 電子がこれを追い越すことで 2 価になるはずの原子のポテンシャルが変化し、光電子が減速され、親イオン原子へ再捕獲されて 1 価になる現象である¹⁸⁻²⁰⁾。これらのことから、我々は PCI によって再捕獲された光電子が EPR によって検出されているのではないかと考えた。

本当にこのような再捕獲が σ^* 付近のエネルギーで行われるかは半古典的¹⁸⁾な計算で推定した (計算方法は文献 [21] で解説したので割愛する)。Figure 5 に窒素イオン化閾値以上のエネルギー領域における再捕獲断面積のエネルギー依存性を示す。図の右軸は相対吸収断面積のエネルギー依存性である。窒素の K ホール寿命 τ を 173 a.u. (原子単位) とした結果とあわせ、比較のために 100 a.u. と 60 a.u. の場合も示した。再

捕獲断面積のイオン化閾値以上での挙動が EPR 強度のイオン化閾値以上の挙動とほぼ同様の形となったことで、PCI 過程が DNA 薄膜のイオン化閾値近傍での EPR 強度増感の有力な原因であることが示された。このように再捕獲された DNA は 1 価のイオンであり、通常の内殻イオン化によって生じる 2 価のイオンとは異なる。そのため、通常の 2 価のイオンを出発点とした DNA 損傷とは異なる新しい DNA 損傷過程を示す可能性があり、価数の違いでどのような DNA 損傷を形成するかは非常に興味深く、引き続き研究を進めていく必要がある。

5 まとめ

軟 X 線照射した自立仔牛胸腺 DNA 薄膜の EPR 強度の窒素および酸素の K 殻吸収端近傍のエネルギー依存性および XANES スペクトルを初めて測定した。照射中のみ観測される短寿命の DNA ラジカルの g 値は 2.000 と見積もられ、EPR 強度の \sqrt{P} 依存性はよく知られている飽和する挙動とは異なり発散した。EPR 強度は窒素および酸素のイオン化閾値以上のエネルギーで PCI によって増感することがわかり、通常の 2 価のイオンではなく 1 価のイオンを出発点とする新しい DNA 損傷過程を提案することができた。

〈謝 辞〉

放射線化学賞受賞においては、本賞選考委員の先生方、推薦していただいた小林慶規博士 (産業技術総合研究所)、平出哲也博士 (日本原子力研究開発機構、受賞時: 事務局)、鷲尾方一先生 (早稲田大学、受賞時: 会長)、もっぱら有機高分子材料の分析を行っていた筆者に放射線化学の立場から放射線化学と放射線生物影響の境界領域の研究を始めるきっかけを下さった勝村庸介先生 (アイソトープ協会) にお礼申し上げます。本受賞対象論文の成果は、共同研究者の横谷明德博士 (量子科学技術研究開発機構 (QST))、藤井健太郎博士 (QST)、鶴飼正敏先生 (東京農工大学)、福田義博氏 (スプリングエイトサービス) のお力無くしては得られません。深く感謝いたします。また、応募から受賞にいたる間、いろいろとサポートいただいた木野康志准教授および関根勉教授 (東北大学) にもお礼申し上げます。(所属は全て現所属)

本研究の軟 X 線照射は公益財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI) の課題番号 2010B3811, 2011A3815 および 2011B3815 によるものです。また、本研究の

一部は JSPS 科研費 21310041 の助成を受けたものです。

〈参 考 文 献〉

- 1) T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 213001.
- 2) K. Fujii, N. Shikazono, A. Yokoya, *J. Phys. Chem. B* 113 (2009) 16007.
- 3) W. A. Bernhard, D. M. Close in *Charged Particle and Photon Interactions with Matter: Chemical, Physico-chemical, and Biological Consequences with Applications*, edited by A. Mozumder, Y. Hatano (Marcel Dekker, Inc., New York, 2004), Chap. 15, pp. 431–470.
- 4) S. Purkayastha, J. R. Milligan, W. A. Bernhard, *J. Phys. Chem. B* 110 (2006) 26286.
- 5) D. Becker, A. Adhikary, M. D. Sevilla in *Charged Particle and Photon Interactions with Matter: Recent Advances, Applications, and Interfaces*, edited by Y. Hatano, Y. Katsumura, A. Mozumder (CRC Press, Boca Raton, 2011), Chap. 19, pp. 503–541.
- 6) A. Yokoya, K. Akamatsu, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.* 467–468 (2001) 1333.
- 7) A. Yokoya, K. Fujii, N. Shikazono, K. Akamatsu, A. Urushibara, R. Watanabe, *Int. J. Radiat. Biol.* 84 (2008) 1069.
- 8) B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis, *Atom. Data Nucl. Data Tables* 54 (1993) 181.
- 9) The Center for X-Ray Optics, <http://www.cxro.lbl.gov>.
- 10) A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Radiat. Phys. Chem.* 78 (2009) 1211.
- 11) T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, *Appl. Phys. Lett.* 98 (2011) 103701.
- 12) B. Boudaïffa, P. Cloutier, D. Hunting, M. A. Huels, L. Sanche, *Science* 287 (2000) 1658.
- 13) F. Martin, P. D. Burrow, Z. L. Cai, P. Cloutier, D. Hunting, L. Sanche, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 068101.
- 14) M. A. Huels, I. Hahndorf, E. Illenberger, L. Sanche, *J. Chem. Phys.* 108 (1998) 1309.
- 15) S. Ptasíńska, S. Denifl, V. Grill, T. D. Märk, E. Illenberger, P. Scheier, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 093201.
- 16) T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, *Int. J. Radiat. Biol.* 88 (2012) 884.
- 17) A. Lindblad, R. F. Fink, H. Bergersen, M. Lundwall, T. Rander, R. Feifel, G. Ohrwall, M. Tchapyguine, U. Hergenbahn, S. Svensson, O. Bjorneholm, *J. Chem. Phys.* 123 (2005) 211101.
- 18) A. Niehaus, *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.* 10 (1977) 1845.
- 19) J. Tulkki, T. Åberg, S. B. Whitfield, B. Crasemann, *Phys. Rev. A* 41 (1990) 181.
- 20) W. Eberhardt, S. Bernstorff, H. W. Jochims, S. B. Whitfield, B. Crasemann, *Phys. Rev. A* 38 (1988) 3808.
- 21) 横谷明德, 鷗飼正敏, 岡 壽崇, 甲斐健師, 渡邊立子, 藤井健太郎, *しょうとつ*, 11 (2014) 33.

〈著 者 略 歴〉

岡 壽崇：2003年 早稲田大学大学院理工学研究科単位取得退学，博士（理学）。早稲田大学，産業技術総合研究所，千葉大学，日本原子力研究開発機構，早稲田大学，大阪大学を経て，現在，東北大学高度教養教育・学生支援機構/東北大学大学院理学研究科助教，専門：材料分析，放射線生物影響，陽電子科学。趣味：ウインタースポーツ，ラグビー観戦ほか。

イオン液体中の多糖類の放射線架橋反応に関する研究

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
木村 敦*, 長澤 尚胤, 島田 明彦, 田口 光正

We synthesized some room temperature ionic liquids (RTILs) as the reaction medium, in which polysaccharides could be dissolved to concentrations in excess of 10 wt%. Radiation modifications of cellulose in RTILs under humid condition were carried out to obtain its gel material. The reaction efficiencies of the crosslinking of cellulose in RTILs by ionizing radiation were estimated under different moisture conditions. Water plays a crucial role to control crystalline state of cellulose and to be the source of the reactive species for the crosslinking. The chitin gel was also obtained in RTILs by γ -ray irradiations.

Keywords: cellulose, chitin, room temperature ionic liquid, radiation-induced crosslinking, water

1 背景

化石資源由来の材料による環境・資源問題が深刻化し、高分子材料分野においても経済性のみを追求する合成高分子から、環境負荷の低減等の側面をもつ天然高分子へシフトする傾向にある。天然高分子の一種である多糖類は、水や有機溶媒に難溶でかつ熱により溶融しないことから成型加工が困難であるため、化学処理による溶液化もしくは誘導化した多糖類の高濃度溶液を加工処理する手法が一般的である。多糖類の一つであるセルロースは植物の光合成によって水と二酸化炭素から作られたグルコースから構成され、地球上において最も生産量の高い有用な高分子材料である。セルロースの成形加工の成功例として、古くは水酸化ナ

トリウム水溶液や酸化銅アンモニア溶液を用いてセルロースを化学処理したレーヨンやキュブラが非常に有名である。しかし、これらの手法では環境負荷の高い有機溶剤等を大量に用いるため、環境負荷が極めて低い天然高分子の利点が損なわれてしまう。その後、セルロースを化学処理することなく溶解するために、クロロホルム/DMSO 溶液、N-メチルモルホリン/水系溶液、LiCl/ジメチルアセトアミド溶液等の様々な溶媒が開発された。通常、セルロース等の多糖類は、固体状態において分子鎖間の水素結合が強固なため、一般的な有機溶媒や水に溶解することは困難であるが、これらのプロトン受容性の高い溶媒を用いることで最大で10%程度のセルロース溶液を作製可能である^{1,2)}。近年、このような難溶性の天然高分子を高濃度溶解する溶媒の一種として、イオン液体が注目されている。カチオンとアニオンからなるイオン液体は極めて高いプロトン受容性を有するため、温度とアニオンの種類を制御することで分子鎖間の水素結合を切断して高分子を溶解することが可能であり、セルロースを高濃度で溶解するイオン液体も開発されている³⁾。イオン液体は、従来の成型加工法で用いる有機溶媒より環境負荷が低く、化学的・熱的安定性が高いことからリサイクル性を有するため、セルロースのみならず他の難溶性多糖類の新たな溶媒として注目を集めている。

一方、高分子の放射線加工法は、放射線照射により生成するラジカルを起点とした架橋反応、グラフト重合反応、または分解反応により、化学薬品を必要とすることなく高分子の改質が可能となる。放射線による架橋技術は、自動車のエンジン周りに使われている電線被覆材、家庭用の発泡マット、自動車用ラジアルタイヤ等に、それらの耐熱性の改善を目的として応用されている。化学処理して親水基を付加された水溶性多糖類誘導体（カルボキシメチルセルロース、カルボキシメチルキチン、カルボキシメチルスターチ等）の高濃度水溶液に放射線を照射することで、保湿材や衛生用品に利用可能なハイドロゲルの開発に成功している⁴⁻⁶⁾。しかし、セルロース、キチン、キトサンおよび

Radiation-Induced Crosslinking of Polysaccharides in Ionic Liquids

Atsushi KIMURA*, Naotsugu NAGASAWA, Akihiko SHIMADA and Mitsumasa TAGUCHI (*National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology*),
〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233
TEL: 027-346-9208, FAX: 027-346-9687,
E-mail: kimura.atsushi@qst.go.jp

アルギン酸等の多糖類は、一般的な有機溶媒や水には溶解しにくいものが多く、いずれも放射線により分解が促進する高分子であるため、放射線照射により3次元網目構造を有するゲル材料を作製することは困難であった。

本研究では、従来法では改質が困難であった多糖類を、環境負荷が低く、化学的・熱的安定性が高いイオン液体に溶解し、含水率を制御した条件で放射線を照射することにより環境にやさしい新規ゲル材料の開発を行った。さらに、独自の手法で合成した蛍光イオン液体をプローブとして、多糖類の架橋反応メカニズムについて検討した。

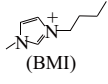

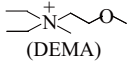

2 イオン液体へのセルロースの溶解

放射線照射による高分子溶液の架橋反応効率は高分子初期濃度に大きく依存し、高分子溶液がペースト状態になる濃度領域において放射線架橋反応が最も効率よく進行する。筆者らは、LiCl/ジメチルアセトアミド溶液等の従来溶媒を用いて5 wt%–10 wt%のセルロース溶液を作製したが、ペースト状態を形成する濃度にいたっていなかったため、放射線照射により架橋体を作製することは出来なかった。そこで、イミダゾールもしくはアルキルアミンとハロゲン化アルキルを反応させることにより、イオン液体であるハロゲン化イミダゾリウムもしくはハロゲン化アンモニウムを合成した。さらに、それらをイオン交換樹脂より水酸化物イミダゾリウムおよび水酸化物アンモニウムとし、有機酸により中和することで、各種有機酸をアニオンとしたイオン液体を合成した (Table 1)。各種イオン液体のセルロースの溶解度を調べたところ、イオン液体・酢酸 1-エチル-3-メチルイミダゾリウム (EMI-acetate) がセルロースを 20 wt% 以上溶解することを明らかにした。この EMI-acetate にセルロースを 20 wt% 溶解し、 γ 線照射を行ったが架橋生成物を得ることが出来なかった。イミダゾリウム型のイオン液体への放射線照射により生成する活性種は、式 1 に示すように溶媒和電子、水素原子、溶媒ラジカル等である⁷⁾。



式中の S は溶媒を示す。このうち、溶媒和電子 (e_{solv}^-) はイオン液体のカチオンであるイミダゾリウムに捕捉される。さらにセルロースの化学構造には電子付着が起こる部位がないため、溶媒和電子が架橋反応に関与する可能性は低いと考えられる。一方で、水素原子がセルロースと反応して、前駆体であるセルロースラジ

Table 1. Solubility of cellulose in room temperature ionic liquids.

Cation	Anion	Solubility of Cellulose (%)
 (BMI)	bis(trifluorosulfonyl)amide	Insoluble
	thiocyanide	Insoluble
	chloride	10
	formate	20
 (DAI)	formate	20
	acetate	20
 (DEMA)	chloride	10
	formate	20
	acetate	20
 (EMI)	acetate	30

カルを形成できれば、最終的にセルロース架橋体が生成することが考えられる。しかし、実際にはセルロースの架橋生成物が得られなかったことから、水素原子も架橋反応への寄与が低いことが明らかになった。

3 イオン液体中におけるセルロースの放射線架橋

そこで、著者らはセルロースの架橋反応を促進させるために、反応促進剤として水の添加を行った。水を添加する狙いは二つあり、一つは水の放射線分解により生成するヒドロキシル (OH) ラジカルによりセルロースラジカルの形成を促進することである。もう一つは、イオン液体によって分散したセルロースの高分子鎖に水素結合を再形成させて、分子鎖同士の絡み合いを形成させることである。20 wt% のセルロース・EMI-acetate 溶液に水を添加し、 γ 線を 10 kGy 照射することでセルロースゲルを得ることに世界で初めて成功した⁸⁾。このゲルの生成収率は水の添加量に伴い増加し、含水率 18 wt% の条件で最大である 13 % に達した (Fig. 1)。一方で、含水率 34 wt% ではゲルが生成しなかったことから、生成収率は含水率 18 wt%–34 wt% の間で減少に転じていることがわかった。これは、含水率が 18 wt% を超えると、セルロース高分子鎖への過剰な水和によりセルロースが析出し、放射線分解反応が優勢となったためと考えられる。

次に、従来法では作製が困難であった放射線によるセルロースのゲル化が、イオン液体中でどのように形

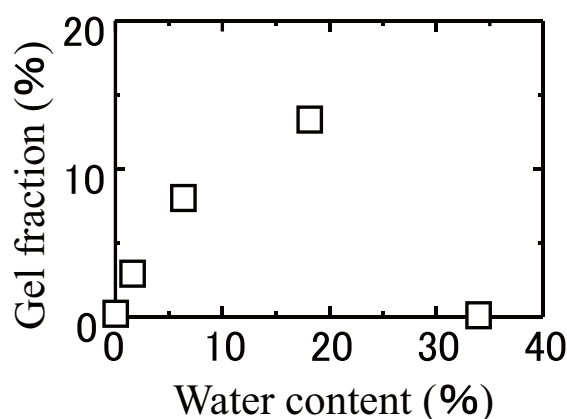


Figure 1. Water content dependence of the gel fraction obtained by γ -ray irradiation of 20 wt% cellulose in EMI-acetate at 298 K under aerated conditions at 10 kGy.

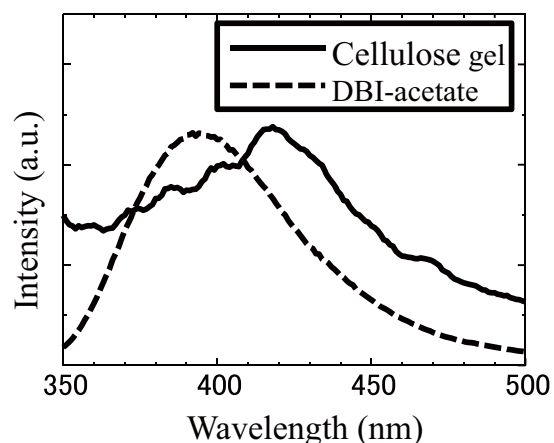
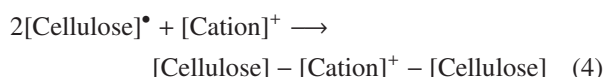


Figure 2. Fluorescence spectra of the crosslinked cellulose gel and DBI-acetate.

成されたかを明らかにするため、蛍光を発するイオン液体をプローブとして実験を行った。セルロース/水/イオン液体溶液中の架橋反応は、セルロースと OH ラジカルの反応で生成するセルロースラジカルが起点となると考えられる (式 2)。



このセルロースラジカルが相互で反応するか (式 3)、イオン液体を介して反応することにより (式 4)、セルロースの架橋構造体を形成すると考えられる。



そこで、著者らは強い蛍光を発するイオン液体である酢酸ジブチルイミダゾリウム (DBI-acetate) を前述した手法により合成し、セルロースゲルの架橋構造を調べるトレーサーとして用いた。DBI-acetate に 20 wt% のセルロースを溶解し、放射線を照射することでセルロースゲルを作製した。さらにゲルを水および有機溶媒で十分に洗浄した後に、蛍光分光分析および XPS 分析を行った。セルロースゲルの蛍光分光分析より、元来のセルロースにはない 415 nm に蛍光極大波長を有する蛍光スペクトルが得られた (Fig. 2)。これは蛍光性イオン液体 DBI-acetate の π 電子に由来する蛍光極大波長 395 nm より 20 nm 程度レッドシフトしており、

イミダゾリウムカチオンの π 電子の状態が変化していることを示唆する。つまり、イオン液体がセルロースゲルと物理吸着しているのではなく、何らかの化学結合を形成していることが考えられる。さらに、セルロースゲルの XPS 分析により、元来のセルロースにはない窒素のピークが確認されたことから、セルロースの架橋反応にイオン液体が関与していることが示唆された。

また、著者らはセルロースの架橋反応メカニズムに基づき、難溶性の多糖類であるキチンを、合成した塩化 1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムに溶解して、10 wt% のキチン溶液を調製した。さらに、含水率を 17 wt% に制御した条件で放射線照射することで、キチンゲルの作製に世界で初めて成功した⁹⁾。キチンゲルの生成収率は線量の増加に伴い増加し、60 kGy で 86% に達した。

4 まとめ

従来法では架橋が困難な放射線分解型の多糖類であるセルロースおよびキチンを、含水率を制御したイオン液体に溶解し放射線照射することで、化学架橋ゲルを作製する技術を世界で初めて開発した。さらに、独自の手法で合成した蛍光性イオン液体をプローブとして利用することで、多糖類の放射線によるゲル化において、イオン液体分子が直接反応に関わっていることを明らかにした。本研究により、これまで一般的な溶媒への分散が困難な多糖類についても、イオン液体の分子設計や放射線の照射条件を制御することで、容易

に有用な高分子材料を加工できるとともに, センサー等の電極に応用可能なイオン液体の導電性等を付加した多糖類ゲル基材の開発も期待される.

〈参 考 文 献〉

- 1) 石津 敦, 磯貝 明, 機能性セルロースの開発, CMC, (1985) 112.
- 2) Y. Nishio, K. R. Saroj, R. S. J. Manley, Polymer, 28 (1987) 1385.
- 3) Y. Fukaya, K. Hayashi, M. Wada, H. Ohno, Green Chem., 10 (2008) 44.
- 4) B. Fei, R. A. Wach, H. Mitomo, F. Yoshii, T. Kume, J. Appl. Polym. Sci., 78 (2000) 278.
- 5) L. Zhao, H. Mitomo, N. Nagasawa, F. Yoshii, T. Kume, Carbohydr. Polym., 51 (2003) 169.
- 6) N. Nagasawa, T. Yagi, T. Kume, F. Yoshii, Carbohydr. Polym., 58 (2004) 109.
- 7) J. F. Wishart, P. Neta, J. Phys. Chem. B, 107 (2003)

7261.

- 8) A. Kimura, N. Nagasawa, M. Taguchi, Radiat. Phys. Chem., 103 (2014) 216.
- 9) A. Kimura, N. Nagasawa, A. Shimada, M. Taguchi, Radiat. Phys. Chem., in press.

〈著 者 略 歴〉

木村 敦 :

長澤 尚胤 :

島田 明彦 :

田口 光正 :

Table 1. Specifications of i-ROCK.

Item	Basic specifications
Ion	C ⁶⁺
Energy	140~400 MeV/u (variable)
max. Field	20 × 20 cm ²
max. Dose rate	2 Gy/min
Beam intensity	~1.2 × 10 ⁹ pps (variable)
Irradiation type	Scanning
Treatment room	Extended scanning
	Horizontal: 2 rooms Horizontal/Vertical: 2 rooms



Figure 2. i-ROCK's photo.

2 i-ROCK の主な仕様

治療に用いられる炭素線の仕様は、基本的には量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所（以下、放医研）が設計開発した普及型小型重粒子線治療装置に準じている。同普及型治療装置は、すでに群馬大学や佐賀 HIMAT にて治療運用されており、装置の製作メーカーが異なるとはいえ実績としては十分といえる。また、同じく放医研にて開発された炭素線ペンシルビーム三次元スキャンニング照射技術と同普及器と合わせて導入することが i-ROCK の特徴の 1 つである。表 1 に主要な仕様を示す。

加速器から供給されるビームを効率的に利用するため、治療室は 4 室（水平／垂直ポート × 2 室、水平ポート × 2 室、合計 4 室 6 ポート）設けた。実際の治療時間は患者の固定＝位置決めで 8 割強が費やされるため、加速器 1 台に対して複数の治療室を配置するのは昨今の粒子線施設においては一般的であるが、全ての治療室に水平ポートが配備されている施設は少々珍しい。これは、治療する部位や重粒子線治療プロトコルを鑑みると水平ポートの利用率が多くなる、といった統計的推測に基づいている。当センターの治療装置がフル稼働した暁には、年間 880 人の患者を受け入れることが可能となる。Figure 2 に i-ROCK の外観、Fig. 3 に配置図を示す。

3 加速器システム

建物の半分弱を占める加速器システムは、大まかに、入射器、シンクロトロン、高エネルギービーム輸送系、に分類される。治療供給における加速器システ

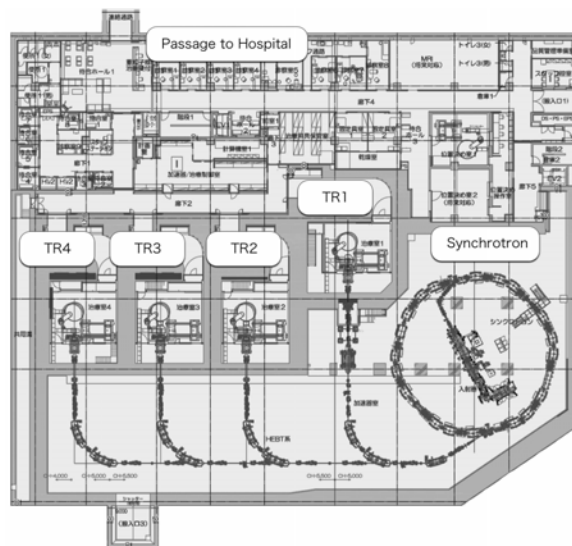


Figure 3. Layout in KCC; There is a catwalk connected to the radiation therapy area directly in the north side.

ムの最も重要な役割は、安定かつ確実にビームを供給することであるが、スキャンニング照射においては殊更高いビーム性能が必要とされるため、従来の普及型治療装置に幾つか機能を追加した。各要素の概要を以下に述べる。

3.1 イオン源・入射器

イオン源としては、電子を閉じ込めるためのミラー磁場と 6 極磁場を永久磁石により生成する ECR イオ



Figure 4. Photo of the ECR ion source and LINAC; The beam comes from right side in the photograph.



Figure 5. Synchrotron's photo.

ン源¹⁾を採用し、調整要素の軽減によりビーム強度安定化を図った。同タイプのイオン源では、引き出し電極が炭素により汚れを生じ、しばしば電極付近で放電が発生するため定期的な電極交換が必要となる。汚れ抑制にはメタンガスの流量を減らすことも策の1つであるが、ガス流量を減らせばプラズマ安定性が損なわれビーム強度が下がってしまう。そこで、サポートガス (He) を積極的に使用することでプラズマを安定させ、ビーム強度を保ちつつ電極交換時期を1年以上伸ばす、といった試みを行っている。現在、現地試験を含めた総運転時間は2年を超えているが、放電による引出電極のベース電流上昇は見られず、メンテナンスなしに継続的な運転が実施出来ている。

入射器は、RFQ 線形加速器 APF 型の集束構造を持った IH 線形加速器²⁾で構成されている。2つの線形加速器間にはマッチング用の三連四極電磁石が置かれており、アライメント誤差を吸収するためそれぞれ独立に駆動機構を備えている。Figure 4 にイオン源および入射器の外観図を示す。装置の基本性能は先行施設と全く同等であるが、加速器室の省スペース化を目的としてシンクロトロン内側に入射器全般を配置した。この結果、限られた建屋面積を有効に活用し、多くの診察室や患者待合室、スタッフ動線に用いる通路等々を追加することが可能となった。

3.2 シンクロトロン

周長約 63 m のシンクロトロン³⁾は、6 個の炭素イオンを 4 MeV/u から最大 430 MeV/u まで加速するよう設計されている。Figure 5 にシンクロトロンの全景写真を示す。出射されたビームのエネルギー変更は放医

研にて開発された可変エネルギー運転方式⁴⁾を採用した。可変エネルギー運転とは、1 サイクルの中で段々とエネルギーを変更していく運転方式であり、照射システムからの要求に応じて治療照射中に数秒の早さでエネルギー変更が可能である。

パルス運転をするシンクロトロンをビーム供給源としている治療装置にとって、呼吸同期照射における出射デューティを向上させることは大きな課題の1つである。呼吸同期照射とは、患者の呼吸波形を常時監視し、臓器の動きがある閾値以内に入った時のみビームを出射する、といった技術であるが、多くの肺がん患者の呼吸波形は必ずしも安定している訳ではなく、照射可能な時間はごく短い。そこで、フラットトップを延長することで長時間ビームを周回状態で保ち、任意のタイミング (=呼吸波形 OK) で出射可能とするフラットトップ延長運転方式⁴⁾を採用した (Fig. 6 参照)。

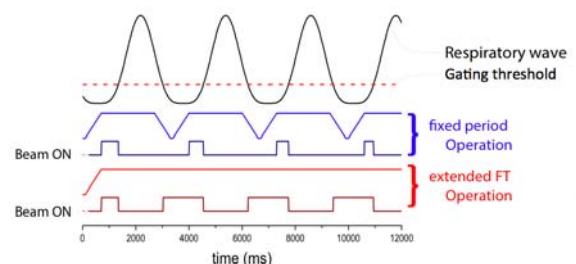


Figure 6. Schematic picture of a flat-top extension operation; Utilization efficiency of the beam is almost 100 % compared with the fixed cycle operation.

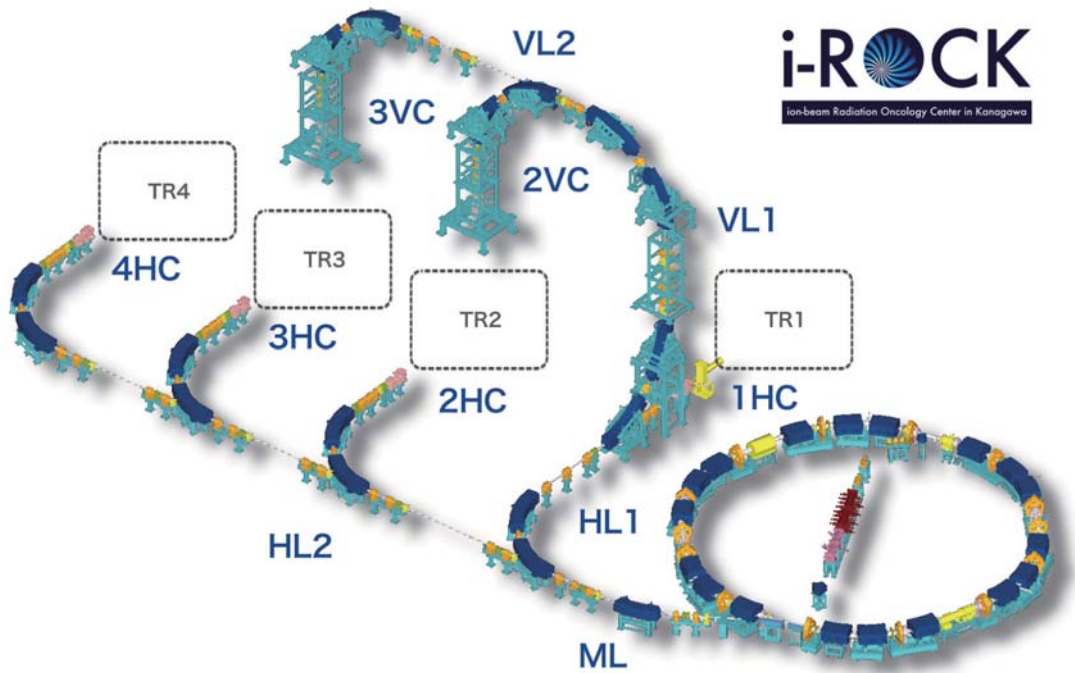


Figure 7. Equipment configuration of the accelerator system.

加速器システムの起動停止が自動であるのはもちろんのこと、治療照射時には全て照射システムの管理下におかれる。よって、前述のフラットトップ延長運転の開始停止、ビーム出射オン/オフ、周回ビームがなくなった場合の自動再入射要請等々、人の手が介入して制御する機能は一切ないといっている。

3.3 HEBT

Figure 7 に高エネルギービーム輸送系 (HEBT) の構成図を示す。垂直コースに供給するための立ち上げラインは、建屋スペース上の制約によりビーム座標系が 90 度回転している。ビーム位置やサイズを測定するため要所要所にはスクリーンモニタを配備し、ビームの出射タイミングに同期ないしは非同期で位置やサイズを測定可能となっている。スキャンング照射ではビーム位置やサイズの安定性が問われるため、運動量分散をシンクロトロン出射直後に消す、といった設計を行った。また、治療室アイソセンタでの位相調整にも気を配り、各々 π セクションになるような光学計算を取り入れている。

4 照射システム

照射野形成技術には幾つかの種類があるが、当センターでは放医研にて開発された炭素線ペンシルビーム三次元スキャンング照射技術⁵⁾を採用した。放医研では 2011 年 5 月にスキャンング照射での治療が開始され、2015 年 3 月には炭素線スキャンング初の呼吸同期照射が開始した。

多くの粒子線治療施設で用いられている照射方法は

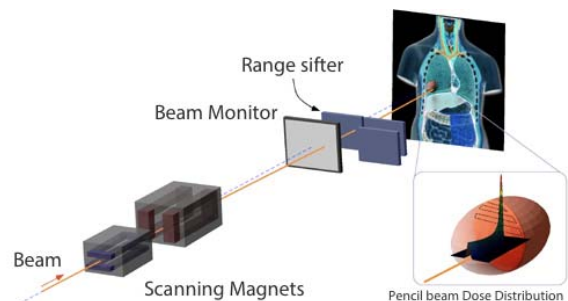


Figure 8. Schematic view of the scanning irradiation. (referred from NIRS web page)

「拡大ビーム照射法」とよばれており、まず、腫瘍を覆うように粒子線の線量集中領域（ブラッグピーク）を深さ方向に拡大する（拡大ブラッグピーク）。横方向は、加速器からの供給される細いビーム（数 mm 程度）を散乱体とワブラー電磁石によって 10 cm–20 cm 程度に広げる。次に、腫瘍形状に合わせて照射野の横方向分布をコリメーターで整形し、拡大ブラッグピークの形状をボラスによって調整することで照射野を形成する。一方、三次元スキャンニング照射では、ブラッグピークを拡大することなく細いまのビームを用い、高速な制御によって縦・横・深さの三次元方向にスキャンし、複雑な形状の腫瘍領域を塗りつぶすように照射する。Figure 8 にスキャンニング照射の概念図を示す。

続いて呼吸同期照射への対応について記す。前述の通りスキャンニング照射は動的な照射野形成技術であるがゆえに、腫瘍の動きとスキャンする動きが干渉を生み、塗りムラが生じることで線量分布が劣化する可能性が懸念されてきた。そこで、放医研では、スキャンスピードの高速化と、ビーム強度を照射中に変化させる位相制御リスキャンニング法の開発によって呼吸同期照射の実現に至った⁶⁾。高速化のため、スキャンニング方式はスポット毎にビームのオン/オフを伴わないラスタースキャンニング方式を採用し、さらには、スポット移動中の線量寄与を考慮した治療計画によって飛躍的な高速化が可能となった。また、位相制御リスキャンニング法によって、少ないリスキャンニング回数でも線量分布劣化を防げることを事前にシミュレーションで証明しており、実際の治療照射においても十分効果を得られることがわかっている。すでに 3 節 2 項でも述べたシンクロトロン運転方式と合わせ、従来の拡大ビーム照射法+呼吸同期と比べても、当センターで採用する放医研の照射方式を用いれば十分早い照射時間で高精度な治療照射を達成できる見通しである。

5 位置決めシステム

重粒子線治療の特長であるシャープな線量分布を活かすためには、的確な腫瘍位置の把握、精確な治療計画、および治療計画で決定されたがん標的の三次元的な位置形状が実際の照射室で正確に毎回再現できる必要がある。このため、治療室では患者をシェル等の固定具を用いて治療台にしっかりと固定した後、X 線画像を用いた患者位置合わせを行う。2 方向の X 線投影画像や X 線 CT 画像を用いた画像照合による患者位置合わせは、高精度の光子線治療で用いられている技術



Figure 9. Commissioning setup in the treatment room; The QA phantom located on the front of the irradiation port is used for the commissioning of the patient positioning system and the irradiation system.

と共通する部分も多いが、一方、ビーム経路上の体内の密度変化が飛程に大きく影響するといった粒子線治療特有の問題に注意する必要がある。剛体でない人間の体および体内深部のがん標的を数ミリ以下の精度で位置合わせし、かつその状態を照射中維持することは容易ではないが、現在、粒子線治療では 1 mm 前後での位置合わせ精度が議論されている。このため患者位置決めを使用する個々の機器は、0.5 mm 以下の位置精度・再現性や位置分解能を要求される。i-ROCK には以下の 3 タイプの X 線位置照合システムを整備した。

- (a) 2 方向 X 線 FPD (Flat Panel Detector) 投影画像による位置照合
- (b) X 線 CT 画像による位置決めの検証
- (c) 2 方向斜め X 線透視画像による臓器運動の監視

現在、これらの機器の位置精度・再現性、およびソフトウェアの妥当性についてコミッショニングを行っている (Fig. 9 参照)。

6 治療装置コミッショニング

入射器のビーム調整は 2014 年 12 月初旬から開始され、間もなく 4 MeV/u の C^{6+} が観測された。シンクロトロンにおける本格的なビーム調整は 2015 年初頭から開始され、1 月早々には最大エネルギー 430 MeV/u の加速に成功した。その後は、加速器室外への漏洩線量測定を実施し原子力安全センターの施設検査にも無事合格した。同年 2 月には、初めてのスキャンニング照射試験を行い二次元照射分布の測定結果を得ることが

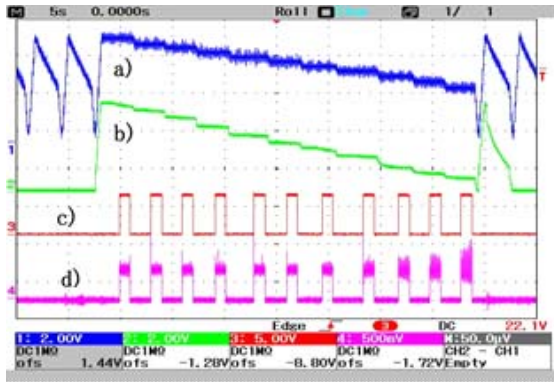


Figure 10. Spill in one cycle with the flat-top extension operation. (all 11 energy) a) BM current, b) DCCT, c) Enable signal of extraction and d) Dose monitor.

できた。

スキャンング照射法においては、スキャンする筆先ともいえるペンシルビーム自身の性能が形成される照射野に対して直接影響を及ぼすため、まず、ペンシルビームの性能担保を行うことがコミッショニングの最も重要な出発点となる。そこで我々は、ペンシルビームの時間的な強度変化（スパイル）、位置、サイズを中心に、再現性および安定性の確認を行った。

Figure 10 に示すのは、シンクロトロン の 1 サイクル

運転中に 11 段刻み（430, 400, 380, 350, 320, 290, 260, 230, 200, 170, 140 MeV/u）でビームエネルギーを変更していった際に得られたスパイル波形である。各エネルギー毎のビーム強度安定性は許容範囲であり、ビーム射出要求、ないしは、ビーム遮断要求に対する時間的レスポンスも問題ない範囲に収まっていることを確認した。

続いて、治療室アイソセンタにおけるビームサイズおよび位置の安定性確認を行った。測定には、蛍光膜 + CCD カメラで構成された小型暗箱（ISO-SCN⁷⁾を用いた。Figure 11 に、全てのエネルギーに関して測定したビーム位置・サイズの時間的な変化を捉えた結果を示す。各エネルギー毎の測定時間は約 10 秒で、位置サイズともに全てのエネルギーに関して ± 0.5 mm の範囲で収まっていることを確認した。

ペンシルビーム自身の性能評価を行ったのち、次はスキャンング照射装置全体のコミッショニングに移行する。確認項目は以下の通りである。

- 1) スキャンビームの位置確認
- 2) 線量計の性能評価
- 3) 位置モニタの性能評価
- 4) 照射装置の総合試験

なお、これらのコミッショニング確認項目および確認方法は、放医研で開発されたプロトコル⁸⁾に則り実施した。

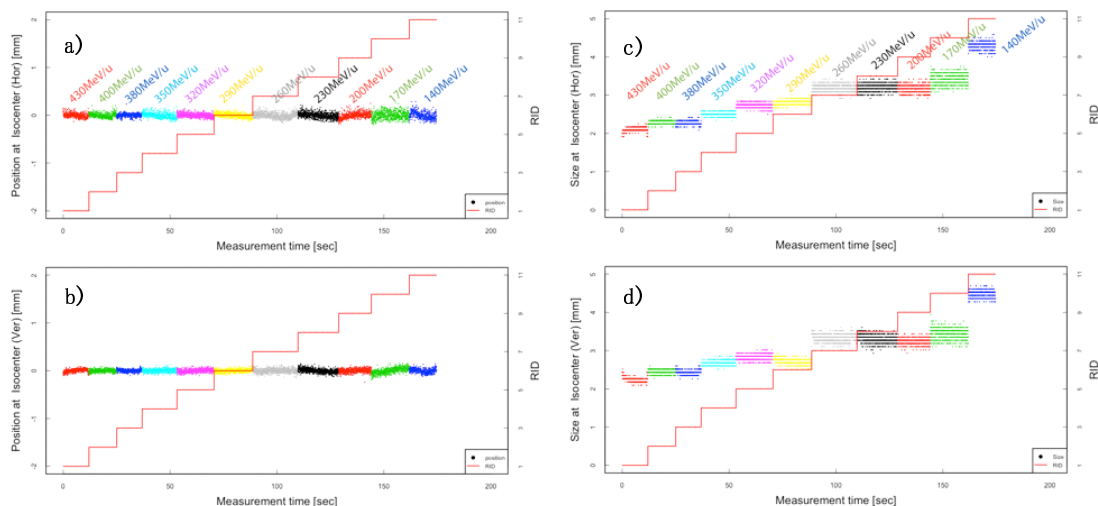


Figure 11. Beam position and size stability at 2VC. a) Beam position X, b) Beam position Y, c) Beam size X, d) Beam size Y and color differences represent the data for each energy.

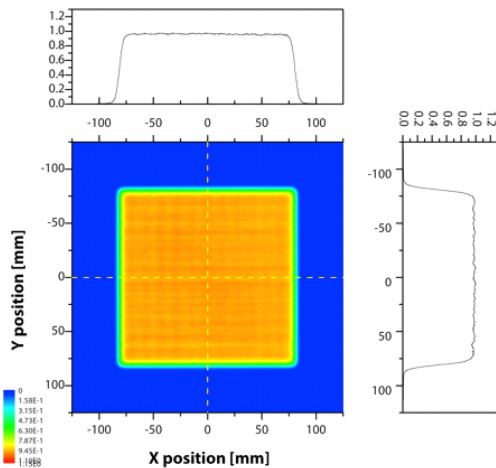


Figure 12. Measured distribution of the uniform field. ($150 \times 150 \text{ mm}^2$, 2 mm pitch, 290 MeV/u)

まず項目 1) については、20 mm と広いピッチで離散的なスキャンを行い、それぞれのビーム位置を計測することで目標とするスキャン位置に正しく照射されているかどうかを確認した。結果として、全ての照射条件において $\pm 0.5 \text{ mm}$ 以内で一致する良好なものを得られた。次に項目 2) について、照射線量を制御するために用いている電離箱の線形性、再結合の有無、位置依存性等を測定し、全て許容範囲内であることを確認した。項目 3) として、照射中のスキャン位置をリアルタイム監視している位置モニタに関して、健全性等々の確認を実施した。最後に、これら全ての性能評価を行ったのち、均一照射野をもちいて平坦度確認を行った。計測は、蛍光膜 + CCD カメラで構成される大型の照射野測定器 (QA-SCN⁹⁾) を用いて実施した。Figure 12 は、QA-SCN を使って得られた均一照射野の二次元フルエンス分布であり、その平坦度は照射野領域で $\pm 3\%$ に入る結果を得ることができた。

以上のように、照射装置のコミッショニングはほとんどの場合で二次元照射野を用いて行うが、実際の治療では深部方向にも照射する、いわゆる三次元的照射野を形成しなくてはならない。治療に用いる照射野の最適化、つまり医師が処方する線量を処方すべき位置に照射する、といった指示を出す役割を担うのが治療計画装置というものである。コミッショニングの最終段階では、この治療計画装置および照射装置を組み合わせる試験が必要となる。そこで、幾何学的な直方体

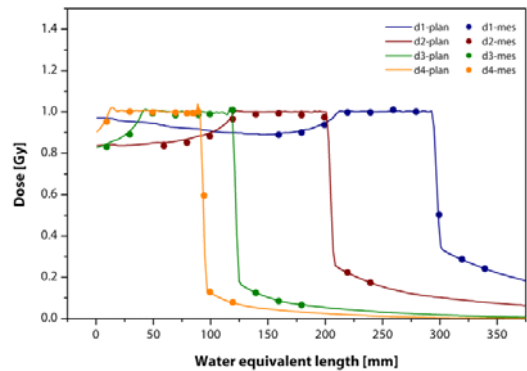


Figure 13. Depth dose distribution with the 3D irradiation field. ($60 \times 60 \times 80 \text{ mm}^3$, 2 mm pitch)

形状の三次元照射野を治療計画装置で作成し、計画装置から出力される線量分布と、電離箱で検出された線量分布の比較を行った。Figure 13 はその結果の一部を示しており、照射野サイズはケース毎に同じだが最大飛程が異なる 4 パターンについて評価したものである。実際は異なる照射野サイズ、異なる最大飛程について幅広く検証し、結果、全ての場合で計画線量と測定線量が $\pm 3\%$ 以内に収まることを確認した。

7 最後に

当センターでは 2015 年 12 月の治療開始以来、大きなトラブルにも見舞われず順調なスタートを切っている。重粒子線治療では、装置全体の規模が大きいため、医師、技師、看護師、医学物理士、エンジニア、メーカーといった多くの職種が関わらなくてはならず、それぞれの職種が理解しあい協力しあうことが最も重要である。たとえ装置コミッショニングが滞りなく終わったとしても、装置を扱うすべての職種が連携しなくては治療自体成り立たない。今後、当センターでは、前立腺がんのみならず、保険適応が決定した骨軟部腫瘍や、難治性の高い頭頸部がん、さらには呼吸性移動のある臓器 (肺、肝臓) も含め適応部位を拡大していく予定であるが、適応症例が広がるにつれ、各職種同士の連携は益々重要なものとなってくるであろう。重粒子線治療大国と名高い日本における重粒子線治療施設の 1 つとして、その責務を果たすためにも、我々センター一同一丸となって治療促進を図っていかねばならないと、意識新たに取り組んでいく所存である。

〈謝 辞〉

神奈川県立がんセンターに重粒子線治療装置を導入するにあたり、施設全体のシステム設計のみならず、コミッショニング等々において全面的に御支援頂きました放射線医学総合研究所の関係者方々にこの場をお借りして感謝を述べさせていただきます。また、装置の製作・試験にあたり御協力頂きました(株)東芝、住友重機械工業(株)、早川工業(株)、東芝電機サービス(株)、芝浦エレテック(株)、加速器エンジニアリング(株)の技術者の皆様に心より感謝致します。

〈参 考 文 献〉

- 1) M. Muramatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrm., 76 (2005) 123304.
- 2) Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. 572 (2007) 1007.
- 3) T. Furukawa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. 542 (2006) 1050.
- 4) Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. 624 (2010) 33.
- 5) T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 37 (2010) 5672.
- 6) T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 37 (2010) 4874.
- 7) K. Mizushima *et al.*, Proc. of IBIC2012 (2012) 256.
- 8) 放医研 QA 分科会 (2011).
- 9) E. Takeshita *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms 269 (2011) 2936.

先端放射線化学シンポジウム（浜松） 放射線加工技術を駆使した生体親和性材料の医療への応用

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
廣木 章博, 大山 智子, 田口 光正*

1 はじめに

近年の革新的な医療技術の進歩により日本人の平均寿命は伸長している。その一端を担う再生医療分野では、マイクロメートルあるいはナノメートルレベルの材料の微細加工・改質を可能にする最先端の医療技術や装置が開発されている。体内埋め込み式のマイクロマシンや機能性デバイスであるラボチップの開発では、細胞接着性をはじめとする生体親和性材料の創製がカギとなる。また、がん治療分野では、強度変調放射線治療装置や粒子線治療装置などが患部に集中的にエネルギーを付与する装置の開発や高度化が進んでいる。患者への負担や二次的な発がんのリスクを低減するためには、患部周辺の正常な細胞には照射しないことが望まれ、複雑な線量分布が計画されるようになってきている。しかしながら、従来から用いられている電離箱やフィルム線量計では一次元あるいは二次元の線量分布しか測定・評価することが出来ず、治療計画と比較可能な三次元的な線量分布を得ることは困難であった。

電子線やイオンビームなどの放射線は高分子材料に対して空間分布を制御しながら主鎖切断あるいは橋かけ（架橋）を引き起こすことが出来る。すなわち、これらの化学反応を利用することで、毒性の高い重金属などの触媒や薬剤を使わずに材料の表面加工や改質、特性向上、機能化を行うことができる。我々は、放射

線加工・改質技術を駆使して、再生医療やがん治療などの医療分野で利用可能な機能性プラスチック材料やゲル線量計など、“人にやさしい”天然高分子材料の開発を推進することでライフイノベーションへの貢献を目指している。

2 機能性プラスチック材料の開発

最先端の再生医療分野ではマイクロマシンやマイクロデバイスなど、マイクロ・ナノメートルの精密な微細加工技術に加え、細胞接着性をはじめとする特定の機能や特性を制御した生体親和性材料の創製が求められている。しかし、生体親和性材料は熱に弱いものが多く、容易に変形してしまうため、これらの精密な微細加工体を作製することは困難であった。縫合糸やインプラントなどに使われている代表的な医用プラスチックであるポリ乳酸の集束イオンビーム（FIB）による微細加工と機能化について検討した。FIBは、物理スパッタ（原子のはじき出し）に加え、エネルギー付与による化学的な効果によって分解反応を誘起するため、無機材料に加え、プラスチック材料の表面微細加工が可能である。ポリ乳酸はガラス転移温度（約60℃）以上で容易に熱変形を起こす。FIBによる微細加工を行った結果、高線量・高線量率・大面積照射など加熱されやすい条件や、熱が拡散しにくい厚い試料では表面が荒れたりエッジが丸くなったりと、加工精度が劣化した。そこで、シリコンウェハー上に数100 nm以下の厚さでスピコートしたポリ乳酸に、直径50 nm以下に絞った30 keVのガリウムFIBの線量率を最適化することによって、微細加工技術を開発した^{1,2)}。この方法により、Figure 1に示すような直径80 nmの穴や幅60 nmの溝、100 nm幅の文字列など、任意形状を精密に加工することに成功した。

さらに、照射により掘削した溝の底面の化学結合変化を、X線光電子分光法（XPS）を用いて分析した結

Radiation processing of biocompatible polymers and their medical applications

Akihiro HIROKI, Tomoko OYAMA and Mitsumasa TAGUCHI* (National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology),

〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

TEL: 027-346-9386, FAX: 027-346-9422,

E-mail: taguchi.mitsumasa@qst.go.jp

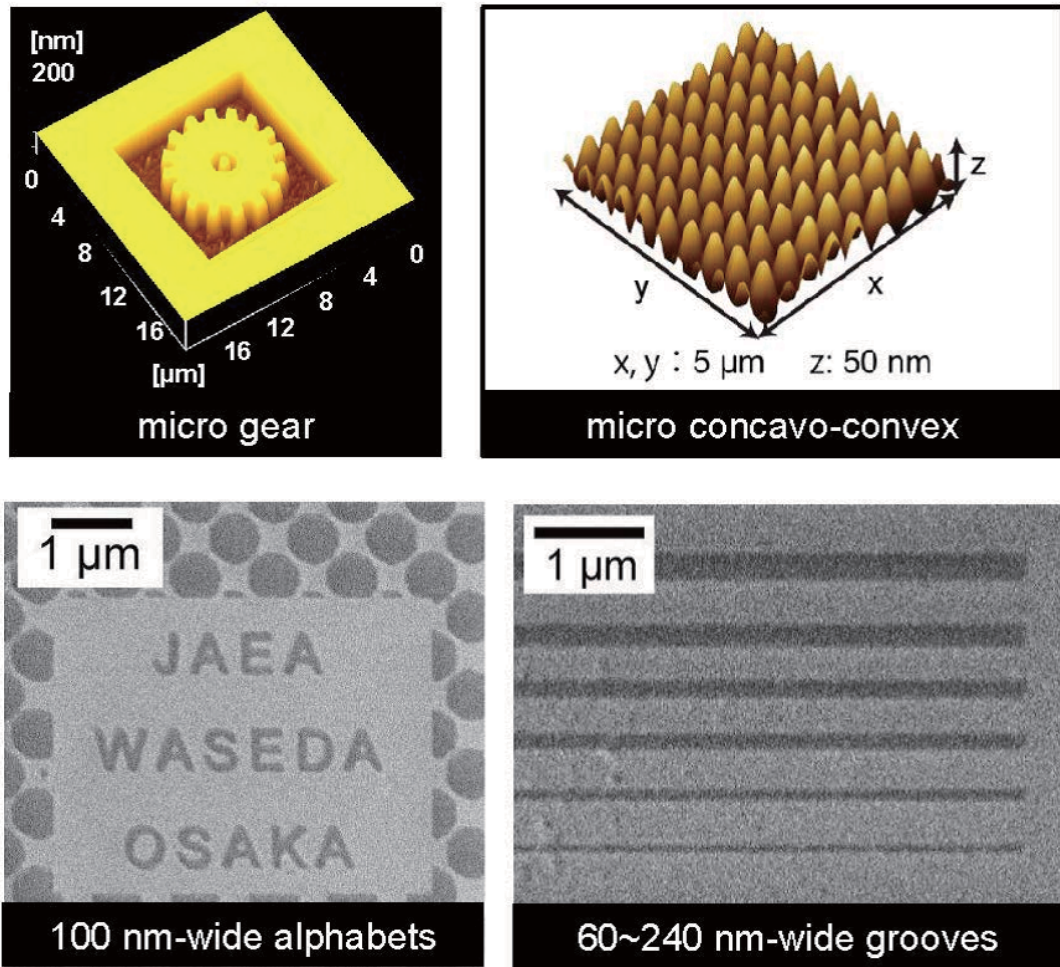


Figure 1. Micro/nanostructures fabricated on poly(L-lactic acid) using 30 keV Ga⁺ FIB.

果、照射によって炭素の二重結合 (C=C) が増加したことが分かった。このことは、物理スパッタと放射線分解反応による分解物の脱離によって酸素と水素が減少し、試料表面がダイヤモンド・ライク・カーボン (DLC) 様の表面状態に変化したことを示している。DLC 様の表面は C=C の割合によって細胞接着性の強弱が変わることが報告されており、本研究で得られた微細加工体は、局所的に細胞接着性を制御できるバイオデバイスとしての応用が期待される。

3 ゲル線量計の開発

これまで、高分子の放射線橋かけ技術³⁾を利用した創傷被覆材、ソフトコンタクトレンズ、ランプシェード、学校教材⁴⁾などを開発してきた。放射線橋かけにより作製したハイドロゲルは、自重の数 10 倍の水分を

含むことが可能であり、熱安定性や形状安定性、透明性が高い。そこで、天然高分子由来のヒドロキシプロピルセルロース (HPC) の放射線橋かけゲルに、検出液として毒性の低いモノマー水溶液を含有させた放射線がん治療用ポリマーゲル線量計の開発を行った⁵⁻⁷⁾。HPC ゲルは、20 wt% の HPC 水溶液 (ペースト) を厚さ 1 mm に成膜した後、電子線 (2 MV) を 10 kGy 照射することで作製した。水洗浄後、乾燥させた HPC ゲルを 2-ヒドロキシエチルメタクリレート (HEMA) とノナエチレングリコールジメタクリレート (9G) を 1 wt%-4 wt% (モノマー総濃度 5 wt%) で溶解した水溶液に浸漬し、真空パックすることで透明なシート状ポリマーゲル線量計を作製した。

実際の放射線がん治療で適用される 2 Gy 程度の γ 線を照射した時のゲル線量計の様子を Fig. 2 に示す。

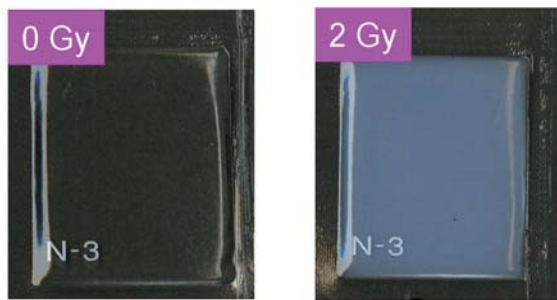


Figure 2. Photos of gel dosimeters before (left) and after γ -ray irradiation (right).

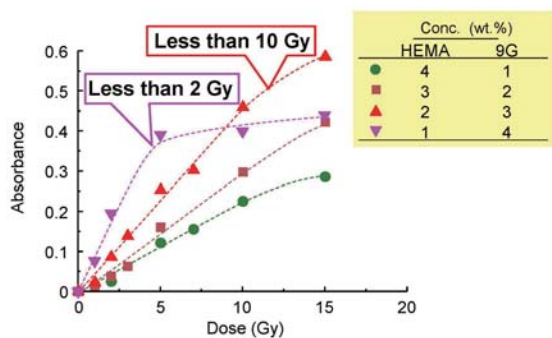


Figure 3. Dose response of gel dosimeters prepared with different concentrations of HEMA and 9G.

照射前の透明なゲルがはっきりと視認できるまで白濁した。この白濁の程度は、5 Gy あるいは 10 Gy 程度まで直線的に増加した (Fig. 3)。また、吸光度の増加は、9G 濃度が高いほど急激であり、HEMA 1 wt%、9G 4 wt% のポリマーゲル線量計では、5 Gy で吸光度が 0.4 に達した。放射線感度 (単位線量に対する白濁の程度) は 9G 濃度にほぼ比例して増加した。これは、二官能性モノマーである 9G が増加したことで、重合反応や分岐鎖の形成が促進された結果、白濁因子である光散乱強度の大きなポリマー微粒子が生成したためと考えられる。

作製したゲル線量計の三次元線量分布評価を行った。シート状のゲル線量計を、人体を模擬した水槽 (水ファントム) に入れ、放射線医学総合研究所の重粒子線加速器 HIMAC からのヘリウム線を照射した。 γ 線同様に、重粒子線照射によってゲル線量計は 2 Gy でも目視で確認できる程度まで白濁した。そこで、

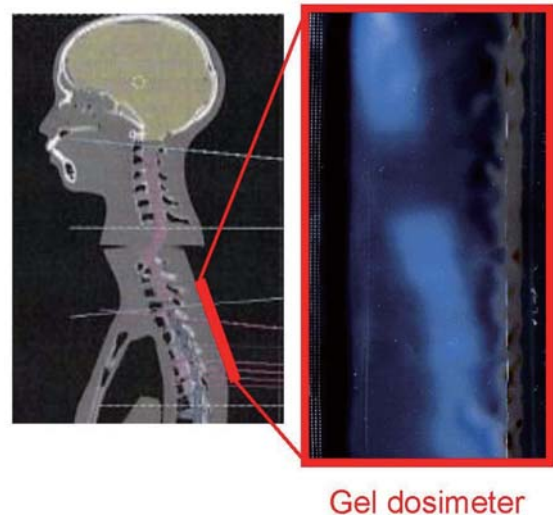


Figure 4. Dose distribution of X-rays on body surface for whole spine cord cancer therapy.

シート状のゲル線量計を重ねて立方体状ゲル線量計を作製し、その中心位置にブラッグピークが来るように 4 方向からヘリウム線を照射した。これは実際の放射線がん治療で用いられている 4 門照射を模擬したものである。その結果、透明なゲルの中心部分に形成した白濁化領域を視認できた。また、各シート状ゲル線量計を PC スキャナーで読み込むことで、各ゲル層の白濁度分布が計測でき、それを重ね合わせることで立体データを構築できることを確認した。

次に作製したシート状ゲル線量計のインジケータとしての使用法を検討した。放射線治療を行う場合、照射 (治療) 装置の QC (品質管理) と QA (品質保証) として電離箱やフィルム線量計により事前に照射位置や線量が確認されている。しかし、治療後に患者の患部に正確に照射されたかどうか、照射位置や線量を確認することは難しい。ゲル線量計は、生体等価な材料であることに加え、柔らかいため体にフィットしやすい。また透明であるため、体にマークしたラインを透視しながら計画通りに照射されているか目視により確認することができる。Figure 4 に、脳腫瘍の患者に対して治療を行う際のゲル線量計の使用例を示す。脊髄に X 線を照射する場合、一度に全領域を照射することが出来ないため、脳幹から肩口までと、肩口から腰までと 2 回に分けて照射 (治療) を行う。1 回目と 2 回目の照射位置が近すぎた場合、照射位置が重なり、患部の一部が二重照射される、あるいは離れすぎた場合に

は、未照射の領域が出来てしまうので治療が未達になる。Figure 4 右のゲル線量計の白濁結果より、治療計画 (Fig. 4 左) に即した X 線照射が行われていることを示している。このように、医療過誤を防止するためのインジケータに利用可能なゲル線量計の開発を行っている⁸⁾。

4 今後の予定

プロジェクト「生体適合性材料研究」では、放射線分解あるいは橋かけ反応を利用した、微細加工・改質技術の高度化により、医療やバイオ研究に応用可能な生体親和性材料を創製する研究・技術開発を進めていく。

〈謝 辞〉

本研究は JSPS 科研費 (23710073, 26460737), および JST/A-STEP (AS232Z02044F) の支援を受け、放医研 HIMAC 共同利用研究課題として実施しました。田川精一特任教授 (大阪大学), 鷺尾方一教授 (早稲田大学), 大島明博博士 (大阪大学), 山下真一博士 (東京大

学), 長澤尚胤博士 (原子力機構), 木村 敦博士 (原子力機構) にご協力いただきました。感謝いたします。

〈参 考 文 献〉

- 1) T. G. Oyama *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 103 (2013) 163105.
- 2) プレス発表, 平成 25 年 12 月 17 日 原子力機構 高い細胞接着性を持つ生体に優しいプラスチックの開発に成功.
- 3) F. Yoshii *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms*, 208 (2003) 320.
- 4) プレス発表, 平成 27 年 2 月 12 日 原子力機構 放射線で加工した樹脂が学校教材に.
- 5) A. Hiroki *et al.*, *Phys. Med. Biol.*, 58 (2013) 7131.
- 6) A. Hiroki *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 444 (2013) 012028.
- 7) S. Yamashita *et al.*, *Radiat. Phys. Chem.*, 101 (2014) 53.
- 8) 廣木章博, 山下真一, 田口光正, 盛武 敬, 大城佳子, ポリマーゲル線量計, 特願 2013-61789, 2013/03/25.

先端放射線化学シンポジウム (浜松)
シンクロトロン放射光を用いた放射線生物研究

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

藤井 健太郎

1 はじめに

放射線は、細胞致死や突然変異などの生物影響をもたらす。その主要な原因の1つが、遺伝子であるDNAへの様々な損傷の誘発であるといわれている。様々なDNA損傷の中で「DNA鎖切断」は、細胞致死などに関わる重要な損傷形態であり、ほぼ半世紀にわたる研究の歴史がある。DNAの分子鎖が放射線によりどのように切断されて行くのかについては、放射線生物学の長年の課題であるにもかかわらず、OHラジカル等の一部の水の分解生成物による間接的な反応を除けば、そのプロセスの詳細の解明は進んでいない。特に放射線のエネルギーを直接吸収することでDNAにイオン化が生じた時に、DNA鎖上のどの化学結合が切断を受けるのかなど、最も基本的な化学反応についてさえ全く理解が進んでいない。本研究では、シンクロトロン放射光を利用することでこの光源の持つ、他の光源では出せない軟X線以下のエネルギー領域の利用、および単色軟X線による特定元素を狙ったイオン化を可能とする特性を利用し、放射線のエネルギー吸収からDNA鎖切断にいたるプロセスを、物理化学の観点から明らかにした。

2 DNA構成元素の内殻電子のイオン化によって生じるDNA鎖切断の生成過程

DNA分子中の特定元素中の電子の束縛エネルギーを狙ってイオン化することで、DNA分子中のエネルギー吸収部位と化学結合の切断(損傷)の相関を詳細に調べることができる。内殻(K殻)電子の束縛エネ

ルギーに相当する軟X線(10 keV)以下の任意のエネルギーを実用強度で利用できる光源は、現在ではシンクロトロン放射光(以下、放射光)が唯一である。特定元素をイオン化させるために、内殻電子の束縛準位に相当する単色軟X線をDNA薄膜試料に照射しながら、同時に試料から脱離するイオンの観測を行った。その結果、DNA主鎖を構成する糖部位(デオキシリボース)が分子中で最も脆弱で複数の分子断片イオンに分解されることを明らかにした¹⁾。この糖の激しい分解によってDNA鎖の切断が誘導されると考えられるが、切断端の化学構造に関する情報については、脱離イオン観測のみでは得られない。切断端のごく近傍に塩基損傷が付加的に生じた場合、その末端の化学構造に強く依存して、生体修復を受けにくい、いわゆる“クラスターDNA損傷”となることが予測される²⁾。放射線の生物影響を理解する上で、DNA鎖切断

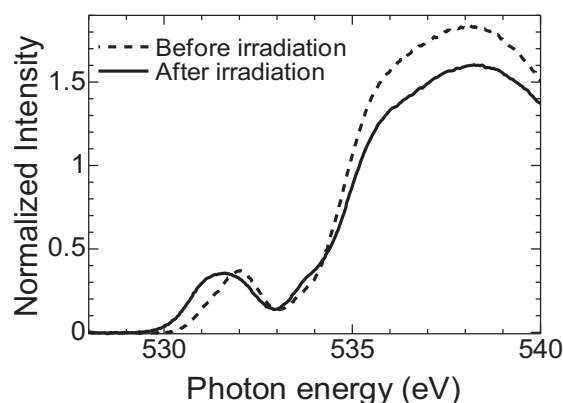


Figure 1. X-ray absorption near edge structure of oxygen K-edge of a DNA film irradiated with 560 eV soft X-rays (solid line) and the spectrum of a non-irradiated DNA film (dashed line).

Radiation Biology utilizing Synchrotron Radiation
Kentaro FUJII (National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology),
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4
TEL: 070-3943-3415, E-mail: fujii.kentaro@qst.go.jp

の末端構造の解明は極めて重要である。照射後に試料に残った分子の構造を明らかにするために、DNA 薄膜試料に対して軟 X 線の照射実験を行い、照射後の軟 X 線吸収スペクトルの測定を行った³⁾。軟 X 線吸収スペクトル中の吸収端近傍に現れる微細構造は、分子内の化学結合を反映したピーク構造が現れるため、官能基を判別するフィンガープリントとしても利用されている⁴⁾。照射には、酸素の内殻電子をイオン化することのできる 560 eV の単色光を用いた。酸素原子は、DNA の主鎖を構成する糖部位のペントース 5 員環構造の維持に重要な役割を果たしている。実験の結果、照射後に C=O 基を持つ官能基が DNA 分子中に生じることを明らかにした (Fig. 1)³⁾。人工合成したクラスター損傷では、C=O 基が鎖切断端にある場合には、他の末端構造よりも修復効率が下がることが知られている⁵⁾。得られた結果は、酸素の K 殻イオン化により難修復性 DNA 損傷を生成する可能性を持つことを示唆している。

3 内殻電子のイオン化によって生じる DNA 鎖切断の生成に関わる水和水分子の役割

生体中では、水和水が DNA と結合しているため、鎖切断の生成に対して水和水がどのような役割を担うかを明らかにする必要がある。DNA を取り囲む水は、「水和層」と、その周りにランダムに配置している「バルク水」とに分けることができる。水和層は DNA と

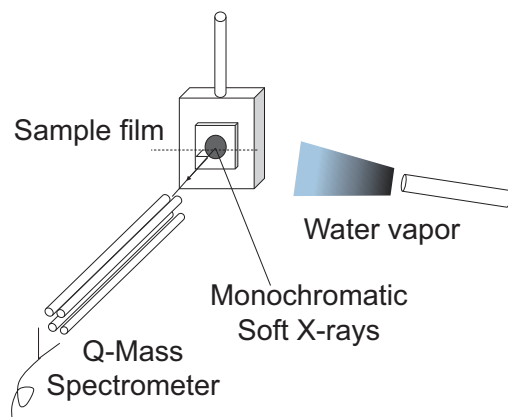


Figure 2. Schematic view of the experimental setup of the measurement of desorbing ions from hydrated sample film irradiated with monochromatic soft X-rays.

水素結合している「第 1 水和層」とその周りの第 2 水和層に分類されているが、これら水和層が DNA 損傷生成に関与する過程は準直接効果とよばれ、その詳細は未だ解明されていない⁶⁾。鎖切断の生成過程に、水和水分子がどのような役割を担うのかを明らかにするために、水和したデオキシリボース分子に対して単色軟 X 線照射を行い、試料表面から脱離するイオンを観測した (Fig. 2)。その結果、脱離する分子断片イオンの量が、試料表面上への僅か 1 層の水分子の吸着により顕著に減少すること、そしてバルク水が無いにも関わらず、水の放射線分解と同様に H_3O^+ が脱離することを明らかにした (Fig. 3)。実験と並行してフランスのピエール・マリキュリー大学のグループと協力し、デオキシリボースの時間依存密度汎関数法を用いた分子動力学シミュレーションを実施した⁷⁾。その結果、デオキシリボースからこれを取り囲む水分子へのプロトン的高速移動が、数 fs 以内に起こること、 H_3O^+ が水の放射線分解を伴わず生じることが見出された。これらのイオンにより、DNA 分子中のプロトン解離型損傷の近傍にさらに新たに酸化的塩基損傷が誘発され

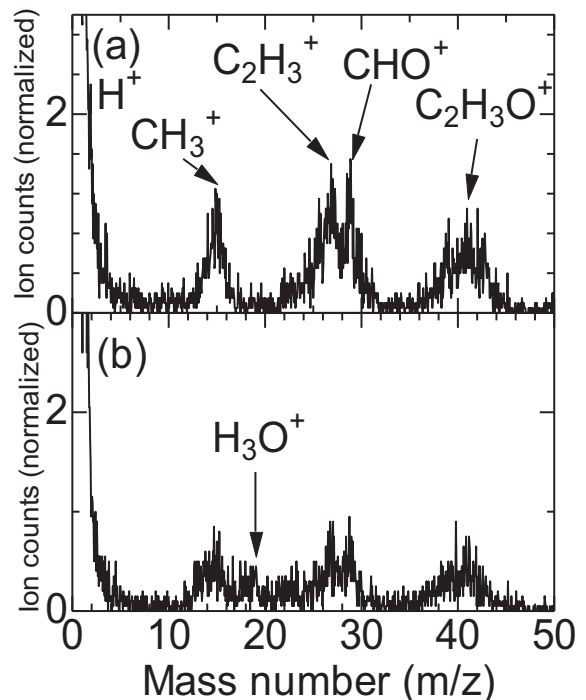


Figure 3. Desorbed positive ion mass spectra of (a) dry dR and that of (b) hydrated dR film obtained during the irradiation with 560 eV soft X-rays.

ることは、容易に推測される。一方、このプロトンの高速移動により、イオン化によりデオキシリボースに生じた電荷が水分子に分配されることで、デオキシリボース自身の分解抑制が起こる。このように、DNAの周囲の水分子は、デオキシリボース（糖部位）の激しい分解を抑制するものの、逆に塩基に対して酸化的な損傷を誘発することで、1回のイオン化によって近接した部位に複数の損傷の誘発に寄与する可能性がある⁸⁾。

4 おわりに

DNAに対する放射線の直接的なエネルギー付与によって起こる鎖切断の生成過程をシンクロトロン放射光を用いた分光学的方法によって明らかにした。最近我々のグループでは、このような鎖切断がどのようにして修復されるか、その初期段階について研究を進めている⁹⁾。DNA二本鎖切断が生成した細胞ではDNAを取り巻くヒストンタンパク質の構造が変化することを、放射光を用いた真空紫外線領域の円偏光二色性スペクトルの測定により明らかにした¹⁰⁾。詳細は解説を参照されたい¹¹⁾。さらに、細胞レベルでの放射光X線照射実験を行うため、顕微鏡視野下で個々の細胞を選別して照射し、その後の細胞の形態を継続的に観測するシステムを利用した実験も開始している¹²⁾。このように、真空紫外線領域から軟X線そしてX線領域にわたり、それぞれの波長領域での放射光の特性を生かし、分子レベルから細胞レベルにわたり、放射線生物

研究を展開している。このような放射光を用いた研究の成果が、放射線の生物影響の解明にブレークスルーを与えることを期待したい。本研究の一部は、JASRI実験課題（2013A3813, 2014B3812）により実施した。

〈参考文献〉

- 1) K. Fujii, K. Akamatsu, A. Yokoya, *Radiat. Res.*, 161 (2004) 435.
- 2) D. T. Goodhead, *Int. J. Radiat. Biol.*, 65 (1994) 7.
- 3) K. Fujii, Y. Fukuda, A. Yokoya, *Int. J. Radiat. Biol.*, 88 (2012) 888.
- 4) J. Stöhr, *NEXAFS Spectroscopy* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992).
- 5) L. F. Povirk, *Int. Schol. Res. Net. Mol. Biol.*, 2012 (2012) 345805.
- 6) A. Adhikary, D. Becker, M.D. Sevilla, in *Applications of EPR in Radiation Research*, A. Lund, M. Shiotani (Eds.) (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014), pp. 299–352.
- 7) M. A. Herveé de Penhoat *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17 (2015) 32375.
- 8) K. Fujii *et al.*, submitted to *Radiat. Res.*
- 9) Y. Izumi *et al.*, *Radiat. Res.* 184 (2015) 554.
- 10) Y. Izumi *et al.*, submitted to *Biophys. J.*
- 11) 泉雄大他, *放射線生物研究*, 51 (2016) 91.
- 12) A. Narita *et al.*, *Radiat. Prot. Dosim.* 166 (2015) 192.

「放射化学の辞典」日本放射化学会編

本書は、核化学および放射化学に関連する用語ならびにトピックスを解説した本邦初の書籍である。序文には、「本書は日本放射化学会、およびその周辺の科学者の英知を結集して編纂されたもので、現時点でこの分野の最も新しく、信頼できる書であると自負している。」と書かれており、編集者の本書に対する熱い思いが感じられる。

冒頭の4ページはカラー口絵となっており、実験装置（スーパーカミオカンデなど）や測定データ（福島第一原子力発電所周囲100 kmまでの ^{137}Cs の分布、生体内の放射性同位元素分布など）がカラー図、写真、マップとして示されている。本論部分は、「I 放射化学の基礎」、「II 放射線計測」、「III 人工放射性元素」、「IV 原子核プローブ・ホットアトム化学」、「V 核・放射化学に関連する分析法」、「VI 環境放射能」、「VII 原子力と放射化学」、「VIII 宇宙・地球化学」、「IX 放射線・放射性同位元素の生命科学・医薬学への応用」、「X 放射線・放射性同位元素の産業利用」に分類され、各々について、12-22項目の用語、トピックス、エピソードがそれぞれ1-4ページで解説されている。各項目の執筆は約130名のそれぞれの専門家が担当している。

話題やエピソードはコラムとして書かれており、たとえば、最近話題となった新元素の発見と命名権については、「III-07 超アクチノイド元素」に加えて、2つのコラム、「III-19 新元素発見にまつわるエピソード」、「III-20 新元素の承認」で取り上げられている（ただし、理化学研究所による113番目の元素の命名権の獲得のニュースは、本書の刊行が2015年9月と命名権獲得の前であったため、書かれていない）。巻末の付録には、「1. 核化学・放射化学に関係するノーベル賞受賞者とその業績」、「2. 安定核種の同位体存在度と原子質量」、「3. 天然の放射壊変系列」、「4. 主な天然放射性核種」、「5. 人工放射元素一覧」が図表としてまとめられている。

核化学 (Nuclear Chemistry) および放射化学 (Radiochemistry) は、各々、原子核反応で生成する人工放射性元素および放射性物質の性質や反応に関する化学であり、放射線によって生じる物質の変化を扱う放射線化学 (Radiation Chemistry) とは区別される。しかしながら、放射線源や放射線発生装置、放射線計測ではオーバーラップする部分が多く、当然本書にもこれら

の基礎となる概念および具体的な放射線源や放射線発生装置、放射線計測機器に関する多くの項目が含まれている。加えて、放射線の応用に関しても、原子炉の水化学、放射線の生物作用・医学応用、イオンビーム育種、放射線高分子グラフト、環境汚染物の放射線分解、放射線殺菌・滅菌など放射線化学と共通するトピックスが取り上げられている。

一方、放射線化学ではあまり取り上げられない軽水炉、次世代炉、核融合炉、核燃料、分析法、環境放射能、放射年代測定、地球科学に関する多くの項目が解説されている。「VII-21 原子力の事故」では、スリーマイル島原子力発電所の事故、チェルノブイリ原子力発電所の事故、JCOの臨界事故、福島第一原子力発電所の事故が4ページにわたって比較的詳しく説明されている。福島第一原子力発電所の事故後の放射線汚染の分布状況は、「VII-22 大規模放射性核種分布」で説明されており、いずれの核種も北西地域で濃度が高かったこと、福島中通り地域では阿武隈山地南部よりも濃度が高かったこと、 ^{131}I と ^{137}Cs では分布に違いがあったことが述べられている。

コラムとして書かれている「IV-13 火星に水があった」、「V-20 かぐや (SELENE) γ 線分光」、「VIII-12 オクロ現象」、「X-12 放射能温泉」などは、読み物としても面白く、大学の講義などで学生に放射線分野に興味をもってもらうのに適したトピックスではないかと思う。本書を当学会編の教科書「放射線化学のすすめ - 電子、イオン、光のビームがくらしを変える、産業をつくる -」とともに活用すれば、放射線に関連する化学の全体像を知ることができよう。

*書籍情報

放射化学の辞典

日本放射化学会編、朝倉書店

A5 / 376 ページ

発行日 2015年9月20日

ISBN978-4-254-14098-9

定価 9,936円 (本体 9,200円+税)

<https://www.asakura.co.jp/books/isbn/978-4-254-14098-9/>

(産業技術総合研究所 小林 慶規)

13th Tihany Symposium on Radiation Chemistry 参加報告

2015年8月29日から9月3日の6日間、ハンガリーのバラトンアルマーディにて13th Tihany Symposium of Radiation Chemistryが開催された。Tihany Symposiumはおおよそ4年に1度ハンガリーで行われる放射線化学の国際会議である。1962年に第1回目が開催され、今回で13回目の開催となった。バラトンアルマーディはハンガリー西部にあるバラトン湖の北岸に位置し、首都ブダペストからバスで1時間半程かけて移動した。会期中は天候にも恵まれ、気候も穏やかで大変過ごしやすかった。料理もおいしく、特にスープの種類が豊富で、毎食違った味のスープを楽しむことができた。ハンガリー料理のレシピをもらったので、機会があればハンガリー料理に挑戦してみようと思う。

会議にはヨーロッパ諸国を中心に世界各国から約150人が参加し、日本からは筆者を含め6名が参加した。参加者は皆、学会会場であるラマダホテルに宿泊し、朝から夕方まで行われたセッションに参加した。ラマダホテルはバラトン湖のすぐ近くにあり、空き時間にはバラトン湖の周辺を散策することができた。湖にはヨットや船が何隻も見られ、湖水浴を楽しんでいる人たちもいた。夜には湖岸のバーでお酒を飲むこともでき、夕食の後には参加者同士で度々飲み会が開かれていた。

セッションでは16件の招待講演と51件の口頭発表があった。放射線化学のベースとなる基礎研究から、放射線によるナノ粒子合成やグラフト重合、食品照射、原子炉や医療分野への応用など、様々な研究発表があり、放射線化学の裾野の広さを感じた。また、放射線化学を環境問題やエネルギー問題にどのように応用していくか、といった内容の発表もあり、今後の放射線化学の展望について議論が交わされていた。4日目の夜にはポスターセッションが行われ、68件のポスター発表があった(写真1)。会場では活発な議論が行われ、筆者もパルスラジオリシス法により研究したドデカンの放射線分解過程について発表を行い、LaVerne先生、Ulanski先生、Feldman先生といった著名な先生方と議論することができた。発表に対する質疑応答だけでなく、今後の実験についてのアドバイスや参考にすべき論文なども教えていただいた。ポスターセッションが2時間だけだったので、他の人の発表を聴く時間があまりとれなかったのが残念であった。



写真1. ポスター発表の様子。

5日目午後のエクスカージョンでは、学会名の由来にもなっているティハニ半島を訪れた。バラトン湖が眺望できる丘の上にある修道院教会を見学し、ハンガリーの歴史に触れた(写真2)。その後は周辺を自由に散策し、カフェでコーヒーを飲んだり、お店で買い物をしたりして楽しんだ。ラベンダー畑が有名らしく、道路の脇にもラベンダーが植えられているのを見かけた。ティハニ半島からの帰路は船で移動し、船上でワインを堪能した。



写真2. エクスカージョンの様子。

6日間の会議を通じて、多くの海外の研究者と話をすることができ、大変勉強になった。特に、ヨーロッパ諸国からは学生の参加も多く、同年代の他国の研究者と議論できたことは非常に有意義であったと感じている。また、異国の文化に触れることもでき、大変良い経験になった。

(大阪大学産業科学研究所 西井 聡志)

環太平洋国際化学会議 (Pacifichem 2015) 参加報告

環太平洋国際化学会議 2015 (The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015)) は、日本・アメリカ・カナダ・ニュージーランド・オーストラリア・韓国・中国の7化学会の主催で、2015年12月15日-20日の6日間、ハワイのホノルルで開催されました。5年に1度の開催ということもあり、会場には1万5000人も研究者や学生が集い、化学全般における基礎から応用までの幅広い研究開発について議論することを目的としています。主な発表会場は、ハワイ・コンベンション・センター、ヒルトンハワイアンビレッジ、シェラトンワイキキ等、ワイキキ周辺に点在しており、会議中は参加バッチの提示により、会場間をシャトルバスで移動することができました。開催中の6日間は、天気も快晴が続き、気温も30度前後と安定していたので、快適に過ごすことができました。

会議における発表は、大きく11のテーマ“Analytical”, “Inorganic”, “Macromolecular”, “Organic”, “Physical, Theoretical & Computational”, “Agrochemistry, Environmental & Geochemistry”, “Biological”, “Materials & Nanoscience”, “Chemistry of Clean Energy Conversion, Storage & Production”, “Bench to Bedside: Chemistry of Health Care”, “Connecting Chemistry to Society”に分類されており、口頭発表は8時-21時まで、ポスター発表は10時-12時、19時-21時の2部構成として、多数の発表が同時開催されていました。また、多くの企業ブースや招待・特別講演も散見されました。

筆者は、17日夜に Materials & Nanoscience 分野にて“Synthesis, characterization, and alkaline stabilities of graft-type anion conducting electrolyte membranes containing Poly(4-vinylimidazolium) grafts and application to alkaline fuel cells” (発表番号 1441) というタイトルで、アルカリ燃料電池自動車用の電解質膜の合成及び特性評価に関する発表を行いました。アニオン電解質膜の合成が世界中で多く行われているためか、足を止めて頂けることが多く、興味をもった方からは「自分の知らない方法で合成していたので勉強になった」、「工業的にはどのような方法で合成できるのか」、「今後どのように展開していくか」など多数のコメントをいただき、今後研究を進めていく上で貴重な意見となりました。筆者は、初めての国際会議への参加であり、緊張はしましたが、研究内容をしっかりと伝えることができ、とても有意義な議論ができました。

ポスター会場内は、日本の学会では考えられないくらいの広さがあり、研究者らによるオーケストラの演奏があるなど非常に楽しいイベントもありました。参加証に付属していたチケットとの交換でビールやワイン等のアルコールが手に入ることから、初めての会話からでも気さくに議論を楽しむ姿が多く見られ、会場内は非常に賑わっていました。筆者自身に近い研究分野で見聞きした範囲では、親水性・疎水性高分子、無機-有機ハイブリッド材料等に関する研究が目を引きましたが、世界各国で如何に多種多様な研究が行われているかを肌身で感じ、また様々な国の研究者や学生と間近で接することができ、知見を広げる非常に良い機会となりました。

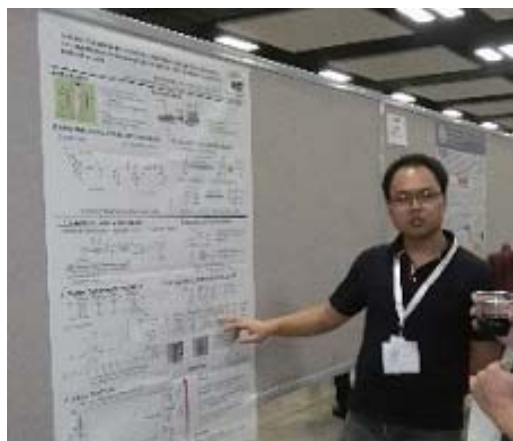


写真 1. ポスター発表時の様子。



写真 2. ダイヤモンドヘッドから撮影。

(埼玉工業大学大学院 渡邊 俊)

TSRP-APSRC-2016 参加報告

2016年1月5日-9日にインド・ムンバイの Bhabha Atomic Research Centre (BARC) にて開催された The 13th Biennial Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry and the 6th Asia-Pacific Symposium on Radiation Chemistry (TSRP-APSRC-2016) に参加したので、報告する。本会議は BARC とインドの放射線化学・光化学会 (Indian Society for Radiation and Photochemical Sciences (ISRAPS)) との共催によるものである。アジアと冠しているが、アジアからの参加者のほとんどは日本人で、他は韓国人の招待講演が1件あった程度であった。APSRC は2006年の中国開催からスタートし、2年ごとに日本、インドと開催地を回しながら行われ、今回が第6回目である。TSRP も2年ごとに開催されており、今回は2010年以來の同時開催となる。

筆者は2014年の前回の TSRP で初めてインドの地を踏み、昨年度は研究打合せと研究所見学でも訪れたため、今回で3年連続3回目の訪印となる。ちなみに全てムンバイの BARC を訪れており、ホテルも同じである。

学会会場 (写真1参照) は2014年と同じであるが、天井がきれいに塗られ、また周囲を埋め尽くす家庭用エアコンが全て新品に替わり、さらに前回何度もみられた会場内の小動物 (リス?) の姿も見ることがなかった。



写真 1. 学会会場内部。エアコンが新品になった!

本学会の内容は光化学と放射線化学に大別され、一部の時間帯ではパラレルセッション形式で発表が進められた。大体 1/4 が放射線化学関連の発表であった。口頭発表は全て招待講演であり、約 60 件ほどの発表がなされた。またポスター発表 (写真2参照) では、

光化学で約 150 件、放射線化学で約 50 件程度の発表が2日間にわけて開催された。筆者の共同研究者で日本に一時派遣されていたインド人学生もポスター発表をしており、彼らとの再会を祝すこともできた。インドらしいといえいいのか、受付時にももらったプログラムと概要集記載のものとでかなりの違いがあり困惑したが、さらに開催中にもプログラムの変更が参加者へのアナウンスもほとんどなく行われるなど、非常に柔軟(?)な運営がなされていた。

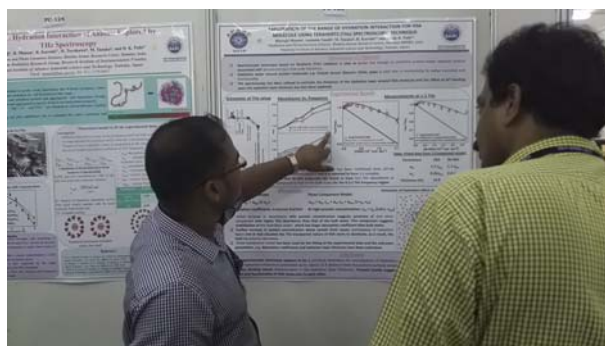


写真 2. ポスター発表の雰囲気。発表者は筆者の共同研究者である M. Biswajit 氏。

多くの発表の中で、パルスラジオリスや短パルスレーザーによる時分割赤外分光、時分割テラヘルツ分光などに興味を持った。特にテラヘルツ分光は筆者も最近研究を始めた分野でもあり、今後の発展が期待される。またタンパク質を扱った研究も散見された。



写真 3. 夕食会場の雰囲気。お酒は飲めないが、非常においしいインド料理がビュッフェ形式で振る舞われた。

本会議では全ての日で夕食が振る舞われた。夕食会場は写真3のように屋外にあり、インドらしい装飾がなされていた。品数の多さや会場の広さなど、お酒が飲めない以外はバンケットよりも良いのではないかと感じたほどである。なおベジタリアン向けのカレーをなるべく選択すれば、それほどスパイスは効いていないことを今回の訪問で発見した。

エクスカージョンではムンバイ湾に浮かぶエレファンタ島ツアーが企画され、筆者も参加させていただいた。ムンバイは3回目だが、初のエレファンタ島訪問である。エレファンタ島にはヒンドゥー教の三大神のひとりであるシヴァの多数の彫刻が立ち並ぶ石窟寺院がある。この彫刻群は1000年以上前に製作されたもので、現在は世界遺産に指定されている。



写真 4. 石窟寺院の入口。



写真 5. 石窟寺院の内部での現副会長の御二方。

1時間ほど船に揺られてたどり着いた島で我々をまず迎えてくれたのは、多数の野良牛、野良犬、野良猿であった。特に牛はなかなかの迫力であり、ただでさえ狭い道をさえぎるようにたたずんでいた。無論足元は牛の糞だらけであった。左右に土産物屋が立ち並ぶ階段が続く参道を500mほど歩き、ようやく石窟寺院の入口にたどり着いた。石窟寺院には、一部欠けているものの、巨大かつ多くのシヴァ神の彫刻が保存されており、我々の目を楽しませてくれた。石窟寺院から再び船着き場に戻ると、美しいインドの夕焼け空が牛の群れですさんだ心を癒してくれた。

その後、バスでバンケット会場に向かったが、すでにバンケットは始まっており、宴半ばの状態であった。前のTSRPでもそうだったが、普通は挨拶等が行われてバンケットが始まるが、ここでは何もいわずに始まり、黙々とご飯を食べて、流れ解散で終わる。これはお国柄なのだろうか・・・

最終日にインド特有の大渋滞の中、新しくなったムンバイ国際空港までたどり着き、インドを後にした。インドから帰ってきていつも思うのは、日本は恵まれたよい国だなあということである。これを実感するために、インドを訪問しているのではないかとすら思っている。まだインド未経験の方は、ぜひ2年後のTSRPを機に訪れてみてはいかがでしょうか。



写真 7. エレファンタ島の夕焼け。



写真 8. バンケット会場の様子。インド人参加者と談笑する若手たち。

(産業技術総合研究所 田中 真人)



写真 6. 安芸の宮島の鹿の如く見渡すかぎりの牛。

ICRR 2015 報告

平成 27 年 5 月 25 日-29 日に ICRR 2015 (15th International Congress of Radiation Research) が日本で開催されたことに伴い、日本放射線化学会 (JSRC) は秋に行われる「放射線化学討論会」を ICRR 2015 に合流して開催した。本来、放射線化学討論会は日本語で行われる国内会議であるが、本年は国際会議として開催されたことで、若手・大学院生等にとって、英語での発表等非常に貴重な機会となった。



写真 1. 5 月 26 日に開催された International Research Cooperation Network Meeting for Radiation Chemistry の様子。

JSRC としては、会議 2 日目 (5 月 26 日 12:00-13:00 Room C-1) に、“International Research Cooperation Network Meeting for Radiation Chemistry” を開催した (写真 1)。これは、国際研究ネットワークを構築する目的で、日本在住の外国人研究者や留学生との交流を深めるために、日本放射線化学会の国際交流委員会が毎年主催しているもので、今回は、ICRR 2015 に日程を合わせたため多くの外国人研究者の参加を得られた。内容としては、JSRC による国際交流の取り組みや、海

外会員制度の紹介を行ったほか、海外からの研究者の協力を得て、今後開催予定の 5 件の国際会議のアナウンス等を行い、参加を呼びかけた。

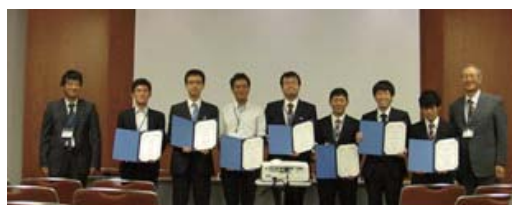


写真 2. 5 月 27 日に開催された JSRC Young Scientist Award for ICRR 2015 の授賞式の様子。

3 日目 (5 月 27 日 11:10-12:00 Room C-1) には、“JSRC Young Scientist Award Ceremony for 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015)” を開催した (写真 2)。JSRC は、今回の ICRR 2015 に若手研究者・大学院生が積極的に参加できるよう、本会とは別に、“JSRC Young Scientist Award” を設け、サポートを行った。当日は 10 名の受賞者 (ICRR 2015 の “Young Investigators Travel Award” 受賞者 2 名を含む) には、賞状と副賞が贈られた。なお、3 日目の夜に行われた “Get Together for Young Investigators at ICRR 2015” には、受賞者を含め JSRC 関係の多くの若手研究者・大学院生が参加し、海外著名研究者や分野の異なる研究者との交流や、魅力あるアトラクションや食事を楽しんだ。

(国際交流委員会 前委員長 吉田 陽一)

日本原子力学会 2015 年秋の大会 参加報告

平成 27 年 9 月 9 日-11 日に静岡大学の静岡キャンパスにて開催された日本原子力学会 2015 年秋の大会に参加したので報告する。

この学会は一般社団法人日本原子力学会により年に 2 度開催されている原子力・放射線・再処理・環境科学などに関する会議であり、今回の総発表件数は 766 件であった。発表は総論、放射線工学と加速器・ビーム

科学、核分裂工学、核燃料サイクルと材料、核融合工学、保健物理と環境科学という 6 つの区分に分かれており、原子力に関する多岐にわたる研究の発表が各々教室において行われた。筆者が出席した加速器・ビーム科学部会での講演等に関して以下に報告すると、例年通り、加速器・ビーム科学部会は会期中 3 日間の内の 2 日間 (9/10-9/11) で開催され、加速器・ビーム加

速技術からビーム利用・ターゲットに至るまで、30件の発表報告がなされた。

初日(9/10)のセッションは14時40分から18時15分の間で、2日目(9/11)は9時30分から16時30分の間で催され、加速器・ビーム科学部会全体会議と加速器・ビーム科学部会セッションは2日目に行われた。

初日の一般講演は「加速器・ビーム加速技術」「ビーム利用」「ビーム利用・ターゲット」に関する内容について報告があった。電子加速器・電子銃のセッションでは、UVSOR-IIIにおけるファイバーレーザーを用いたレーザコンプトン散乱ガンマ線源の特性評価、超短電子ビームの発生や計測に関する講演がなされた。パルスラジオリシスのセッションにおいては、ドデカンや水、アルコール中での電子の挙動、フッ素樹脂の放射線化学反応などの解明を行う研究、また、更なる高時間分解能パルスラジオリシス測定装置の開発に関する講演が行われた。

2日目の加速器・ビーム科学部会のセッション「電子線加速器による放射線化学・原子力水科学研究の展

望」では、高木純一先生(株式会社東芝)から「福島廃止措置、プラント再稼働に向けての水化学の取り組み」と題して福島廃止措置、プラント再稼働に向けて、水化学の果たすべき役割が話され、勝村庸介先生(日本アイソトープ協会)からは「パルスラジオリシスによる高温溶媒の放射線分解」、吉田陽一先生(阪大産研)から「フェムト秒パルスラジオリシスによる放射線化学初期過程」、そして、渡辺立子先生(原子力機構)から「がん治療のための放射線物理化学生物シミュレーション」についてご講演いただいた。放射線化学の原子力分野や放射線治療における重要性について丁寧にご解説いただき、筆者にとっても改めて認識・勉強する機会になった。

今回、日本原子力学会「2015年秋の大会」にて、加速器・ビーム科学に関する多くの公演を拝聴し、筆者としては極めて学ぶことの多い2日間であった。最後に日本原子力学会の関係各位に感謝申し上げ、本文の結びとさせていただきます。

(大阪大学産業科学研究所 山唄 優)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」 参加報告(1)

2015年度の放射線化学若手の会夏の学校は9月29日から10月1日にかけての3日間、静岡県浜松市のかんざんじ荘で行われました。本年は放射線化学討論会が開催されなかったため、先端放射線化学シンポジウムと合同で行われました。会の運営は、東北大学浅井研究室が担当されました。本会では、放射線化学を扱っている4大学の教員や学生をはじめ、研究所や企業の方々も参加する非常に大きな会となり、様々な講演やポスター発表、世代の垣根を超えた懇親会などを通じて、普段自分の研究分野で狭くなりがちな視野を大きく広げる素晴らしい機会となりました。今回の夏の学校の特別講演は、原子力機構の田口光正先生と藤井健太郎先生が行って下さりました。お二方には、主に放射線加工技術の医療分野への応用と、生体への放射線照射によるDNA損傷についてご講演頂きました。

1日目は、早稲田大学の鷲尾方一先生による開会の挨拶のもと、開会式が開かれ、その後各研究室の代表による恒例の研究室紹介を行いました。そこでは、それぞれの特色が現れた発表が続き、時にはユーモアを交えながら研究概要や研究生活などの説明が行われました。また同時に、研究所や企業による研究紹介も行われました。その後の1日目のポスターセッションでは、10名による発表が行われ、学生や先生、研究所の方々とも隔たりなく、時間一杯まで参加者同士の熱い議論が交わされました。セッション終了後の夕食では、今後の放射線化学会の発展と研究の進展を願って乾杯が行われた後、お互いの研究状況や、今後の進路などについて夜遅くまで語り合い、親睦を深めました。

2日目は、午前中に特別講演をお聞きしました。田口光正先生にはゲル線量計の開発と医療への応用についてご講演頂きました。放射線治療において2次的な発がんリスクの減少には、患部周辺の正常な細胞

に照射しない事が望まれますが、従来の線量計では複雑な線量分布が確認出来ません。そこで、3次元の線量を測定可能にする新規なゲル線量計の作成に取り組み、その評価についてお話頂きました。照射前後のゲル線量計を用いた実演もあり、生体親和性材料に関して理解を深める事が出来ました。続いて、藤井健太郎先生には、放射線照射による生体への影響についてご講演頂きました。DNA 損傷の生成初期過程や DNA 損傷を修復するタンパクの作用過程、円二色性スペクトル測定の結果などの興味深い話を聞かせて頂きました。参加者は普段とは異なる分野のご講演に熱心に耳を傾けておりました。その後、昼食をはさんで東北大学の岡先生による受賞講演、2日目のポスターセッションへと入りました。2日目は9件の発表があり、1日目と同様に熱い議論が交わされました。セッション終了後の自由時間では、学生同士で連れ添い浜名湖の湖畔まで散策し、親睦を深めました。

最終日は先生方による4件の口頭発表が行われました。いずれも非常に興味深い発表が行われ、活発な議論が繰り広げられました。最後に、閉会の挨拶とポス

ター賞の表彰が行われました。ポスター賞は大阪大学の西井聡志君の「パルスラジオリシス法によるドデカンの放射線分解過程の研究」、東北大学の黒田勇樹君の「 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ および $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ への γ 線照射による磁気特性変化の誘起」、そして筆者の「高温パルスラジオリシス法による *n*-プロパノール中溶媒和電子の研究」が受賞しました。以上で先端放射線化学シンポジウムおよび放射線化学夏の学校の全日程を終えました。当会の運営においてご尽力頂いた、東北大学の越水正典先生と、浅井研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。また、ご多忙中、ご講演頂きました田口光正先生と藤井健太郎先生に深く感謝致します。今年度は、先端放射線化学シンポジウムと合同開催という事もあり、非常に多くの方々が参加し、大変活発な議論および交流の出来る有意義な会となりました。最後に、次年度の若手の会の運営は当研究室が行う事となりましたが、今年参加が叶わなかった大学の方々にも是非参加して頂き、より活発な若手の会の運営を行えるよう努めて参る所存であります。

(大阪大学産業科学研究所 吉田 哲郎)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」 参加報告 (2)

平成 27 年 9 月 29 日から 10 月 1 日の 3 日間、静岡県浜松市の浜名湖かんざんじ荘にて先端放射線化学シンポジウムおよび放射線化学夏の学校が開催された。

早稲田大の鷲尾先生の開会挨拶の後、夏の学校の恒例行事となっている研究室紹介が行われた。今回は大学だけでなく、企業や研究所の方の参加も多かったため、普段あまり聞くことのできない社会人としての研学生活についてのお話を伺うことができた。

3日間のセッションでは、口頭講演とポスターセッションに加え、夏の学校の講義としての特別講演および放射線化学賞の受賞講演が行われた。特別講演では、原子力機構の田口先生と藤井先生にご講演いただいた。田口先生からは、放射線照射により加工した機能性高分子材料や医療現場での利用を目的とした 3D ゲル線量計についてのご講演があった。放射線照射により形状記憶性能を持たせた樹脂をご紹介していただ



写真 1. 浜名湖を背景に記念写真。

き、実際にお湯に浸して引っ張ることで形が変わり、室温に戻すと固まり、再びお湯に浸すと元の形状に戻るといった様子を見せていただいた。この樹脂が学校での放射線教育に利用されているということで、非常に聴講者の興味を惹きつけていた。藤井先生からは、放射光を利用した DNA 損傷過程の研究についてのご

講演があった。次世代放射光といった最新のトピックスについてもお話いただき、放射光についてあまり知識のない筆者にとっても非常にわかりやすくご講演していただいた。受賞講演では、東北大学の岡先生より、放射線照射による DNA 損傷機構の新たなプロセスについてのご講演があり、非常に興味深く拝聴させていただいた。

今回は先端放射線化学シンポジウムと夏の学校の合同開催ということもあり、学生とベテランの先生方

とで活発な議論ができた。また、会場となったかんざんじ荘からは浜名湖が一望でき、料理やお風呂なども大変充実していた。夜の飲み会では世代を超えて交流を深めることができ、非常に実りある会になったことと思う。今後もこのような会が続いていくことを切に願う。

最後に、今回のシンポジウム開催にご尽力されました関係者の皆様に深く感謝申し上げ、結びとしたい。

(大阪大学産業科学研究所 西井 聡志)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」 参加報告 (3)

SARAC2015 および、放射線化学夏の学校は平成 27 年 9 月 29 日-10 月 1 日の 3 日間の日程で静岡県浜松市のかんざんじ荘にて開催されました。会の運営は筆者の所属する研究室でもある東北大学の浅井研究室が担当しました。

初日となる 29 日は 14 時より早稲田大学の鷲尾先生による開会挨拶ののち、夏の学校の恒例イベントでもある各研究室の代表者による研究室紹介が行われました。ときおり笑い声上がるなどとても和やかな雰囲気なかで非常にユニークな発表が続きました。15 時からはポスターセッションが行われ、10 件の発表があり、参加者同士の熱い議論が交わされました。18 時からは夕食をとり、その後はお酒を飲みながら学生と先生方の壁もなく、お互いの研究内容や将来の展望などを語り合い、参加者同士の親睦を深めることができました。

2 日目の午前中は特別講演として 2 件の講義を原子力機構の田口先生および、藤井先生にいただきました。田口先生の講演では「放射線加工技術を駆使した生態親和性材料の医療への応用」と題してお話していただき、藤井先生の講演では「放射光を用いた放射線生物研究」と題してお話していただきました。どちらの講演も非常にわかりやすく、放射線の医療分野への応用について学ぶことができました。昼食を摂った後は東北大学の岡先生による受賞講演が行われ、「放射線による新しい DNA 損傷機構の提案」題してお話していただきました。どの講演においても参加者は

熱心に聞き入っており、質疑応答も活発に行われ議題についての理解を高めることができました。その後は 2 回目のポスターセッションが行われ、9 件の発表があり、筆者も「 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ および $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ への γ 線照射による磁気特性変化の誘起」と題して発表させていただきました。初日と同様、2 日目のポスターセッションも時間いっぱい参加者同士の議論が交わされました。夕方には自由時間があり、周辺散策など各々時間を過ごしました。夜はお酒を飲みながら夕食をとり、その後は夜遅くまで学生や先生方も含めて語り、1 日目以上に参加者同士の親睦を深めることができました。

最終日は午前中に 4 件の口頭講演を講師の先生方にさせていただきました。「ピコ秒パルスプローブによる高温高压流体の放射線誘起高速反応研究」について阪大産研の室屋先生、「塩化物イオン水溶液の放射線化学反応」について東大の山下先生、「有機ゲル化剤を含まないナノコンポジットフリッケル線量計」について理研の前山先生、「イオン流体中のポジトロニウム形成時のサブナノバブル振動の温度依存性」について原子力機構の平出先生からそれぞれ報告がありました。その後は若手ポスター賞の表彰があり、阪大産研の吉田哲郎さん「高温パルスラジオリシス法による *n*-プロパノール中溶媒和電子の研究」、阪大産研の西井聡志さん「パルスラジオリシス法によるドデカンの放射線分解過程の研究」と筆者の「 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ および $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ への γ 線照射による磁気特性変化の誘

起」が受賞しました。閉会挨拶の後、集合写真をとり、SARAC2015 および放射線化学夏の学校の全プログラムが終了しました。

筆者の研究生生活が始まってからまだ数ヶ月の時期にこのように様々な分野の研究をなさっている他大学の学生らと討論したこと、先生方からの筆者の研究に対

するアドバイスを頂いたことは今後の研究生生活を送る上で大いに役立つと思う。このような有意義な時間を過ごす機会を与えてくださった多くの先生方、学生方に深く感謝したい。

(東北大学 黒田 勇樹)

SARAC2015 および放射線化学若手の会「夏の学校」 報告

2015年9月29日-10月1日の3日間、SARAC2015 および放射線化学夏の学校を開催した。放射線化学討論会が、5月に開催されたICRRと同時に開催となったため、SARAC2015を秋季に開催した。夏の学校については、2015年度には東北大学の浅井研究室が担当となっており、また筆者も企画委員を仰せつかっている。そのため、両者を同時開催することとした。参加者数は43名と、夏の学校としては大所帯となり、例年の放射線化学討論会を小ぶりにしたような形での開催となった。当初、開催場所として想定していたのは箱根であった。しかしながら、噴火警戒レベルが3へと引き上げられたため、参加者からの不安の声に配慮し、開催場所を再度検討した。参加者の多くが関東と関西在住であることを考慮し、静岡県浜松市のかんざんじ荘にて開催することとした。また、大学での冬学期へと一部重複する日程となったが、これは、5連休(シルバーウィーク)などのため、開催日程が限定的であったためである。しかしながら、参加者の方々には、講義日程の調整などのご不便があったかと思う。ここにお詫び申し上げたい。特に、講師としてご講演いただいた田口先生と藤井先生、また受賞講演をしていただいた岡先生には、非常にタイトな日程にもかかわらずご参加いただき、深く感謝申し上げます。

例年の夏の学校では、講師以外に参加するスタッフの数はそれほど多くない。SARAC2015との同時開催により、参加者の年齢層の幅が広がり、学生にとってもより貴重な経験となると考えた。実際に、ポスターセッションにおいても、発表者の学生が多くのスタッフから質問を受けており、同時開催という試みの一端

は成功したと思う。例年の夏の学校と比較すると、学生参加者によるポスターセッションと、講師の先生方からのご講演については、例年通りの企画とした。一方で、一般参加者(スタッフ)の口頭発表やポスター発表の機会も設け、スタッフと学生とがより渾然となった会を目指した。ただし、優秀ポスター賞については、学生のみを対象とした審査を行った。例年の夏の学校と異なるのは、参加者層以外にも、受賞講演や総会、あるいは理事会が会期中に開催された点である。これは、5月のICRRと放射線化学討論会とが同時開催であったため、秋季に行うべきイベントをSARAC2015で開催したためである。今年度の受賞者が、夏の学校と関係の深い岡先生であったことは、きっと何かの縁であろう。また、例年の夏の学校で行われる研究室紹介に加え、研究所や企業からも紹介をしていただいた。放射線化学に関連する研究所や企業の活動の一端をご紹介いただけたことは、学生の皆さんにとって有意義であったと思う。

筆者自身、開催前は、例年のないイベントのため、参加者数も読めず、また地元でない場所での開催であったため、開催場所にも疎く、不安なことの多い開催であった。しかし、参加者の皆さんのおかげで、盛況に終わったことに安堵している。実は、筆者は2日目の夕方から放射光ビームタイムのため開催場所を離れてしまい、3日目の集合写真に写っていないという体たらくである……。それでも何とか成功裏に終わったのは、ひとえに皆様のおかげだと感謝申し上げます。

(東北大学 越水 正典)

第 10 回高崎量子応用研究シンポジウム参加報告

群馬県高崎市にある高崎シティーギャラリーにて例年開催されてきた高崎量子応用研究シンポジウムは、2015 年 4 月高崎量子応用研究所内に新たに完成した総合管理棟に会場を移し、2015 年 10 月 8 日、9 日の 2 日間にわたって開催されました。高崎駅の近くに位置する高崎シティーギャラリーに対し、高崎量子応用研究所は高崎駅からやや距離があるため、足が遠くのではないかとという予想もありましたが、口頭発表が 17 件、ポスター発表が 146 件と、例年同様、多くの方の参加となりました。

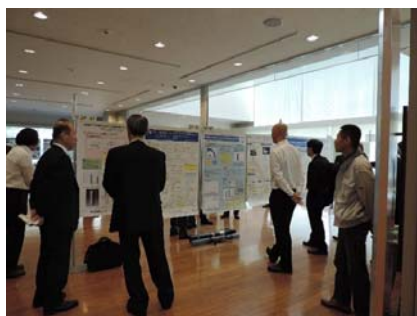


写真 1. ポスター会場の様子。

今回で 10 回目となるシンポジウムは、原子力機構の田島保英理事及び文部科学省量子放射線研究推進室の上田光幸室長の挨拶によって幕を開け、続いて医療応用・バイオ技術の口頭セッションが行われました。「高速中性子による医療用放射性同位元素の合成」、「DNA 損傷の微視的分布の観測」、「線虫の運動機能に対する放射線影響」、「PETIS (positron-emitting tracer imaging system) によるヨシ根内の Na 輸送の可視化」の 4 件の発表があり、放射線の生物への多様な影響を活かした興味深い内容でした。発表者 4 人のうち 2 人が女性ということで、女性研究者の活躍を頼もしく感じるセッションでもありました。昼食をはさみ、午後の部では東京大学大学院の上坂充先生による「小型モバイル加速器開発と医療・産業社会インフラ診断応用」と題した特別講演があり、加速器の小型化がもたらす応用展開の大きな可能性を垣間見ました。次いで行われた先端材料・計測・基盤技術の口頭セッションにおける 3 件の発表「サイクロトロンにおける大面積均一ビーム形成技術の開発」、「放射線治療用三次元ポリマーゲル線量計の開発」、「イオンビーム照射で導入された原子空孔に由来する強磁性効果～スピン偏極陽電子ビームで解明～」も、多彩な量子ビームが応用につながる

興味深い研究内容でした。その後、ベンチャー棟 1F 大会議室に会場を移し、医療応用・バイオ技術・先端材料・計測・基盤技術分野のポスターセッションが行われ、たくさんの方で賑わいました。1 日目の最後は、研究所に隣接する国際交流会館にて懇親会が催され、例年とは一味違うアットホームな雰囲気の中で、参加者の交流が深められたのではないかと感じました。

日付をまたぎ、2 日目は宇宙・エネルギーのセッションから始まり、続く環境・資源・高機能材料のセッションとあわせて 5 件の発表がありました。「磁気トンネル接合素子に対する放射線照射効果の実測評価」、「放射線グラフト重合法による多孔膜のナノ細孔制御」、「リン及びホウ素をイオン注入したシリコンナノ結晶の発光特性」、「硝酸イオンを高速度で選択的に吸着するアニオン交換繊維の開発」、「バイオディーゼル用グラフト触媒の開発」と、幅広い分野に量子ビーム利用のひろがりを感じました。昼食後に行われたポスターセッションは、宇宙・原子力・エネルギー・環境・資源・高機能材料をテーマに行われ、1 日目と同様、活気に満ち溢れる会場となりました。筆者は、本セッションにてグラフト繊維捕集材を用いたヒ素吸着選択性の評価について発表し、日常考えていることと異なる観点の議論から様々学ぶことができました。



写真 2. 高崎量子応用研究所 総合管理棟。

最後に高崎研の施設共用に関するセッションの後、玉田所長の挨拶をもって 2 日間にわたるシンポジウムの幕が下りました。高崎量子応用研究所自慢の銀杏並木が色づく季節には少し早かったのが、唯一残念ではありましたが、緑あふれる自然豊かな場所で先端技術の発表を聞くことで、知識を得ると共に、心が和む一時を過ごすことができたのではないのでしょうか。個人的にも有意義な時間を過ごすことができ、大変満足のいく 2 日間でした。

(量子科学技術研究開発機構 天田 春代)

放射線化学賞の選考結果について

2014年度の応募は1件のみであり、柴田裕実（委員長）、簗野嘉彦、中川和道の3名が選考に当たった。選考の過程では授賞の基準について議論があり、以前新制度移行に向けて議論された通り、対象となる論文を中心に審査し、選考委員全員の一致をもって理事会への推薦とすることとした。対象とされた論文を中心に関連論文や口頭発表について精査した結果、選考委員全員が放射線化学賞にふさわしい成果であるとの結論を得たので、以下の応募者を理事会に推薦することとした。

■岡 壽崇（おかとしたか）氏

「放射線による新しいDNA損傷機構の提案」

対象論文：“Unpaired Electron Species in Thin Films of Calf-Thymus DNA Molecules Induced by Nitrogen and Oxygen K-Shell Photoabsorption”, T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, M. Ukai, *Physical Review Letters* **109**, 213001 (2012)

推薦理由：これまで放射線によるDNA損傷誘発の原因の1つとしてDNAに対するOHラジカル反応または解離性電子付着が提案されてきたが、岡氏はDNAを構成する窒素原子および酸素原子に着目して、シンクロトン放射によるこれらの内殻電離に伴うラジカル生成の測定をビームライン上で組み合わせたESR装置で行い、特に電離しきい値近傍で損傷前駆体の1つであるDNAに起因するラジカルの収量が異常に増大することを見いだした。

この現象を理解するため、内殻電離しきい値近傍での光電子とオージェ電子の振る舞いに注目し、原子・分子の電離に伴う現象として見出されている衝突後相互作用（PCI：Post Collision Interaction）の考えを取り入れることで、今回の実験で見出されたラジカル収量

の異常増大を説明した。以上の実験結果とその解釈は *Phys. Rev. Lett.* **109**, 213001 (2012) に掲載されている。解釈に際しPCI効果についての数値計算を行い、図に載せているが、図の描き方が的確でなく、また説明も不足している点が選考に当たって問題となったが、応募の際に添付された業績リストにある関連論文中のひとつ（原子衝突学会誌2014年第11巻第2号33ページ）の中に、この図とその説明が見出され、この問題を解決することができた。

しかしPCI効果が起こっている直接の証拠は得られてはいない点、およびPCI効果に基づく再結合過程とgeminate再結合の違いがどこにあるのか、また、両者の関連性の有無などが不明確である点が問題となった。

本研究は放射線研究の立場から重要なDNA損傷機構に関して新しい実験が行われ、その結果の考察から新しい損傷機構が提案されたものである。放射線と物質の相互作用に基づいた物質の電離現象全体から見ると、内殻電離の寄与は相対的に少ない。しかしながら、本論文は放射線作用の初期過程について重要な知見を与えるものであり、放射線の生物学研究のみならず放射線化学の基礎過程における初期電離過程の機構とgeminate再結合の機構に関する研究に対して新風を吹き込んだことは高く評価されるので、放射線化学賞に値すると考えられる。

選考委員会としては、応募者に対し今回の対象論文のような速報でなく、全体をまとめた原著論文を執筆されることを望む。また、放射線化学の分野で、この新しい実績とアイデアを生かした研究を行い今後の大きな展開を目指すことを期待する。

(2014年度選考委員会 柴田 裕実)

第 59 回放射線化学討論会のお知らせ

■日程

平成 28 年 9 月 20 日 (火) -22 日 (木)

■場所

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所
群馬県高崎市綿貫町 1233

<http://www.taka.qst.go.jp/>

口頭発表：総合管理棟 3 階 多目的ホール

ポスター：生命科学研究棟 1 階 ロビー & 大会議室

■主催

日本放射線化学会

■共催

日本化学会

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

■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おり、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、応用およ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、デバイス物理など、放射線化学との境界領域を含むものとします。

■申し込み方法・期日

公式ホームページよりお申し込みください。

<http://www.taka.qst.go.jp/information/jsrc2016/index.htm>

- 参加申込
平成 28 年 6 月 20 日 (月) -8 月 19 日 (金)
(以降は当日受付にて)
- 講演申込
平成 28 年 6 月 20 日 (月) -7 月 22 日 (金)
- 要旨集原稿受付
平成 28 年 6 月 20 日 (月) -7 月 22 日 (金)

■参加費 (講演要旨集代を含む)

一般 5,000 円 学生 3,000 円

■問い合わせ先

第 59 回放射線化学討論会事務局

E-mail : jsrc2016@qst.go.jp

詳細は公式ホームページ上にて順次更新いたします。

(量子科学技術研究開発機構 前川 康成)

本 会 記 事

第 103 回 日本放射線化学会 理事会議事録 (案)

日時 平成 27 年 9 月 29 日 (火) 16:00-

場所 浜名湖 かんざんじ荘 〒431-1202 静岡県浜松市
西区呉松町 1768-1

出席者 鷲尾会長, 小嶋, 熊谷, 中川 (清), 柴田, 田
中, 林, 平出 (事務局), 吉田

議題

1. 前回議事録 (案) の修正と確認 (事務局 平出)
参加登録費に関して, 「若手」を「学生」とする。
上記修正済みの前回の議事録 (別紙) は遺漏なく
確認された。

2. 平成 27 年度役員名簿 (案) (鷲尾会長)
平成 27 年役員名簿 (案) を確認した。役員
の去就 (案) についての説明があった。新任
役員については当人に依頼し, 当人が就任に
同意した場合, 就任するものとする。

3. 平成 27 年度賛助会員名簿および会員の
入退会に関して (事務局 平出)
賛助会員, 学生会員の入退会について報告
があった。名誉会員, 終身正会員のシステム
に関して議論された。会員の引退時 (現職の
退官等) に際して, 退会する方については名
誉会員, 終身正会員のシステムの説明を行
うこととする。

4. 会計に関して (事務局 平出)
会計監査を受けた旨, 報告があった。次年度
予算は, 例年どおりである。現状では毎年
約 30 万円の赤字となっている。

5. 事業状況 (事務局 平出)
SARAC (3 月 5 日), ICRR (5 月 25 日), SARAC
(9 月 29 日) 等の会議, 放射線化学会誌 99
号発刊, 放射線化学会誌 100 号発刊の事業
が行われた旨, 報告があった。現時点にお
いて, 以下の事業を予定している。

- 放射線化学討論会 (高崎)

- 26th IUPAC
- RadTech ASIA 2015 (会長次第)
- 第 10 回高崎量子応用研究シンポジウム
- SARAC
- 若手の会 (阪大産研 古澤研)
- 放射線化学会誌第 100 号発刊 (10 月)
- 放射線化学会誌第 101 号発刊 (4 月)

6. 入退会一覧 (事務局 平出)
入退会者一覧について確認した。

7. 会員について (事務局 平出)
終身正会員の覧 (12 名) が報告された。終
身正会員は, 会則により「会費免除」とし
て規定されている旨, 説明があった。

8. 国際文献社との契約に関して (事務局 平出)
「保管基本料の設定」について打診があ
った旨, 報告があった。ここで, 保管を依
頼しているものは古い年会の資料等であ
るが, 少量であるとの説明があった。「定
めのない作業に対する料金設定」につ
いて打診があった旨, 報告があった。こ
こで「定めのない作業」とは何かとの質
問が出たが, 現在まで当会ではそのよう
な作業は発生したことがない, との事務
局の回答であった。

9. 各委員会報告

- 企画委員会報告
討論会が 5 月の ICRR 2015 と合同開催
となったので, 秋の会合として先端放射
線化学シンポジウムを若手の会「夏の学
校」と合同で行った旨, 報告があった。参
加費に関して, 一般の参加費を 6,000 円
から 5,000 円へ, また, 学生の参加費を
3,000 円から 2,000 円へと値下げした
旨, 報告があった。
- 編集委員会報告

本 会 記 事

編集委員の交代の説明があった。9月30日付退任 木村 敦, 熊谷友多, 10月1日付就任 佐伯誠一, 甲斐健師。

放射線化学会誌 100号記念号に関して報告された。100号記念号は、10月31日発行見込、全体で96頁の予定。230部は会員全員(含む名誉会員)に1部ずつ配布する予定。賛助会員をいれた場合は250部程度となる。料金は300部刷る場合は25万円(半分カラー)で、送付に4万円かかる見通しである。何部刷ればよいか、たとえば300部でよいか、理事会に諮りたいとの質問があった。販売用として100部追加し、400部刷るとの報告があった。10月16日を締切として、広告を募集し、広告料を賛助会員、非賛助会員をわけて設定する旨、指示があった。

● 国際交流員会報告

別紙の通り、事業を行った旨、報告があった。ICRR 2015にて、若手の表彰および補助を行い、直後に阪大にてサテライトミーティングを行った。

10. 会則変更に関して(事務局 平出)

事務局の変更に関して、原子力機構・東海から大阪大学産業科学研究所へ変更する。会費の変更に関して、4,000円から5,000円へ変更する。規則変更の発効期日を修正(誤植の修正)した。会費の値上げにより、毎年の赤字額は30万円から15万円程度に緩和すると期待される。

11. その他

「若手の会」と通常の会議やシンポジウム等の何かとのジョイントを何年かに1回はあってもよいのではないかと(吉田副会長)

- 「若手の会」というよりは「夏の学校」という名称の方が来やすいのではないかと
- 若手メインの会として維持するのはよいが、会の名前から若手を外すのは如何なものかと(柴田理事)
- 若手の「上品さ」を叩き上げる事が大事ではなからうかと(鷲尾会長)

以上

本 会 記 事

平成 27 年度役員等名簿（平成 28 年 4 月 30 日現在）

会長	小嶋 拓治（量研機構・高崎）	
副会長	鷺尾 方一（早大理工研） 吉田 陽一（阪大産研）	平出 哲也（原子力機構・東海）
常任理事	錦見 敏朗（NHV コーポレーション） 河内 宣之（東工大理工） 丑田 公規（北里大理） 伊藤 賢志（産総研） 浅井 圭介（東北大院工）	辻 正治（九大炭素資源センター） 永石 隆二（原子力機構・東海） 真嶋 哲朗（阪大産研） 前川 康成（量研機構・高崎） 高橋 憲司（金沢大工）
理事	青木 康（住友重機械） 長島 章（放振協） 小泉 均（北大院工） 小嶋 崇夫（大阪府大） 工藤 久明（東大院工） 熊谷 純（名大） 鈴木 信三（京産大理） 関 修平（京大院工） 堀邊 英夫（大阪市大院工） 林 慎一郎（広島国際大） 田中 真人（産総研） 岡 壽崇（東北大高教機構） 古澤 孝弘（阪大産研）	砂川 武義（福井工大） 竹中 康之（北教大） 中村 一隆（東工大セラミック研） 中川 清子（都立産技研） 駒口 健治（広大院工） 藤原 邦夫（千葉大工） 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（極東産業） 田口 光正（量研機構・高崎） 越水 正典（東北大院工）
監事	勝村 庸介（日本アイソトープ協会）	平岡 賢三（山梨大工）
事務局	吉田 陽一（阪大産研）	楊 金峰（阪大産研）
顧問	佐藤 伸 田川 精一（阪大産研） 田畑 米穂（原子力システム研究懇話会） 市川 恒樹（北大院工）	篠野 嘉彦 濱 義昌（早大理工研） 南波 秀樹（放振協） 中川 和道（阪大産研）
名誉会員	今村 昌 団野 皓文	近藤 正春
編集委員会	委員長：平出 哲也（原子力機構・東海） 主任：山下 真一（東大） 越水 正典（東北大院工） 武井 太郎（岩崎電気） 菅 晃一（阪大産研） 藤井 健太郎（量研機構・東海）	甲斐 健師（原子力機構・東海） 端 邦樹（原子力機構・東海） 佐伯 誠一（量研機構・高崎） 田中 真人（産総研） 伊藤 賢志（産総研） 岡 壽崇（東北大高教機構）
企画委員会	委員長：浅井 圭介（東北大院工） 小泉 均（北大院工） 駒口 健治（広大院工） 砂川 武義（福井工大） 辻 正治（九大炭素資源センター） 楊 金峰（阪大産研）	青木 康（住友重機械） 越水 正典（東北大院工） 佐藤 哲也（山梨大） 田口 光正（量研機構・高崎） 室屋 裕佐（阪大産研）
国際交流委員会	委員長：鷺尾 方一（早大理工研） 室屋 裕佐（阪大産研） 田口 光正（量研機構・高崎）	泉 佳伸（福井大） 林 銘章（中国科技大） 楊 金峰（阪大産研）
推薦委員会	田川 精一（阪大産研） 立矢 正典（産総研） 南波 秀樹（放振協）	濱 義昌（早大理工研） 平岡 賢三（山梨大工） 柴田 裕実（阪大産研）

本 会 記 事

平成 27 年度会計中間報告（平成 28 年 3 月 14 日現在）

収入の部

(単位：円)

項目	27 年度予算案	27 年度中間	内容等
賛助会員 (14 社 37 口)	270,000	280,000	10,000 × 30 口 (15 社)
個人正会員 (210 名)	789,500	667,000	正会員 入金金額 601,500 学生会員 入金金額 1,500 会員数 (正：193 名 (終身会員を除く), 学生：8 名) 未納者 (正：58 名, 学生：7 名) 未納金額累積合計 501,500
学生会員 (8 名)			
要旨集 CD 販売	0		
広告収入費 (100 号記念誌)	0	169,892	9 社入金
雑収入 (利息等)	150,000	49,347	著作権料外 (国際文献)
		60	受取利息 (国際文献)
		17	口座利息
戻入金	0		
補助金	0		
積立基金からの繰り込み	0		
前年度繰越金	1,544,315	1,544,315	
合計	2,753,815	2,710,631	

支出の部

項目	27 年度予算案	27 年度中間	内容等
通信連絡費	20,000	21,895	資料送付・切手代
振込手数料		2,376	
事務委託費			(国際文献)
年間業務費	700,000	520,130	(2015/9-12) 438,340, (2015/11/5) 81,790
会誌刊行費			
原稿料	350,000	490,209	会誌印刷・発送業者委託料 (芳文社)
会議費	15,000		
放射線化学討論会援助	200,000		
先端放射線化学	100,000		
シンポジウム援助			
若手の会夏の学校援助	150,000		
学会賞	100,000		
企画委員会経費	75,000		
国際交流委員会経費	75,000		
編集委員会経費	200,000		
日本放射線研究連合負担金	50,000	50,000	
ホームページ運営費	65,000	4,838	
雑費		7,395	封筒作成 5,491, 新事務局口座開設費 1,904
予備費	200,000		
小計	2,300,000	1,096,843	
年度後半繰越金	453,815	1,613,788	
合計	2,753,815	2,710,631	

本 会 記 事

平成 27 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	710	市川 達也	ラジエ工業株式会社	
正会員	711	猪俣 晃一	さいがた医療センター	
学生会員	712	川中 一平	早稲田大学	鷲尾 方一
学生会員	713	西留 武宏	早稲田大学	鷲尾 方一
学生会員	714	横田 龍輝	早稲田大学	鷲尾 方一
学生会員	715	金森 航	大阪大学	室屋 裕佐
賛助会員	698	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	平出 哲也
賛助会員	708	東邦金属株式会社	東邦金属株式会社	熊谷 純
賛助会員	709	株式会社イング	株式会社イング	熊谷 純

退会

会員種別	会員番号	会員名	所属機関名	退会日
正会員	509	石岡 寿雄	九州大学大学院 総合理工学研究院	2015/11/4
正会員	582	波多野 雄治	富山大学 水素同位体科学研究センター	2015/11/10
正会員	697	斉藤 敏夫	ラジエ工業株式会社	2015/11/4
賛助会員	690	メック株式会社	メック株式会社	2016/3/1

平成 28 年度 日本放射線化学会賛助会員

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

岩崎電気 (株)
<http://www.iwasaki.co.jp>

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

(株) イング
<http://www.ing-co.jp>

(株) NHV コーポレーション
<http://www.nhv.jp>

(株) 環境浄化研究所
<http://www.kjk-jp.com>

極東産業 (株)
<http://www.kyokuto-sangyo.co.jp>

量子科学技術研究開発機構
<http://www.qst.go.jp>

住友電気工業 (株)
<http://www.sei.co.jp>

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

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

(有) イーオーアール
<http://www.eor.jp>

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

レーベン館 (株)
<http://www.leben.jp>

(公財) 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>

放射線化学 第101号〈WEB版〉

平成28年10月30日発行

発行所 日本放射線化学会

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

国立大学法人 大阪大学 産業科学研究所

産業科学ナノテクノロジーセンター

ナノ極限ファブリケーション研究分野

(吉田陽一研究室)

e-mail: jsrc@sanken.osaka-u.ac.jp

TEL: 06-6879-4285, FAX: 06-6879-4287

編集委員長 高橋 憲司

編集委員 駒口 健治

越水 正典 武井 太郎

田中 真人 端 邦樹

菅 晃一 佐伯 誠一

甲斐 健師 伊藤 賢志

藤井 健太郎 岡 壽崇

郵便振替口座 長野 00540-9-34599

日本放射線化学会

発行人 小嶋 拓治