平成 23 年 9 月発行

ISSN 0286-6722

# 放射線化学

2011 NO. 92

RADIATION CHEMISTRY

日本放射線化学会 JAPANESE SOCIETY OF RADIATION CHEMISTRY

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

〈巻頭言〉
科学，社会，そして日本放射線化学会

〈特集記事：放射線化学と原発事故〉
放射線化学と原発事故：はじめに
放射線化学の進歩と原子力を含む諸科学・技術および社会における重要な役割
福島第一原子力発電所第四号機の水素爆発の謎 – 沸騰水のラジオリシスと水素濃縮 –
ゼオライトによる汚染水処理での放射線効果の検討
低線量放射線の人体影響を考察する

〈受賞記事〉
アンジュレータ放射光による真空紫外～軟 X 線領域における自然二色性研究

〈とぴっくす〉
群馬大学重粒子線医学センターのご紹介

〈連載講座〉
V. M. ビャーコフ・S. V. ステパノフ　放射線化学の基礎 –放射線分解初期過程–　第 1 回

〈連載記事〉
TEX 入門 – 第 1 回「インストール」

〈書評〉
工藤久明 編・著「放射線利用」オーム社

〈ニュース〉
第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告
第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告
ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告
ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告
RadTech Asia 2011 参加報告

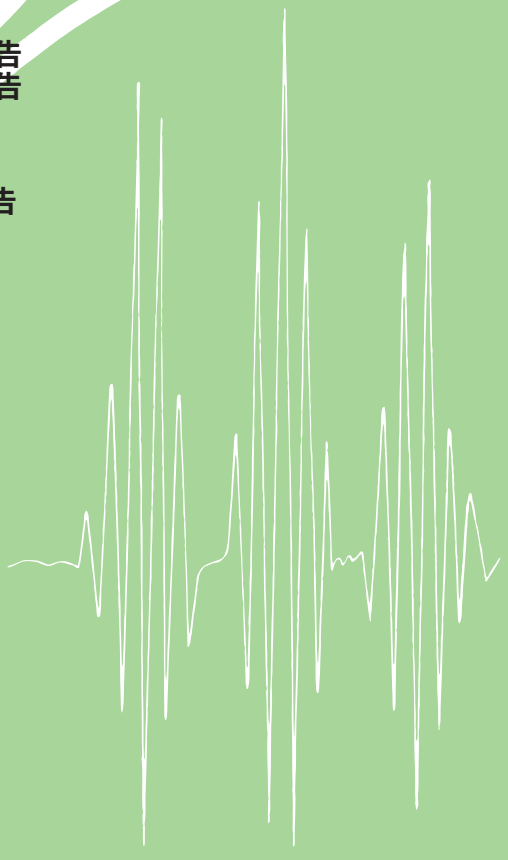
〈海外レポート〉
27th Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告

〈会員のページ〉
東日本大震災の被害と震災対策報告
東日本大震災体験記：東京大学原子力専攻
東日本大震災体験記：JAEA 東海と東海村内
東日本大震災体験記：生化学実験室で体験したこと
福島県緊急被ばくスクリーニング
東日本大震災顛末記–液状化と原発事故–
A Huge Tragedy Befalls a Great Nation

〈お知らせ〉
第 54 回放射線化学討論会
平成 22 年度日本放射線化学会各賞の選考結果

〈本会記事〉

〈賛助会員名簿〉



Japanese Society of RADIATION CHEMISTRY

HOKAER(92)1–83(2011)

# 放射線化学

2011 No.92

〈巻頭言〉

科学，社会，そして日本放射線化学会 …… 中川 和道 … 1

〈特集記事：放射線化学と原発事故〉

放射線化学と原発事故：はじめに …… 工藤 久明, 小林 慶規 … 3

放射線化学の進歩と原子力を含む諸科学・技術および社会における重要な役割 …… 籏野 嘉彦 … 5

福島第一原子力発電所第四号機の水素爆発の謎 – 沸騰水のラジオリシスと水素濃縮 – …… 勝村 庸介 … 9

ゼオライトによる汚染水処理での放射線効果の検討 …… 永石 隆二 … 15

低線量放射線の人体影響を考察する …… 島田 義也, 西村 まゆみ, 今岡 達彦, 柿沼 志津子 … 23

〈受賞記事〉

アンジュレータ放射光による真空紫外〜軟 X 線領域における自然二色性研究 …… 田中 真人 … 29

〈とぴっくす〉

群馬大学重粒子線医学センターのご紹介 …… 田代 睦 … 33

〈連載講座〉

V. M. ビャーコフ・S. V. ステパノフ　放射線化学の基礎 –放射線分解初期過程–　第 1 回 …… 小林 慶規, 岡 壽崇 … 39

〈連載記事〉

TEX 入門 – 第 1 回「インストール」 …… 岡 壽崇, 伊藤 賢志 … 51

〈書評〉

工藤久明 編・著「放射線利用」オーム社 …… 泉 佳伸 … 55

〈ニュース〉

第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告 …… 山脇 正人 … 56

第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告 …… 峯岸 安津子 … 57

ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告 …… 木村 敦 … 58

ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告 …… 端 邦樹 … 59

RadTech Asia 2011 参加報告 …… 佐伯 誠一 … 60

〈海外レポート〉

27th Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告 …… 法澤 公寛 … 62

〈会員のページ〉

東日本大震災の被害と震災対策報告 …… 越水 正典 … 63

東日本大震災体験記：東京大学原子力専攻 …… 室屋 裕佐 … 64

東日本大震災体験記：JAEA 東海と東海村内 …… 平出 哲也 … 64

**東日本大震災体験記：生化学実験室で体験したこと** ····· **藤井 健太郎** ··· 65
**福島県緊急被ばくスクリーニング** ····· **泉 佳伸** ··· 66
**東日本大震災顛末記–液状化と原発事故–** ····· **中川 清子** ··· 68
A Huge Tragedy Befalls a Great Nation ····· Mehran Mostafavi ··· 69

**〈お知らせ〉**

**第 54 回放射線化学討論会** ····· **吉田 陽一** ··· 71
**平成 22 年度日本放射線化学会各賞の選考結果** ····· **河内 宣之** ··· 76

**〈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.

**Houshasenkagaku (Radiation Chemistry)**
**(92)1–83(2011)**

# Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry
# "Radiation Chemistry"
# No.92, September 2011

**Preface**

Science, Society and Japan Society of Radiation Chemistry · · · Kazumichi Nakagawa · · · 1

**Feature Articles: Radiation Chemistry and Nuclear Power Plant Accident**

Radiation Chemistry and Nuclear Power Plant Accident: Introduction · · · Hisaaki Kudo and Yoshinori Kobayashi · · · 3

Recent Advances in Radiation Chemistry and Its Application to Nuclear Technology with Important Social Interfaces · · · Yoshihiko Hatano · · · 5

A Mystery of the Hydrogen Explosion at #4 Reactor in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station – Radiolysis of Boiling Water and Hydrogen Enrichment – · · · Yosuke Katsumura · · · 9

Studies on Radiation Effects in Decomtamination of Radioactive Water by using Zeolites as Absorbents for Radioactive Nuclides · · · Ryuji Nagaishi · · · 15

A Consideration of Low Dose Radiation Effects on Human Health · · · Yoshiya Shimada, Mayumi Nishimura, Tatsuhiko Imaoka and Shizuko Kakinuma · · · 23

**JSRC Awards**

Natural Circular Dichroism Study in the Energy Regions from Vacuum Ultraviolet to Soft X-ray by using Polarizing Undulator · · · Masahito Tanaka · · · 29

**Topics**

Introduction of Gunma University Heavy Ion Medical Center · · · Mutsumi Tashiro · · · 33

**Serial Course**

Foundations of Radiation Chemistry –Early Processes of Radiolysis– by V. M. Byakov and S. V. Stepanov, Part 1 · · · Yoshinori Kobayashi and Toshitaka Oka · · · 39

**Serial Report**

Introduction to TEX, Part I, "How to install it." · · · Toshitaka Oka and Kenji Ito · · · 51

**Book Review**

"Radiation Application", ed. Hisaaki KUDO, 2011, OHMSHA · · · Yoshinobu Izumi · · · 55

**News**

Report of the 48th Annual Meeting on Radioisotope and Radiation Research · · · Masato Yamawaki · · · 56

Report of the 48th Annual Meeting on Radioisotope and Radiation Research · · · Atsuko Minegishi · · · 57

Report of the International Workshop on Radiation Effects in Nuclear Technology · · · Atsushi Kimura · · · 58

Report of the International Workshop on Radiation Effects in Nuclear Technology · · · Kuniki Hata · · · 59

Report of RadTech Asia 2011 · · · Seiichi Saiki · · · 60

**Overseas**

Report of 27$^{th}$ Miller Conference on Radiation Chemistry · · · Kimihiro Norizawa · · · 62

**From Members**

Report of the Great East Japan Earthquake and Countermeasures · · · Masanori Koshimizu · · · 63

Report of the Great East Japan Earthquake: Nuclear Professional School, University of Tokyo ..... Yusa Muroya ··· 64
Report of the Great East Japan Earthquake: JAEA Tokai and Inside Tokai-mura ..... Tetsuya Hirade ··· 64
Report of the Great East Japan Earthquake: Experiences in Bio-Chemistry Laboratories ..... Kentaro Fujii ··· 65
Emergency Screening in Fukushima ..... Yoshinobu Izumi ··· 66
The Whole Story of the Great East Japan Earthquake –Liquefaction and Accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant– ..... Seiko Nakagawa ··· 68
A Huge Tragedy Befalls a Great Nation ..... Mehran Mostafavi ··· 69

**Information**

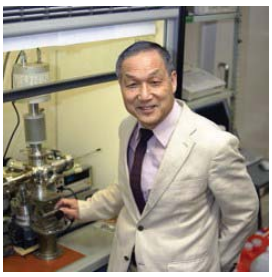
Announcement on 54th Annual Meeting of JSRC ..... Yoichi Yoshida ··· 71
Notice of the Selection Committee for 2010 JSRC Awards ..... Nobuyuki Kouchi ··· 76

**Announcements**

**Support Members**

巻　頭　言

# 科学，社会，そして日本放射線化学会



神戸大学　　中川 和道

東京電力福島第一原子力発電所の事故は科学技術に携わる我々に大きな問題を突きつけました．原子炉が制御不能に陥っていることが次第に明らかになっていくにつれ，私がまず抱いたのは，科学技術が国民の信頼を大きく裏切ってしまった，これはえらいことになったという感触と，この現実の中で放射線化学会に何ができるかという問題意識でした．

科学が市民や国民を裏切った事例は人類の歴史にも少なからず見出されます．自然の征服を意図した極めて大がかりな灌漑事業が短絡的に行われ，世界中で大規模な環境破壊に結びつき，多くの農民，市民が人為的に苦しみを味わいました．アラル海を消滅の危機に追いやったに匹敵する環境破壊の例は，東西経済圏を超えて広く見出すことができます．戦争もまたその事例でした．

上述の環境破壊事例では農学あるいは土木工学が短絡的に使用されました．今回の福島第一原子力発電所の事故では今度は原子力というハイテク工学の番でした．いろいろな学問が次々と失態を演じるさまに，私は科学技術全体が国民の信頼を大きく裏切ったと感じました．2011 年科学技術白書が「・・科学技術が人々の日常生活に甚大な影響を与え得ることが顕在化した。世界中の人々がこの現実を目の当たりにし，科学技術の持つ「光」のみならず「影」の側面を再認識することとなった。」と書きましたが，私も同じ感慨を抱いたのです．

原子力学会ではいち早く対策に出ました．情報の収集，分析，適切な助言，社会へのわかりやすい情報発信，除染への取り組みなどにとりかかったのです．では，放射線化学会は何をなすべきでしょうか？

放射線化学会が主たる活動の場としている学問分野は，放射線利用化学であります．もちろん原子炉中の水の放射線化学，高濃度金属イオン含有系の放射線化学という原子炉直結的な分野も有意な重みを持ち今回の事故でも大いに活躍いただいていることは言うまでもありません．が，会員の多くの方々の研究分野は放射線利用化学しかも現状ではそれらの基礎部門を手堅く追究しているのではないでしょうか？現時点では，放射線化学会として助言や情報発信を無理に行おうとするのは得策ではないと考えます．それぞれの持ち場できちんと仕事をすることが大切です．そのうえで，原子炉などについてこの際，きちんと勉強していくことが重要と考えます．

とは言え，国民の目から見れば我々もまた放射線に関連する科学者の一組織であります．今回のひどい事故で国民はベクレルとシーベルトという単位をあまねく知るところとなりました．リスクとベネフィットとの実現可能なつり合いの模索の中からがまん線量が決められていることなどを国民に知ってもらい，誰しもが汚染から逃れられない新たな日本での新たな暮らしのあり方を国民とともに模索していく必要があります．この観点からの具体的な研究テーマは私にはまだ見えません．しかし研究には学問に内在する興味と社会からの要請という 2 つの動機がありますので，社会からの要請に応えるという目もまた大切であると考えます．

科学技術に対する国民の信頼を取り戻すうえで，たこつぼ的な科学者の意識からの脱皮が私たちにも求められています，原子炉の事故対策は責任ある他人がきちんと分業を果たしているはずだという他人まかせの意識が指摘されています．科学者の一員として科学技術全体を把握し評価できる体質を学会としても育みたいものです．

放射線化学会にも確かな寄与が求められています．

Science, Society and Japan Society of Radiation Chemistry
Kazumichi Nakagawa (*Kobe University*),
〒657–8501 神戸市灘区鶴甲 3–11,
TEL: 078-803-7750, FAX: 078-803-7761,
E-mail: nakagawa@kobe-u.ac.jp

特 集 記 事

# 放射線化学と原発事故：はじめに

東京大学　工藤 久明*
産業技術総合研究所　小林 慶規

Introduction of the special issue on radiation chemistry and nuclear power plant accident is described.

**Keywords:** radiation chemistry, nuclear power plant, accident, introduction

平成 23 年 3 月 11 日（金）午後 2 時 46 分，宮城県沖を震源とするマグニチュード 9.0 の地震が発生し，東日本に未曾有の被害をもたらした．千年に一度の規模とも言われるこの大地震をとくに際立たせているのは，その後に東日本太平洋沿岸に押し寄せた大津波と，それにより引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の事故である．

「原子力・放射線」のように一括して扱われることの多い原子力と放射線の関係にあって，放射線化学会誌においては，本号で「放射線化学と原発事故」と題する特集記事を組むこととした．この特集は，放射線化学が原子力とどのように関わってきたか，原発事故対策にどのように貢献しえるか，等を俯瞰することを目的としている． この特集には，震災直後に真嶋常任理事（阪大）からの企画提案があったことを特記する．

ただし，本特集はあくまでも放射線化学とその関連の観点から学術的に述べられるものであり，原子炉工学，核燃料物質や放射性物質の物理・化学，原発事故の社会的影響，原子力・電力・エネルギー政策等には立ち入らないことをあらかじめ付言しておく．

まず，総論として，簱野顧問（東工大名誉教授・前原子力機構先端基礎研究センター長）から，原発事故に対し放射線化学の研究者としてどう向き合うのか，について事故の状況把握，対処方法を含めて検証する．さらに，放射線化学を含む放射線科学と原子力との関係，科学技術政策における放射線科学の位置づけ・ありかた等について概観する．

つづいて，各論として，放射線化学の立場から原発事故対策に貢献している会員から，関連する基礎科学や技術等に関する記事を紹介する．具体的には，福島原発事故を深刻なものにしている，水素爆発と放射能汚染について，燃料貯蔵プールや炉内水の放射線分解による水素発生，及び界面化学の観点から放射性物質に汚染された水の処理の検討，の 2 点である．これらには，原発事故収束に向けた提言を一部に含んでいる． また，本会会員はもとより，一般にも関心が深いと思われる，原発事故による人体への放射線影響（とくに内部被ばく，晩発影響） について，放射線影響学会からの協力を得て，紹介する．なお，事態がいまだ流動的な中で，放射線化学会員が重要な寄与をしているが，記事化するには尚早として本号では見送った案件もある．近い将来，それらが本誌に掲載されることを期待する．

また，特集記事とは分けた項立てにするものの，東日本大震災に直接または間接に被災した各地の会員（来日していた外国人研究者の所感を含む.）の状況や，復旧・復興へ向けた協力の状況の報告を，本号の「会員のページ」欄にて，多数く紹介している．

事故の収束や対策には，今後に待つところが大きいが，本特集は，現時点での知見・情報をもとに，放射線化学会誌から，原発事故に対して発信するものである．

特集のはじめにあたり，東日本大震災により，福島第一原発事故により，被害にあわれた方々に謹んでお見舞い申し上げる．このたびの，あまりに大きな事象にあたり，重複をおそれず申し述べる次第である．

---

Radiation Chemistry and Nuclear Power Plant Accident: Introduction

Hisaaki Kudo* (*University of Tokyo*), Yoshinori Kobayashi (*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*),
〒319–1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2–22 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻,
TEL: 029-287-8420, FAX: 029-287-8488,
E-mail: hkudo@nuclear.jp

特 集 記 事

# 放射線化学の進歩と原子力を含む諸科学・技術および社会における重要な役割

東京工業大学名誉教授　旗野 嘉彦

In my talk entitled “Charged Particle and Photon Interactions with Matter” as the plenary talk of The International Workshop on “Radiation Effects in Nuclear Technology”, Tokyo, March 9-10[1], I introduced briefly our new book with the same title[2] to show recent advances in radiation chemistry and referred, according to the major topics to be discussed in the workshop, some chapters in it with a particular emphasis placed on an important role of radiation chemistry in nuclear technology, which has been disregarded, unexpectedly, by most people themselves in nuclear technology and atomic energy research & development communities.

**Keywords:** recent advances in radiation chemistry, application to nuclear technology

## 1　はじめに

本年 3 月 9–10 日に開催された国際ワークショップ「原子力工学における放射線効果」，東京，東大院工・勝村庸介教授主催　において，「荷電粒子およびフォトンと物質の相互作用」と題して全体講演[1] を行った．

この講演題目と同名の永年にわたる国際 Book Project（後述）によって，所期の目的どおり，本年 1 月に本（後編）[2] を出版したので，「ワークショップ」では，その概要を紹介して放射線化学の基礎・応用における進歩と将来展望について述べた．　また，「ワークショップ」の主題については，「本」の中にこの主題に該当する Chapter が勝村教授ほかによって寄稿されていることから，これを中心に引用して説明し，さらに本稿著者自身の原子力機構在任中の経験に基づいたコメントを加えた．「ワークショップ」の主題に該当する研究内容は，意外にも原子力工学ならびに原子力研究開発コミュニティにおいて軽視されてきた事実（具体的な内容については後述）があることから，これを指摘し，これらの分野・コミュニティの将来へ向けて強い警鐘を与えた．

この講演の最中（9 日正午頃）に，地震によるかなり大きな揺れ（11 日の本震に対する前震 M7 とのこと）があったことから，講演終了後は参加者の間で，日本のような地震多発国の原発に対する不安，懸念について会場のあちこちで話が交わされていた．私は，水（液相のみでなく気相も含めて）の放射線分解による水素生成のメカニズムと G 値について，また，これらの固体表面・界面上での特異性などについて雑談を行ったと記憶している．「ワークショップ」は 10 日夕に終了，参加者は 11 日朝までに散会した．その一部は東海村へ移動し，11 日午後からのサテライトを予定していたと聞いている．当然のことながら，これは中止され，参加者の多くはその帰途が大幅に遅れたとのことである．

今回の「本」の出版[2] と「ワークショップ」の開催[1] は，その直後の未曾有の大地震・津波そして原発事故と，このように互いにまったく偶然の事象として起こった．しかし，これらの間には内容的に無視することが出来ない重要な関連性が含まれている可能性が大きいと考えられる．事故の発生原因それ自身のみでなく，関係者によるこれへの対処方，その後に次々と起こる放射線・原子力に関わる科学・技術上の問題とその社会的な影響に関する情報に触れるたびに，今回の「本」ならびに「ワークショップ」で指摘され懸念されていた諸課題が浮き彫りにされつつあるように感ぜられる．また，さらに新しい多くの重要な課題が生み出されつつあるようである．「放射線化学の基礎・応用における進歩」を担う本誌読者は，これらの多くの課題について注意深い解析と対処を強く促されている．後に，「4 放射線化学の重要な役割」において，これらについて私見を述べる．

Recent Advances in Radiation Chemistry and Its Application to Nuclear Technology with Important Social Interfaces
Yoshihiko Hatano (*Tokyo Institute of Technology, Professor Emeritus*),
〒236–0057 横浜市金沢区能見台 2–17–3,
TEL: 045-353-5633, FAX: 045-353-5633,
E-mail: hatano.yoshihiko@nifty.com

## 2　放射線化学の進歩と将来展望 –Book Project とその経緯–

この国際 Book Project は以下に述べるように IAEA の長期（1985–1995）Project がその発端となっている．この IAEA Project[3] は，Curie と Roentgen による放射線の発見以降 100 年間にわたる放射線と物質との相互作用に関する基礎研究の成果を，新しい世紀へ向けてまとめることを目的としたものであり，その成果は IAEA 報告書[3] に詳細にまとめられている．また，その骨子である相互作用初期過程（物理的過程）に関する Plazman–Fano–Inokuti 理論とこれをシンクロトロン光および電子線衝撃分光を用いて実証した実験について，Roentgen X 線発見 100 年を記念として開催された 10th ICRR, Wurzburg, 1995 の全体講演としての報告[4] がある．

この IAEA Project は放射線と物質との相互作用の初期過程（物理的過程）のみを主要な対象としているところから，それに続く物理化学的過程，化学的過程，生物学的過程も対象に含めるべきであるとの強いコメントが各方面から寄せられた．また，その報告書[3] のサーキュレーションが極めて不十分であったこともあって（その後，本稿著者が IAEA へコメント[5] した結果，現在ではその URL[6] から入手可能），物理的過程から生物学的過程に至る多くの基礎過程を対象とし，さらに応用についてもサーベイを行うこととした本の出版が強く要望され，国際 Book Project がスタートした．放射線化学研究者を中心として，これに IAEA Project 参加者から選考された物理学分野の研究者，さらに放射線に係る生物学，医学，工学各分野の研究者が加わって国際 Project が活発に進められて所期の目的が達成され，本が出版された[7]．

出版後間もなく，放射線に関する化学，物理学，生物学，医学，工学の各分野は言うまでもなく，これらとは異なる多くの科学・技術の分野からも多様な Positive コメントがあり，それとともに，予期していなかった次のような強い要望が編集者に届けられた．それは，過去 100 年間のサーベイは興味深く有用であるが，研究の現状と将来展望をもっと詳しく，そして応用も，さらに他分野とのインターフェイスについてもサーベイして欲しいというものであった．

編集者と出版社（レフェリー）は，2005 年頃より，これらのコメントおよび要望をよく検討し意見・情報交換を行って，新しい続版（後編）の素案つくりを始めた．その結果に基づいて，国際的 Advisory Board の下で，国際シンポジウム[8] が 2007 年に開催され，その結果を踏まえて Chapter Title と執筆者が選考された．このようにして，本稿の最初に述べたように，続編（後編）が予定通り本年 1 月に出版された．前編に対する Positive コメントおよび強い要望に基づいた編集作業の所期の目的は十分達成されたものと考えている．

「本」(前編, 後編)[2,7] の内容は, 後編[2] の出版社の Website http://www.crcpress.com からその概要を知ることができる．また，2nd APSRC, Tokyo, 2008 の Keynote Lecture Paper “Future Perspectives of Radiation Chemistry”[9] にもその概要が紹介されている．なお，後編 Chapter 1 Introduction[2] には，編集者による，前・後編を通した “Charged Particle and Photon Interactions with Matter” 全体としての重要な結論がまとめられている．その内容はおよそ次の通りである[2,7]．

放射線と物質の相互作用の初期過程（物理的過程）に関する Platzman–Fano–Inokuti 理論は，本稿著者らによるシンクロトロン放射光および電子線衝撃分光を用いた分子の振動子強度分布，イオン化・励起・解離各断面積の測定，超励起状態の電子状態とその解離ダイナミクスの観測によって実証された．物理的過程に続く物理化学的，化学的，生物学的過程から成る多くの基礎過程に関する研究の成果は，それぞれの専門研究者によって前編・後編の多くの Chapter にまとめられている．これらについても実験・理論ともにその進歩は著しい．応用研究については，前編と後編の内容から互いに大変興味深いコントラストを見ることができる．前編においては，これがほぼまだ揺籃期にあることを示しているが，後編ではこれが極めて多様で豊かになりつつあることを示している．応用研究および他分野とのインターフェイス構築は，いわゆる工学・技術分野のみでなく，基礎科学分野へも及んで新しい風を送り続けていることに注目したい．

## 3　原子力工学における放射線効果

前編・後編[2,7] の内容のうち今回の「ワークショップ」[1] の趣旨に直接関わるものについては，本号で関係者による詳細な説明があるので，以下に各 Chapter の Title, Subtitle のみを挙げる．これらの Chapter には，放射線化学の観点から見て原子力工学において重要とされている研究の詳細がまとめられている．

- 前編[7]

Chapter 23: Application of Radiation Chemistry to Nuclear Technology (Y. Katsumura)

1. Radiolysis of water at elevated temperature

–Radiation effect of coolant water in nuclear reactors.
2. Radiation effects in spent nuclear fuel reprocessing.
3. Radiation effects relevant to high-level waste repository.

● 後編[2)]

Chapter 34: Radiation Chemistry in Nuclear Engineering (J. Takagi, B. J. Mincher, M. Yamaguchi and Y. Katsumura).

1. Application of radiation chemistry to power plants.
2. Radiation induced processes in the spent nuclear fuel reprocessing.
3. Geological disposal of high level radioactive waste.

また,「本」(後編)[2)] の多くの Chapter では，気相，超臨界状態，液相，固相，表面・界面，生体系など種々の条件下での水について，荷電粒子およびフォトンとの相互作用が論じられていることが特徴の一つである．これらは基礎研究の観点から重要であるばかりでなく，応用研究特に原子力の観点からも重要な知見と考えられる．放射線化学の原子力工学における重要性は明らかである．放射線化学を含む放射線研究が意外にも原子力工学コミュニティにおいて軽視されているという事実は，どこにその原因があるか明らかにされねばならない．

## 4　放射線化学の重要な役割

今回の福島原発事故を契機として，国内外において，原発を維持すべきか否か，維持する場合の方式と時間スケジュール，廃炉・高経年化炉への対処，新型炉・次世代炉をどうするかという問題が論じられ，また，エネルギー問題・環境問題全体の中での原子力エネルギーの位置付け，エネルギー源多様化と再生可能エネルギーへの重点的移行の問題と原子力エネルギーの問題との関連性，原発の炉のみでなくその施設全体における放射線効果・影響の評価に関する問題，放射線の自然環境，社会への影響の問題などが指摘され論じられている．これらの問題は分類・解析にいとまがないほどに多岐にわたっている．これらに関する意見・情報交換は，報道等から伝えられる限り，真剣で活発なものに加えて，対象となる問題の複雑性と基礎・基盤となる知識・情報が不十分なことによる見かけ上，活発なものが多々見られる．

これらの問題の多くは，科学・技術上の問題に限定しても，相互に多岐にわたる関連性を持って複雑化していることは概ね明らかである．また，報道等でよく見られるように，社会的・政治的な要素が加わることによって，さらに著しく複雑化しているようである．したがって，本稿においては，これらの問題を，本誌読者それぞれが個人または一市民として注意深く考えて対処するべきものと，専門的にこれらの問題の少なくともその一部と密に関わる可能性が大きいと考えられる本誌読者がこの分野の一研究者・一教育者として対処するべきものとにまず大別することにし，ここでは後者の問題について以下に私見を順不同で挙げることにする．

[1] 今回の「ワークショップ」は，偶然に大震災・原発事故の直前に開催されたものであることから,「事故」によって生じた問題の内容を踏まえて，「ワークショップ」の発表の内容はすべて現在の時点で再度冷静に注意深く解析・評価してみることが必要である．

[2] 全体講演[1)] の後に行われた「雑談」のうち，水（液相のみでなく気相も）の放射線分解における水素生成のメカニズム，その固体表面・界面での特異性などの研究はこの分野における新しい重要な実験テーマの一つと考えられる．

[3] 放射線化学と原発事故とのこのような係わりを，この機会に注意深く考えることは重要であるけれども，当然のことながら，このような状況とは独立に，放射線化学のいろいろな側面における研究の進展の歩みが滞ることはなく，より一層深められねばならない．専門分野としての重要性を深めるのみでなく，その成果の広範な科学・技術諸分野，社会への波及効果も重要であることを強く認識するべきである．認識するのみでなく，的確で具体的な啓蒙活動を，国内外へ向けて行うことが必要である．本稿で紹介した「本」(前編・後編)[2,7)]，そして本学会によって出版された「放射線化学のすすめ」[10)] はともに，互いに相補的な役割も生かすことによって，この目的のための有用な資料の一つとして活用されることが期待される．

[4] 放射線化学，さらに放射線に関わるいろいろな分野での新たな人材育成に対して，より一層真剣に取り組む必要がある．

[5] 本誌の読者は放射線に係る専門の立場から，他分野の研究者・教育者，学生，一般市民に対して，放射線に関する種々の基礎的な内容を啓蒙する活動を新たに行う必要がある．上記の資料のうち特に後者[10)] は，このためにも有用である．このような啓蒙を行う場合には，放射線化学のみでなく放射線に係る広範かつ基礎的な知識と技術の内容を平易な言葉で伝える必要がある．今回の事故を契機に伝えられる報道等に触れて，一般市民のみでなく多種多様な専門家，責任ある立場の者が，著しく不適切，不十分な放射線に関する知識と理解のもとで発言を行っていることに気がつく．

[6] エネルギー源の多様化と再生可能エネルギーの開発は必須と考えられる．そのための研究開発に対しても，物質のイオン化・励起・解離を伴う諸反応過程を専門的に研究対象としている本誌読者または放射線化学研究者の持つポテンシャルは高いと考えられる（参照：「高効率アモルファスシリコン創製のためのシランプラズマ中の反応制御：パルスラジオリシス法による研究」[11]．

## 5 おわりに

以上，本特集の「総論」に代えて，標記の題目について述べた．このたび国際的 Book Project による「放射線化学の進歩」をまとめた本の出版[2] を行い，また国際ワークショップ「原子力工学における放射線効果」での全体講演[1] を行ったが，これらをその直後の大地震・大津波・原発事故と偶然に近接した事象として漠然と捉えることは不適切であると考えている．この未曾有の原発事故とそれに引き続いて起こりつつある原子力，放射線に係る諸問題は，この「本」および「ワークショップ」の内容と密接に関連する部分が多い．本稿では，まず「ワークショップ」の講演内容として，「本」の内容に即した「放射線化学の基礎・応用における進歩」とその諸科学・技術への波及効果を概説するとともに，特に「原子力工学における放射線効果」について「本」の中の Chapter を紹介した．おわりに，これらを踏まえて，放射線化学研究者の一人として今回の諸問題に対してどのように対処すべきかについて私見を述べた．

## 参考文献


1) Y. Hatano, in International Workshop on Radiation Effects in Nuclear Technology, Tokyo, March 9–10, 2011.
2) *Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Recent Advances, Applications, and Interfaces*., ed. by Y. Hatano, Y. Katsumura, A. Mozumuder, CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, **2011** (ISBN: 978-1-4398-1177-1).
3) *Atomic and Molecular Data for Radiotherapy and Radiation Research*, ed. by M. Inokuti, IAEA-TECDOC 799, IAEA, Vienna, **1995**.
4) Y. Hatano, *Application of Synchrotron Radiation to Radiation Research*, Congress Lecture, 10th International Congress of Radiation Research, Wurzburg, 1995, *Radiation Research 1895–1995*, ed. by U. Hagen, D. Harder, H. Jung, C. Streffer, Univ. Wurzburg Press, Wurzburg, **1995**, Vol. II, pp. 86–92.
5) Y. Hatano, *Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion*, ed. by R. E. H. Clark, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, **2008**, Vol. 14, pp. 77–84; Y. Hatano in IAEA Coordinated Research Project on *Data for Molecular Processes in Edge Plasmas*, 2004–2006.
6) http://www-nds.iaea.org/reports-new/tecdocs/iaea-tecdoc-0799.pdf
7) *Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications*., ed. by A. Mozumder, Y. Hatano, Marcel Dekker, New York, **2004** (ISBN: 0-8247-4623-6).
8) *International Symposium on Charged Particle and Photon Interactions with Matter*, Tokai, Nov. 6–9, 2007. See the proceedings, *Radiat. Phys. Chem.* **2008**, *77*, 1119–1339.
9) Y. Hatano, *Radiat. Phys. Chem.* **2009**, *78*, 1021.
10) 日本放射線化学会編，「放射線化学のすすめ」，学会出版センター，**2006**.
11) Y. Hatano, *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, ed. by B. Bederson, H. Walther, Elsevier Academic Press Inc: San Diego, **2000**, Vol. 43, pp. 231-241.

特 集 記 事

# 福島第一原子力発電所第四号機の水素爆発の謎
## – 沸騰水のラジオリシスと水素濃縮 –

東京大学　勝村 庸介

Although it seems that the reactor #4 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station was destroyed by hydrogen explosion, the origin of the hydrogen has not been made clear yet. Relevant to this subject, the gamma-radiolysis of boiling water has been done. It was found that hydrogen evolution and its enrichment take place under boiling condition.

**Keywords:** hydrogen explosion, hydrogen formation, radiolysis, boiling water, hydrogen enrichment

### 1　はじめに

平成 23 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分にマグニチュード 9.0 の巨大地震が三陸沖で発生し，引き続く津波は三陸海岸から仙台湾を中心に，日本の太平洋側の海岸線を襲い，多くの地域に壊滅的な損害を与えた．東京電力福島第一原子力発電所では地震で外部電源喪失をし，非常用発電機が始動したが，使用可能であった 12 台の非常用発電機は 6 号機の 1 台以外，津波で使用不能となった．そのため，緊急停止した 1 号機から 3 号機までの原子炉圧力容器内の燃料は冷却不能に陥り，冷却水不足により燃料は水中から露出し，高温下での核燃料被覆管材料であるジルコニウムと水の反応により水素が発生し，これらが原子炉建屋内に充満し，水素爆発を起こし，1，3 号機の建家が破壊されていった．

4 号機も水素爆発して建家が損傷したと見られる．ところが，4 号機は 1-3 号機と異なり，前年の 11 月末より定期点検中で，しかも燃料は圧力容器から取り出され，燃料プールに保管されていたことから，その状況は他のものと異なり，当初より水素爆発の原因が検討されてきた [1]．4 号機の燃料プール水の体積は 1,425 $m^3$ で，総熱量 2.3 MW の崩壊熱を放出する 1,331 体の燃料集合体が保管されていた [1,2]．4 号機での水素爆発の可能性として，(1) ジルコニウム-水反応，(2) プール水のラジオリシス，(3) 3 号機からの水素ガスの移行，の三つがあげられていた．プールの水が抜けて，保管燃料が水から露出すればジルコニウム–水反応が生じて，水素が発生し，水素爆発を起こせば燃料内の放射性物質が飛散するため相当な放射能汚染が引き起こされることが想像される．2.3 MW の崩壊熱により全プール水が沸騰蒸発するに要する時間を計算すると 15 日程度になる．しかも，沸騰に至るまでにも 2 日程度は必要である．ところが 4 号機で水素爆発が起こったとされるのは 3 月 15 日 6:10 AM 頃であり，電源喪失から 3.5 日であることから，ジルコニウム–水反応がおこるためには，プールの水が何らかの原因で抜けてしまう必要がある．また，東京電力が可能性として考えている 3 号機から 4 号機への水素ガスの移行についても，3 号機の水素爆発は 3 月 14 日 11:01 AM に起こっており，4 号機の水素爆発の前日で，天井の抜けた 3 号機から 4 号機へ水素が移行するのは困難と考えられる．

4 月 13 日には 4 号機のプール水のサンプルリング結果が報告され，I-131，Cs-134，Cs-137 はそれぞれ，220，88，93 Bq/$cm^3$ [3] であり，ジルコニウム–水反応の可能性は低く，さらに 4 月 29 日には水中カメラの撮影結果が報告され，プール内部が破損している様子はみられなかった [4]．

可能性の (1)，(3) が否定されると，残りはラジオリシスである．燃料プールのラジオリシスにおいてはガンマ線の寄与が支配的で，静水（非沸騰状態の水）のラジオリシスでは水素の発生はほとんど見られないことが知られている．商業用のコバルト 60 を用いたガンマ線照射施設では線源のコバルト 60 は水中に保管するので，

A Mystery of the Hydrogen Explosion at #4 Reactor in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station – Radiolysis of Boiling Water and Hydrogen Enrichment –
Yosuke Katsumura (*University of Tokyo*),
〒319–1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2–22
東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻,
TEL:03-5841-6979,FAX:03-5841-8624,
E-mail: katsu@n.t.u-tokyo.ac.jp

もし，ラジオリシスで多量の水素が発生する場合は，水素爆発の危険を想定する必要があるが，現実には想定していない．水素の発生が観測されないからである．とすれば，ラジオリシスで水素が発生するのは，沸騰条件下での可能性がある．このように推論した段階では，沸騰下での水素発生の研究報告が存在していることは知らなかった．また，この頃から終息への工程表が議論されるようになり，第一ステップとして損壊建家に覆いをして放射性物質の飛散を防止することが公表された．再び密閉状態を形成し，沸騰下で水素が発生しようものなら再び水素爆発が発生することもあり得る．そこで，沸騰条件下でのラジオリシスにおける水素発生の確認の実験を緊急に実施すべきとの結論に達した．コバルト 60 照射による緊急実験は高崎量子応用研究所で実施した．ゴールデンウィークの連休前に準備を開始し，緊急に 5 月 12，13，15 日の三日間の実験を認めてもらった．初日は線量測定等の準備に費やし，後の二日間で照射実験を実施した．

## 2　沸騰水ガンマ線照射による水素発生実験

非沸騰下での水試料の照射と水素定量は特に困難はない．一方で，沸騰下での照射と水素定量には工夫が必要で，実験にはソクスレー抽出器を使用し，図 1 のような実験照射系を組み上げた．ソクスレー上部に枝管をセットし，このガラス管をメスシリンダに入れた水に入れることにより沸騰状態でソクスレー内部を下界と遮断した．こうすれば，ソクスレー内部で発生した水素は閉じ込められるので，ソクスレー上部にシリコンゴム製のガスサンプリング用のセプタムをセットし，ここからガスをサンプリングし，ガスクロにより定量することができる．水試料は 500 mL，その上部のソクスレーまでが 1035 mL，ソクスレー部は 42 mL，枝管 17 mL であった．

線量率 7 kGy/h で非沸騰下，あるいは沸騰下での純水の照射を 1 時間行った．非沸騰下では水素の発生はほとんど検出できないのに対し，沸騰下では顕著な水素発生を確認し，沸騰下での照射で水素が発生するとの仮説を確認した．しかし，気相内の水素の分布を均一と仮定すると，発生水素量は発生 G 値，0.45[5] よりも大きく，しかも時間が経るに従い濃度が増大することを見いだした．これは水素濃度の濃縮が起こっていることを意味する．二日間の照射実験を終え，この時点で，沸騰下での水の放射線分解で水素が発生すること，さらにこれらは空間上部に濃縮することまでが確認できた．

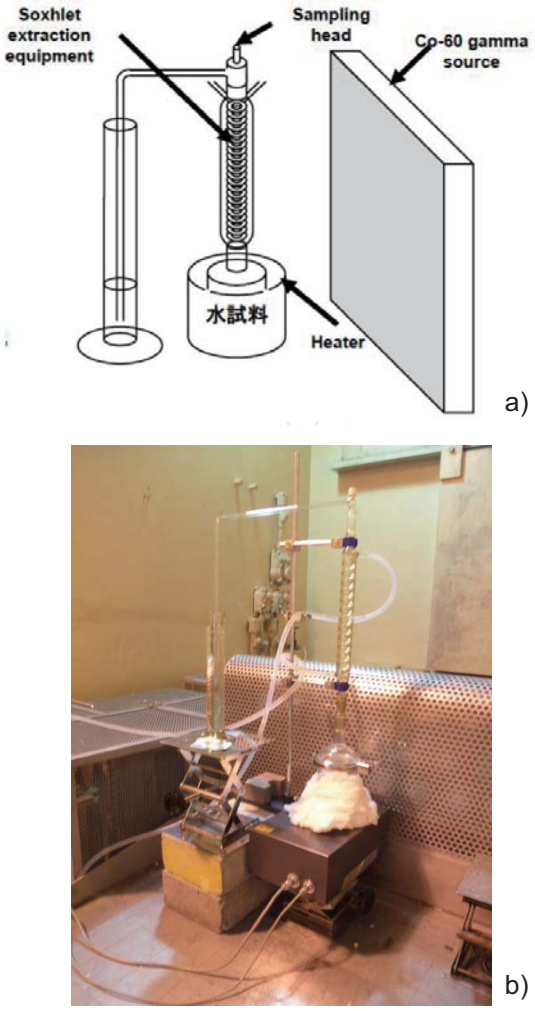



**図 1**　非沸騰，沸騰下での水試料の照射の概要 a) とその写真 b)

## 3　非照射下での確認実験

コバルト 60 照射実験で水素の濃縮現象を確認した．この現象を更に詳しく検討するために，照射により水素を発生させるのではなく，直接水素を外部から導入して，その挙動を調べることにした．一つは，先の照射実験に使用したシステム同様のソクスレータイプのものであるが，図 2a) に示すような冷却管は蛇管の換わりに大小の球状の数珠をつなげたものを使用している．下部の容器から 10 mL の水素ガスを非沸騰下，沸騰下で注入し，上部のサンプリングポイントで観測した．非沸騰下では，濃縮は起こらず，約 60 分で系内全体積内に均一に分布する．その場合，下部容器に入れる水の容量を

500，1000 mL にした時，気相部分は各々 960，460 mL となり，水素濃度は空間容量からの計算に良く一致し 1.0，2.2% になる．一方，沸騰下で同様の実験を進めると，10 分程度でサンプリングポイントにて，容器内の水容量 500，1000 mL に対応して 10，12% の定常濃度に到達し，5–10 倍の濃縮を確認した．しかし，濃縮度はほぼ同程度で，水の容量には大きく依存しない．得られた非沸騰下，沸騰下の水素濃度の時間挙動を図 2b) に示す．

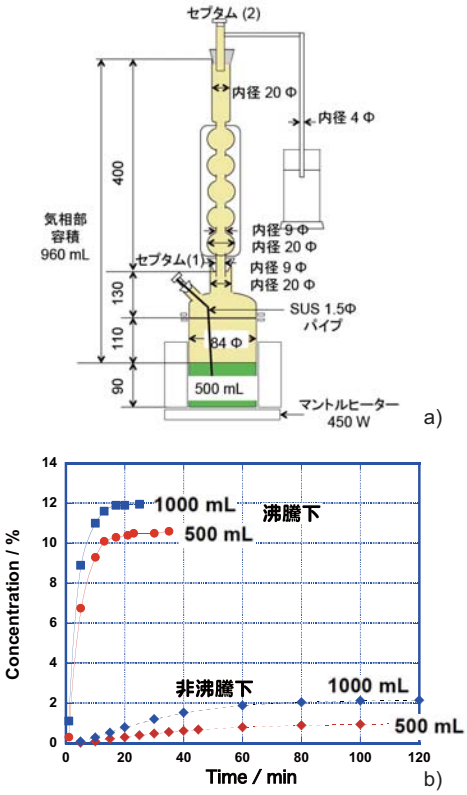



**図 2**　オフライン実験で使用したソクスレー装置 a)．非沸騰下，沸騰下で 10 mL の水素ガスを下部容器内の水に導入したときのセプタム（2）でサンプリングした水素濃度の経時変化 b) 500，1000 mL は下部容器内の水試料の容積を表す

同様の実験を，図 3a) に示すような 100 L（50 × 50 × 40 $cm^3$）のアクリル容器内に 3 L の加熱用水槽をセット，非沸騰下と沸騰下で，水槽に 100 mL の水素を注入した時の濃度変化を測定したところ，非沸騰下では，上部と底部の，各々 ① と ⑭ のサンプリングポイントで 12–13 分経過すると 0.1% 濃度に到達し，これは全空間に均一分布した水素濃度に対応している（図 3b)）．一方，沸騰下では，側壁から 5 cm 程度はなれた部分でサンプリングした結果，注入 30 秒後には 2–3 倍，60 分後は 2–6 倍程度に濃縮していることが判った（図 3c)）．

## 4　水蒸気凝縮による水素の濃縮機構

以上，紹介してきた実験結果を踏まえて，以下に述べるような水素の凝縮機構を考えている．

放射線分解で水素分子が生成し，その G 値は 0.45 である．しかし，大容量の静水中では水素の拡散は速くなく，界面に至る前に OH ラジカルにより消費され，低い定常濃度を維持する．ところが，沸騰状態では，水と水蒸気の界面が増大し，気相への移行が加速され，結果的に水素の水相から気相への移行が生じる．我々の実験で，沸騰水下での水素発生は確認できているものの，その発生 G 値は決定できていないが，20 年以上も前に原子炉事故を想定した実験の一環として電力会社，プラントメーカーとの共同実験として実施され，G 値としては 0.36，0.27 などの値が報告されている[6]．気相に移行した水素は水蒸気の流れに乗って移動し，水蒸気は冷たい容器壁に接触して凝結する．しかし，水素は凝結しない．高温では水蒸気圧は高く空気成分は相対的に減少する．従って，その部分に留まれば，結果的に水素濃縮がもたらされる．この効果はソックスレーのような局所濃縮のみでなく，アクリル箱のような大きな容器壁でも観測されたことが重要である．この過程は定性的には確認できたと考えられるが，今後，定量的な解析が必要であろう．沸騰下では水蒸気が連続的に発生する．2.3 MW の崩壊熱では毎秒 1.68 $m^3$（100 °C 換算）の水蒸気が発生するので，室内を一気圧に保つためには，もともと存在していた空気が室外へ逃げてゆく必要がある．もし，3，4 号機共通の排気管を通じて出てゆくとすると，3 号機からの水素流入説は否定されよう．

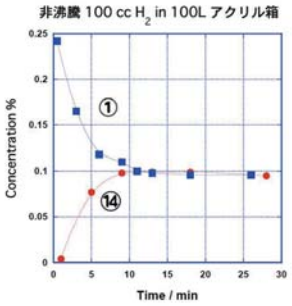
## 5　1F4 での水素爆発機構の推定

本実験で確認された，沸騰下での放射線分解による水素発生，その濃縮効果を踏まえて，水素爆発の推定を試みた．

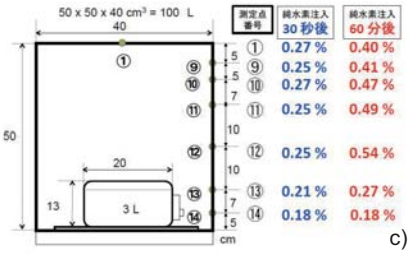
1F4 の燃料プールも電源喪失により冷却機能が失われた．1400 $m^3$ のプール水が 2.3 MW の崩壊熱で 40 °C から沸騰に至るまでには約 1.8 日要する．従って，1F4 のプールは水素爆発までに丸 1 日以上，沸騰により水素が発生していたと思われる．

一方，水中の水素の発生量 G 値 0.45 で崩壊熱のうち 10% が放射線として水分解に効く[7] として計算すると，水素の発生量は 22.1 $m^3$/日，20% であれば，44.2 $m^3$/日（25 °C 換算）となる．1F4 の燃料貯蔵プール部を含む

a)




b)




c)

**図 3**　100 L のアクリル箱（50 × 50 × 40 cm$^3$）の写真 a)，非沸騰時に水素ガスを底部の 3 L の水槽から注入後の水素の濃度変化 b)，沸騰時に水素ガス注入後 30 秒，60 分後のサンプリングポイント毎の水素濃度 c)

5F のサイズについては公式データを手に入れていないが，48 m × 35 m × 10 m とすれば 16,800 m$^3$ である．そのうち壁面から 0.1 m の領域に水素が濃縮存在しているとすれば，天井と側壁部分の総容量は 334 m$^3$ となる．この領域に発生水素が局在するとし，空気中水素濃度 4.1% の爆鳴気を形成するには，334 × 0.041 = 13.7 m$^3$ の水素が有れば十分で，一日間の沸騰下水素発生で十分供給することが出来る．このことから，1F4 の水素爆発は，使用済燃料プールの沸騰水の放射線分解で発生した水素で説明することは可能である．

## 6　今後の課題と展開

非沸騰下での水溶液の放射線照射では水素は気相部に発生しない．水中から液面への水素移動に時間を要すること，水中の二次的な反応過程に巻き込まれ（例えば，$H_2 + OH \longrightarrow H + H_2O$），定常濃度が低くなるためである．しかし，沸騰が生ずると気泡が多数発生し，生成水素は容易に気相に移動することになる．しかし，この過程については実験が行われ，報告されている[6]．本研究でも定量実験を進めており，線量率 2.2 kGy/h のもとで沸騰した純水からは G($H_2$)=0.24，3.5% 食塩水からは G($H_2$)=0.54 の水素発生を検出した．溶質の有無や線量率にも依存するようで，さらに実験を続ける必要がある．

本実験で明らかになったことは 1F4 の建物の水素爆発の説明の一つの可能性であるが，実際にこれが原因であったかどうかは依然として不明である．この点をさらに検討するためにはもっと大きな実験体系での実験を実施する必要がある．本実験では，100 L の容積内での挙動であり，実際の対象は 10,000 m$^3$ 以上の巨大な容積であり，小さなスケールの実験をどのようにスケールアップして考えるかが今後の大きな問題である．

## 7　おわりに

本実験は東大・JAEA 連携「原子力における放射線効果」研究グループ（メンバーは勝村庸介 [a,b]，工藤久明 [a,b]，室屋裕佐 [a]，岩松和宏 [b]，山下真一 [c]，田口光正 [c]，永石隆二 [d]，林銘章 [d]，熊谷友多 [d]，平出哲也 [d]，山口真 [e]，端邦樹 [f]，岡壽崇 [g]，松浦千尋 [h]，a）東京大学工学系研究科原子力専攻，b）東京大学工学系研究科原子力国際専攻，c）日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門，d）日本原子力研究開発機構原子力基礎工学部門，e）日本原子力研究開発機構地層処分部門，f）日本原子力研究開発機構安全研究センター，g）日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター，h）NPO 科学技術社会研究所）で実施したものである．照射実験は，山下真一，平出哲也，松浦千尋，岩松和宏，田口光正の各氏が，オフライン実験は松浦千尋氏が中心となって実施した．実施に当たっての，原子力機構の吉田善行博士，各部門のリーダーのご理解に感謝する．東大工学系研究科の副研究科長の関村直人教授には本実験の支援，関連情報を提供頂き，大変にお世話になった．この場を借りてお礼を申し上げたい．

1F4 の水素爆発への問題を考えるきっかけを与えてくださった大阪大学の山口彰教授に感謝する．さらに，佐治愿博士，さらに氏のメール “Earthquake” の配信先の放射線化学者，C. Stuart（AECL，カナダ），D. Bartels（Univ. of Notre Dame，米国），H. Sims（NNL，英国），S. A. Kabakchi（Kurchatov Institute of Atomic Energy，ロシア）他のコメントに感謝する．

## 参考文献


1) E. Kintisch, *Science* **2011**, *332*, 24.
2) 崩壊熱は計算推定値.
3) 東電 4 月 13 日モニタリング結果公表データ（東京電力プレスリリース　2011 年 4 月 29 日）.
4) 東電 4 月 29 日プール内撮影データ（東京電力 TEPCO ニュース　2011 年 4 月 29 日）.
5) G. V. Buxton, C. L. Greenstock, W. P. Helman, A. B. Ross, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **1988**, *17*, 513.
6) H. Ito, T. Sato, A. Watanabe, M. Fukazawa, E. Ibe, H. Karasawa, F. Totsuka, *Proceedings of the International ENS/ANS Conference on thermal reactor safety* **1988**, Vol. 4, 1604.
7) 1.7-6 in NRC regulatory guide 1.7, **1978**.

特 集 記 事

# ゼオライトによる放射性汚染水処理での放射線効果の検討

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門　永石 隆二

Radioactive water has been emitted following incidents at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, and needed to be quickly decontaminated by the adsorption and/or the coagulation sedimentation of radioactive nuclides, where hydrogen molecules are produced by water radiolysis. The decontamination process with zeolites as absorbents of radioactive cesium was assumed, the observed yields of hydrogen production were determined in mixtures of seawater and zeolite, and then the production rates were estimated for the safety operation of process before the operation started.

**Keywords:** radioactive water, decontamination, zeolite, seawater, radiolysis, hydrogen production

## 1　はじめに

3 月 11 日に起きた地震（東北地方太平洋沖地震）にともなう大津波の影響で，福島第一原子力発電所（the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station）で全電源喪失，原子炉建屋での水素爆発などが起きた結果，原子炉が損傷して，放射性物質を含む大量の水（stagnant radioactive water）がタービン建屋の地下に溜まった．

ところで，1999 年に茨城県の東海村で起きた JCO 臨界事故では当時，使用済核燃料の分析に携わる者として自発的に集まった研究者や技術者とともに，事故の翌日から，臨界が起きたウラン溶液の採取後に要請されることを見込んで，短寿命の核分裂生成物（fission product, FP）や核分裂性核種（fissile nuclide）の分析対象核種の選定ならびに分析作業の準備に着手していた．

しかし今回は，我々も被災して，研究所内外の建物や道路の損壊，実験室の装置や器具の破損を目の当たりにし，長時間の停電や断水にも見舞われ，さらに情報も遮断されたため，すぐに何かができる状況ではなかった．事実，私が福島第一原子力発電所の事故を知ったのは，電源が回復した，地震発生の翌週のことだった．

このような状況下で，インターネットや手元の情報を頼りに原発事故に役立つ活動を模索しているなか，3 月下旬に大学，研究所，民間の有志による「放射性物質を含む汚染水処理のための基礎データの取得」[1] の活動に加わった．この活動では，ゼオライト（沸石）をはじめ，非ゼオライト系無機イオン交換体，活性炭などの固体吸着剤（adsorbent）を用いて，主要な FP であるセシウム，ストロンチウム，ヨウ素の吸着試験が実施されて，吸着に及ぼす海水濃度，吸着剤量／汚染水量の比，吸着時間の影響など，汚染水処理システムの構築に役立つ数多くの基礎データが取得された．

ここで，我々は放射線化学を研究する者として，汚染水処理を安全に運用する観点から，放射性核種（radioactive nuclide）から発生する放射線による水の分解で放出される水素量の評価を進めることとなった（図 1）．

当初は，原発事故に関する詳細な情報を入手できず，原子力安全・保安院（NISA）や東京電力（TEPCO）のホームページに掲載された，公開情報をもとに進めた．また，大量の汚染水を迅速かつ早期に処理するために，早急に処理装置を設置して稼働する必要があった．このため，処理装置の設計上および運用上の指針となる評価・実験データを，処理の開始前に得る必要があった．さらに，この段階では，どんな構成や条件で汚染水処理が行われるかは未知であったため，どのような処理方針にも対応できる実験データの取得を念頭においた．

以上の経緯を踏まえて，本記事では，ゼオライトを利用した汚染水処理での放射線効果の検討について，順を追って紹介する．ここで，Co-60 $\gamma$ 線による照射実験や，放射線化学で重要となる水素発生の収量（$G$ 値）に関す

---

Studies on Radiation Effects in Decomtamination of Radioactive Water by using Zeolites as Absorbents for Radioactive Nuclides

Ryuji Nagaishi (*Japan Atomic Energy Agency*),
〒319–1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2–4,
TEL: 029-282-5493, FAX: 029-282-5935,
E-mail: nagaishi.ryuji@jaea.go.jp

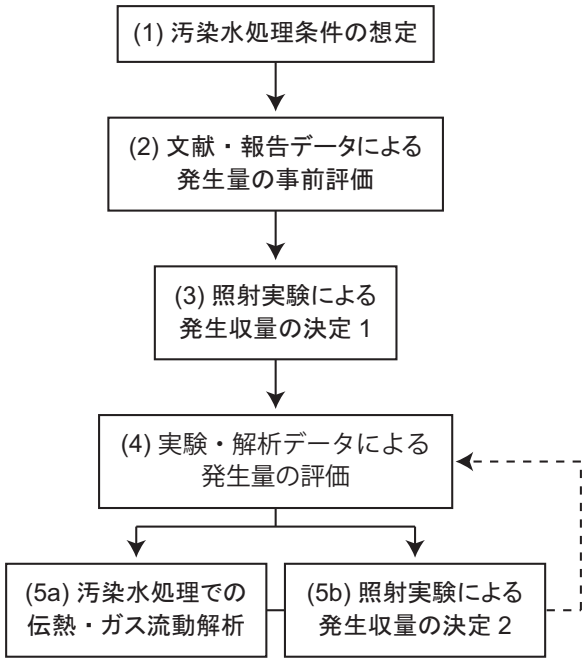



**図** 1　汚染水処理での水素発生に関する評価スキーム

る詳細については，熊谷らが速報[2] などで報告しているので，そちらを参考にしていただきたい．

## 2　汚染水処理の想定

汚染水は，漏えい直後には原子炉や使用済燃料プールの水であったが，原子炉建屋内の核燃料の冷却が開始された後では海水，ホウ酸，ヒドラジンなどが混入して，冷却作業が進むにつれ，その量も増えていった．放射性核種の組成として表 1 に，2 号機の汚染水の結果（4 月 13 日分析時点の値）[3] を示す．当初は $\gamma$ 線分析のみであった[4] ため，$\beta$ 放出核種の Sr-89 や Sr-90（と放射平衡にある Y-90）については，ORIGEN2[5] などの核的燃焼計算コード（燃料組成や照射履歴が必要）によって燃料中の核種組成を算出して，これと核種の化学的性質に依存する移行率[6] から，汚染水中の濃度が推定された．

表 1 の結果の特徴としては，Cs-134 の放射能濃度が Cs-137 と同程度であること，Sr-90 の濃度が Cs-137 の 1/20 程度であることが挙げられる．また，当初は比放射能が高く 10 日前後の短半減期の核種である I-131 や Ba-140 の影響が顕著であったが，今後は，年オーダーの半減期をもつ Sr-90，Cs-134，Cs-137 がより重要となると言える．さらに，表 1 の汚染水を 50,000 $m^3$ 処理した場合の放射性セシウム量を試算すると，約 46 kg となる．この量は，スリーマイル島原子力発電所（the Three Mile Island Unit 2, TMI-2）の冷却水喪失事故（loss-of-coolant accident, LOCA）で発生して，ゼオライトによって処理された汚染水中の放射性セシウム量（すべてを Cs-137 として最大 4 kg 弱）[7] と比べて大きく，このことからも，今回の原発事故の規模がうかがい知れる．

**表** 1　汚染水の核種分析データ[3]．*1 上記の核種の娘核種（放射平衡の状態）*2 娘核種 Ba-137m と放射平衡の状態

| 核種 | 半減期 | 比放射能 (Bq/g) | 放射能濃度 (MBq/mL) |
|---|---|---|---|
| Sr-89 | 50.53 d | $1.1 \times 10^{15}$ | 0.70 |
| Sr-90 | 28.79 y | $5.1 \times 10^{12}$ | 0.14 |
| Y-90 *1 | 64.10 h | $5.1 \times 10^{12}$ | 0.14 |
| I-131 | 8.040 d | $4.6 \times 10^{15}$ | 2.0 |
| Cs-134 | 2.062 y | $4.8 \times 10^{13}$ | 2.6 |
| Cs-137 *2 | 30.04 y | $3.2 \times 10^{12}$ | 2.8 |
| Ba-140 | 12.75 d | $2.7 \times 10^{15}$ | 0.24 |
| La-140 *1 | 1.678 d | $2.7 \times 10^{15}$ | 0.20 |

さて，この汚染水中の放射性核種をゼオライトなどの吸着剤によって処理する訳であるが，3 月末の時点では，どのように処理が行われるかはわからなかったため，処理前の汚染水，汚染水に少量の吸着剤を分散させる処理（バッチ法）またはカラムに吸着剤を充填して汚染水を流通する処理（カラム法），処理後の廃棄ゼオライトの一時貯蔵のケースを想定して，それぞれのケースで発生する水素量を事前に評価した．

事前に評価するにあたっては，それぞれのケースで吸収される放射線エネルギー量（吸収線量）の評価が必要となるほかに，それらに対応する水素の発生収量（observed yield）が必要となる．この収量は処理前を除いて吸着剤が共存した水溶液に対するものであり，これまで我々[8] を含めて国内外の研究者が進めてきた研究対象である．ここで，酸化物の粉末／微粒子を用いた研究[9] がおもに行われてきたが，吸着剤であり複合酸化物のゼオライトを用いた研究[10,11] も行われている．

これらの報告を踏まえて，汚染水のみの場合の収量として 0.01 $\mu$mol/J（低 LET 放射線による水の分解の 1 次収量（primary yield）の 1/4 程度）を，汚染水に吸着剤が共存している場合の収量として 0.1 $\mu$mol/J（汚染水のみの 10 倍を想定）を，放射線の線質，汚染水の酸性度（pH）や塩濃度に依存しない，安全サイドに立った保守的な値として与えた．これらの値を与えたことは，気相

に放出された水素の収量が水の放射線分解のスパー反応後の値として定義される 1 次収量と必ずしも同じではないことや，単相かつ密閉の純水系と異なり，水素濃度が平衡に達することなく吸収線量の増加とともに直線的に増加するといったことを意味する．

各ケースでのエネルギー吸収量評価の詳細については後述するが，ほとんどが汚染水の場合の吸収線量率を約 10 Gy/h，ほとんどが吸着剤の場合の吸収線量率を約 1.2 kGy/h（放射性セシウムが 400 倍濃縮され，70% の $\gamma$ 線と 100% の $\beta$ 線が吸収されたと仮定）と見積もり[4]，各ケースでの水素発生率を評価した．

その結果，処理前またはバッチ処理時では汚染水 1 t あたり約 0.1 mmol/h (= $0.01\times10^{-6}\times10\times1000$)，カラム処理時または処理後では吸着剤 1 t あたり約 0.12 mol/h (= $0.1\times10^{-6}\times1.2\times10^{3}\times1000$) と評価した．

以上のように，3 月末時点で水素発生率を事前に評価したが，より具体的に評価するために，汚染水の主成分である海水，および放射性セシウムの吸着剤の候補として考えられたゼオライトを用いて，照射実験を行う必要があったことは言うまでもない．

## 3　水素発生量の測定と評価

### 3.1　Co-60 $\gamma$ 線照射実験による発生収量の測定[2)]

照射実験は 4 月上旬から始めたが，汚染水の処理が 4 月中に始まる可能性も指摘されていたため，実験データの取得を急ぐ必要があった．また，ガスクロマトグラフィー（GC）による水素の分析は一般に 1 試料につき 20 分程度の時間を要するため，一度に多くの試料や条件では実験できず，優先順位をつけて行った．

そこで，海水のみ，1 wt% のゼオライトを添加した海水，50 wt% 程度のゼオライトを添加した海水の試料をそれぞれ処理前，バッチ処理時，カラム処理時と処理後のケースに対応させて，それらの試料に対して温度変化，海水希釈，水分量変化などの条件の実験を順に行った．ここで，試薬として使用した海水は大洗海岸で採取したものを入手して，ゼオライトは前述で紹介した活動の吸着試験[1)] で用いたものを入手した．

照射実験で得た結果の一例として，水素発生量の吸収線量依存性を図 2 に示す．どの水素発生量も吸収線量の増加とともに直線的に増加して，それらの傾きは純水のみ，約 50 wt% のゼオライトを添加した海水，1 wt% のゼオライトを添加した海水，海水の順に大きくなった．それらの傾きから直接，水素発生収量 ($\mu$mol/J) を求めることができて，それぞれ 0.01（純水），0.035（50 wt% 添加），0.049（1 wt% 添加，海水）となった．海水での収量

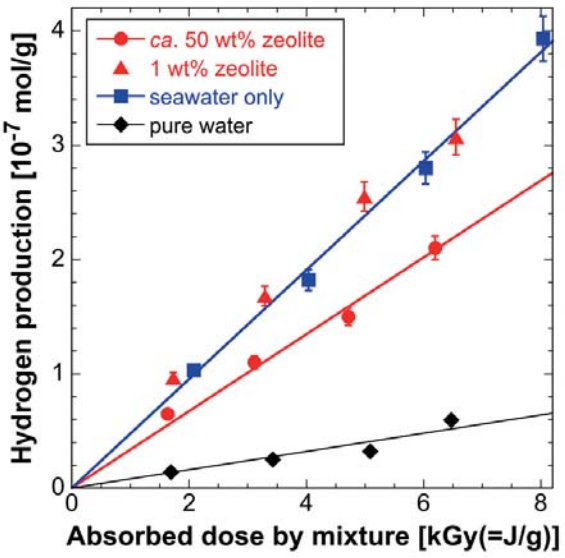



**図 2**　ゼオライト–海水混合系での水素発生[2)]．
照射条件：空気飽和，室温，線量率 1–4 kGy/h

が水の分解の 1 次収量（0.047）とほぼ同じになったが，このことは，海水には 500 mmol/L 程度の塩化物イオンのほかに 1 mmol/L 程度の臭化物イオンが含まれているため，これが水の分解生成物の OH ラジカルなどによる水素の酸化反応を効果的に抑制している[12)] ことを示している．このため，海水のみの試料を純水で希釈した実験において，依然として高濃度の塩化物イオンが溶解している条件でも，収量の低下が確認された．また，約 50 wt% のゼオライトを添加した海水での収量（0.035）が海水での収量の半分（0.025）よりも大きくなったことは，放射線の水へのエネルギー付与だけでなく，ゼオライトへのエネルギー付与に起因して水の分解が起きていることを示している．ただし，これによって起きる水の分解が効率的でないことから，ゼオライトに付与されたエネルギーの大半は，熱としての蓄積や構造材の損傷に費やされるものと考えられる．

以上の結果を汚染水処理にあてはめて考察すると，汚染水中では，水素濃度が平衡に達することや，水素発生収量が液の深さとともに低下すること[13)] は見込めない．また，密閉系の場合，ガス発生にともなう内圧上昇で気相中に放出された水素が液相に再溶解したとしても，発生した水素量が液相中の酸化反応で減少することは期待できない．つまり，密閉系を開放すると，液相中の水素が気相に再放出することになる．これらのことは核燃料の冷却水として海水を使ったことに起因しており，

TMI-2 事故[7] では考慮する必要のなかったことである．ただし，いずれの場合でも，水素発生収量が水の分解の 1 次収量を上回らないことがわかった．

### 3.2 処理前とバッチ処理時の発生率の評価

汚染水中に吸収される放射線エネルギー量を評価するには，まず，汚染水に含まれる放射性核種から発生する崩壊熱（decay heat）を求める必要がある．放射性核種ごとの崩壊熱は ORIGEN2 用のライブラリである崩壊データ[14] に「ニュートリノを含まない回収可能な平均放出エネルギー $Q_{REC}$（MeV）」として与えられている．また，これは，1 壊変あたりに核種から放出される β 線と γ 線のエネルギー（MeV/Bq）の和と考えることができるため，$Q_{REC}$ からすべての γ 線のエネルギーの和を差し引く，あるいは，$Q_{REC}$ からすべての β 線の平均エネルギーの和を差し引くことで，それぞれを分離した．

ここで，β 線の最大エネルギー $E_{max}$ と平均エネルギー $E_{avg}$ との関係は，崩壊データに記載のデータをプロットすることで得られる（図 3）．一般的に「$E_{avg}$ は $E_{max}$ の 1/3」と言われているが，これは $E_{max}$ = 1 MeV 付近では成り立つが，$E_{max}$ > 1 MeV になると $E_{avg}$ が $E_{max}$ の 1/3 よりも大きくなり，$E_{max}$ = 5 MeV では $E_{avg}$ が $E_{max}$ のほぼ 1/2 になることがわかる．

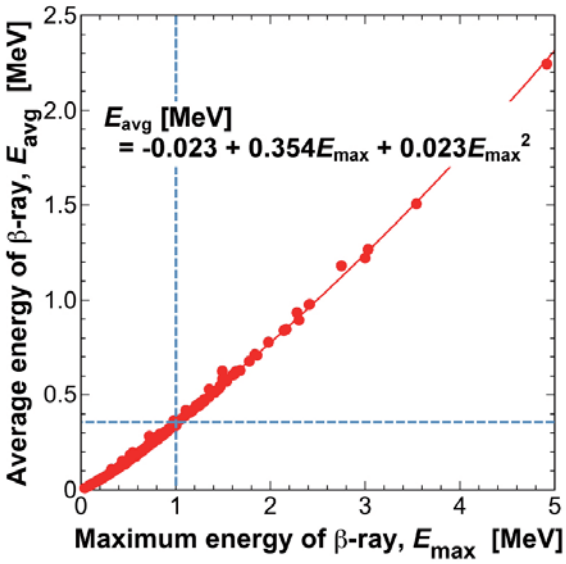



**図 3** β 線の最大エネルギーと平均エネルギー．Cl-38 から Pr-144 までの 28 核種からの β 線[2] に対するプロット

さて，表 1[3] と上述の崩壊熱（MeV/Bq）から，汚染水の吸収線量率を評価する．放射性核種から発生する β 線と γ 線がすべて汚染水に吸収されると仮定すると[15]，汚染水の線量率は短半減期の I-131 などを除いて約 4.1 Gy/h と評価できる．ここで，汚染水中の β 線と γ 線の全放射能濃度がそれぞれ 6.4 MBq/mL，8.2 MBq/mL であることから，1 壊変あたりの β 線と γ 線の平均放出エネルギーはそれぞれ約 0.24 MeV，0.69 MeV となる．Co-60 γ 線（平均 1.25 MeV）による照射実験で得た収量が，0.1–20 MeV の電子線や γ 線の低 LET 放射線に対して適用できることから，前述の実験で得た水素発生収量を，線質依存性を考慮せずに，水素発生率の評価に適用しても差し支えないと考えられる．

そこで，水素発生収量を海水での値 0.049 μmol/J として，処理前とバッチ処理時の水素発生率を見積もると，汚染水 1 t あたり，モル数表記で約 0.2 mmol/h，標準状態（0 °C，101.325 kPa）での体積表記で約 4.5 mL/h となった．この発生率は前述の事前評価の倍となったが，これは，海水での収量が水の分解の 1 次収量と同等であることの影響が大きい．また，汚染水には最大 100 ppm の油分[3] が含まれているが，これによって処理前の発生率が上昇することが懸念される．しかし，6 月末に開始された原子炉への処理水による循環注水冷却のせいか，汚染水中の塩濃度の低下が確認されており，この脱塩などで処理前の発生率が低下していくことが期待される．

### 3.3 カラム処理時と処理後の発生率の評価

カラム処理を行う場合，遠隔操作などで吸着塔を安全に取り扱うためには，放射性核種の吸着量を制限する必要がある．TMI-2 事故で発生した汚染水の処理では，廃棄吸着塔内の崩壊熱は 300 W 未満であった[7]．そこで，前述の汚染水を処理して，吸着塔内の放射性セシウム（Cs-134 と Cs-137）からの崩壊熱が 300 W（1.1 MJ/h）であるとして水素発生率を評価する．これは，吸着塔内の吸着剤量が 1 t の場合，放射性セシウムが約 0.026 wt% で吸着していることに相当する．

吸着塔内に吸収されるエネルギー量の評価にあたり，当初は放射性核種の吸着量を先に想定して，吸着塔内の崩壊熱を求めていた．しかし，吸着塔の設計手順としては，吸着塔の外部での被ばくや内部での発熱を考慮して，吸着塔内の核種からの崩壊熱を設定した上で，一時貯蔵や最終処分でのスペースや廃棄物の減容を考慮して，吸着塔のサイズや核種の吸着量を決めるのが妥当であると思われる．また，何よりも，吸着塔のサイズや核種の吸着量の決定過程に影響を受けずに，水素発生率を合理的に評価できることになる．したがって，ここでは，吸着

塔内の崩壊熱を先に与えた場合の評価結果を示す．

さて，放射性セシウムからのβ線とγ線がすべて吸着塔内の吸着剤と水分との混合物に吸収されるとして，50 wt% のゼオライトを添加した海水での水素発生収量 0.035 μmol/J を用いて，カラム処理時と処理後の水素発生率を見積もると，モル数表記で約 39 mmol/h，標準状態での体積表記で約 0.9 L/h となった．この発生率は，TMI-2 事故での廃棄吸着塔内の水素発生量の水分濃度依存性から[16]，吸着塔内の脱塩処理ならびに脱水処理によって低下することが期待できる．

以上のように，6 月中旬に開始した汚染水処理に先行して，汚染水処理の各ケースでの水素発生率を照射実験にもとづき評価することができた．

### 3.4　処理後の発生率の詳細評価と酸素発生

実際の汚染水処理に際しては，処理装置の仕様（方式，サイズ，吸着剤充填率など）や吸着核種量から，装置内に吸収される放射線エネルギー量を評価して，吸着剤と水分の割合に応じた水素発生収量を用いて，水素発生率を求めることになる．とくに，処理後において前述よりも詳細に評価を進めるためには，吸着塔内の放射線の透過や発熱を考慮する必要がある．

放射性核種から放出されるβ線の透過の参考として，図 4 に電子線によるゼオライトへのエネルギー付与（電子線深部線量分布）[17] を示す．ここで，ゼオライトの実効原子番号 $Z_{eff}$ = 11.6，実効質量数 $A_{eff}$ = 23.0 とした．エネルギー付与，連続減衰近似（continuous slowing down approximation）の飛程ともに，水の場合に近い．

図 4 によると，1 MeV の電子線は 5 mm 程度のゼオライト中で吸収され，2 MeV でも 10 mm 未満で吸収されることがわかる．また，金属材料ではβ線の制動放射も重要であるが，ゼオライト中では制動放射によるエネルギー付与は 1% 未満であり，1 MeV 電子線からの制動放射でも 10 mm 程度で吸収されることがわかった．したがって，核種から放出されるβ線はすべて吸着塔内で吸収されると考えて差し支えない．

ゼオライトへの吸着核種を放射性セシウムのみとすると，崩壊熱の 80% 以上がγ線に起因する．このことからも，γ線の吸収と透過は吸着塔の内部でのエネルギー吸収ならびに外部での被ばくにとって重要である．吸着塔内でこれらを評価するには，ゼオライトと水の質量エネルギー吸収係数 $(\mu/\rho)_{en}$ または質量減弱係数 $(\mu/\rho)$[18]，および密度が必要になる．その際，乾燥状態ではゼオライトの見かけの密度（0.6–1.0 g/mL 程度）が必要であるが，水分を含む状態ではゼオライトに水が付着，吸着するため，その真密度（2.3 g/mL 程度）も必要になる．

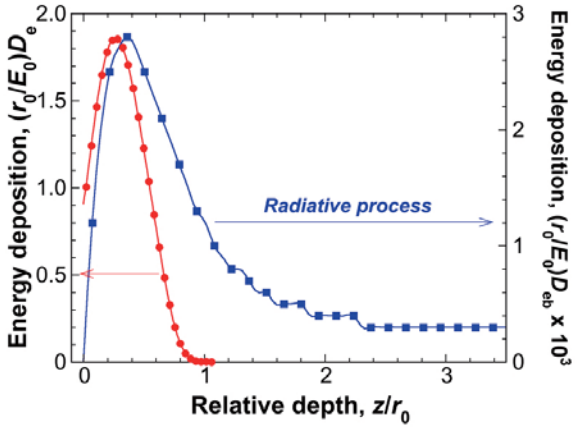



**図 4**　電子線によるゼオライトへのエネルギー付与．入射エネルギー $E_0$ = 1.0 MeV（csda 飛程 $r_0$ = 0.527 g/cm$^2$）の場合．$D$：エネルギー付与（MeV cm$^2$/g），$z$：深さ（g/cm$^2$）

評価例として，見かけの密度が 1.0 g/mL で真密度が 2.35 g/mL のゼオライト[19] 中のγ線の吸収を考えると，I-131 から Cs-134 に対応する 0.4–0.8 MeV のγ線は，乾燥状態では 10 cm，30 cm，50 cm の透過長に対してそれぞれ 26%，59%，77% 吸収されるが，ゼオライトの細孔に水が満たされた状態ではそれぞれ 38%，77%，91% 吸収されることになる．

核種からの崩壊熱は放射線分解だけでなく，吸着塔内の発熱を起こし，これにともない温度分布や熱伝導が生じる．TMI-2 事故での廃棄吸着塔の埋設に関する報告[20] を参考にすると，吸着塔（崩壊熱 230 W）の表面が 60 °C，中心が約 190 °C となっていた．この温度分布は，ゼオライトの熱伝導性に依存している．

大まかな計算ではあるが，ゼオライトの熱伝導度を 0.159 W/mK として円筒状固体内の熱伝導を考えると，崩壊熱の 10% 程度にあたる約 30 W の熱が吸着塔外に放出される．さらに，水素などのガスが高温で放出されることでも，崩壊熱の一部が消失することになる．また，温度が 110 °C 以上になると，ゼオライトは付着水や吸着水を失うため，上述のような温度分布によって水分の密度に偏りが生じ，吸着塔内の場所や脱水処理の程度によって，放射線の透過や水素発生率が異なることになる．これらを評価する際には，さらに図 5 に示すように，吸着塔内の汚染水の注入口と処理水の排出口の位置に対応して，核種のゼオライトへの吸着に高さ方向の不均一性がある[21] ため，これも留意する必要がある．

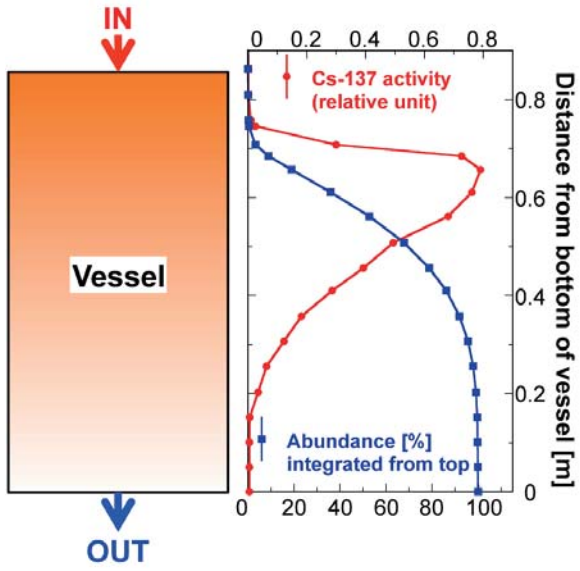



**図 5**　吸着塔内のセシウム吸着の不均一性[21)]

他方，水素以外に酸素の発生も考慮する必要がある．これは水の放射線分解で生成した過酸化水素の，熱分解または二酸化マンガンなどの触媒による分解（$H_2O_2 \rightarrow H_2O + 1/2O_2$）で起こる．熱分解では 100 °C 以上での分解が顕著で，過酸化水素の 1 次の分解速度（$s^{-1}$）は $3\times10^{-5}$（100 °C）から $1\times10^{-2}$（200 °C）と，アレニウス的に増加するとの報告[22)]がある．この報告は水溶液中の結果であるため，ゼオライトに付着した過酸化水素の場合，より高速になることが予想される．

TMI-2 事故での廃棄吸着塔内においても，酸素発生が確認されており[7)]，その発生量は水素発生量の 1/2 未満であった．これは，温度分布をもつ吸着塔内において，水の放射線分解で生成した過酸化水素の半分程度が熱分解されることを示している．また，吸着塔によっては酸素がほとんど発生しない場合があるが，これを報告では混入した有機物の酸化反応による発生酸素の消費としているが，この吸着塔内の崩壊熱が上述の例[20)]に比べて著しく小さいこと（30 W 程度）から，温度が上がらず，過酸化水素の熱分解が起こらなかったことで説明できる．

以上のことは，処理後の吸着塔の一時貯蔵，吸着塔内の脱塩や脱水，廃ゼオライトの減容などの状況変化に応じて，その都度，議論や評価を行う必要がある．

## 4　その他の放射線効果の可能性

水素発生以外に汚染水処理で起こる可能性のある放射線効果として，まず，吸着剤の核種保持能力の低下が挙げられる．吸着剤であるゼオライトは多孔質のアルミノケイ酸塩であり，4 価のケイ素 $Si^{4+}$ が 3 価のアルミニウム $Al^{3+}$ に置き換わることで不足した正電荷を 1 価や 2 価の陽イオンが補うため，ここがセシウムなどの核種のイオン交換による吸着部となり，細孔のサイズによってゼオライトの分離能が決まる．このため，ゼオライトの構造破壊などで，吸着核種が放出される可能性がある．

ゼオライトによる吸着セシウムの保持については，300 MGy の照射でも維持されるという報告[16)]がある．一方，吸着のメカニズムは異なるが，銀ゼオライトに吸着したヨウ素（ヨウ化銀）ついては，500 kGy 照射でヨウ素酸またはヨウ素分子の形で脱着する[23)]ことが報告されている．実際の処理では，ゼオライトのイオン交換容量に対する核種吸着量，構造破壊される吸着剤量は極めて小さいと考えられるため，直ちに吸着核種が放出されるとは考えにくい．いずれにしても，報告例が少ないため，吸着核種をとりまく化学環境を反映した照射実験を行い，核種保持に関して検証することが必要である．

また，今回の原発事故では冷却水として海水を利用したため，処理装置の配管などの金属材料の腐食が懸念される．高濃度塩化物イオン水溶液の放射線分解に関する研究[24)]によると，腐食に関与する酸化性の生成物である塩素酸イオン $ClO_3^-$ の生成収量（$\mu$mol/J）は，塩化物イオン濃度とともに 0.072（5 mol/L），0.016（3 mol/L）と減少するため，海水（0.5 mol/L）を含む汚染水では，吸収線量が余程蓄積されない限り，塩素酸イオンは生成しない．脱酸素のためにヒドラジンを投入したことや，汚染水の淡水化や吸着塔内の脱水が今後進むことを考え合わせると，放射線分解生成物によって腐食が起こることは考えにくい．ただし，金属材料の放射線による損傷や残留する塩化物イオンによる耐食性の劣化が考えられるため，長期間の処理ならびに貯蔵の観点から，汚染水処理での腐食の検討を進めるべきである．

## 5　おわりに

今回のゼオライトによる汚染水処理での放射線効果の検討は，異なる分野の専門家の関与や多くの方々の協力があって，当初の予定通りに進めることができた．私の所属する研究部門では，部門長を筆頭に，核種吸着や環境保全などの化学分離に関する専門家，原子炉から放出される核種組成などの核データ評価に関する専門家の

方々と，グループの枠を超えて相互に連絡を取りながら，汚染水処理をはじめとする，多くの課題に取り組んだ．また，高崎量子応用研究所，なかでも環境材料プロセシング研究グループの方々には，照射実験を円滑に進める配慮と協力をいただいた．こういった連携が迅速かつ適切に行われることこそ，原発事故という難局を乗り越える鍵であることを痛切に感じた．

福島第一原子力発電所では，6 月中旬に汚染水処理が油分分離（ゼオライト），セシウム吸着（ゼオライト），除染（凝集沈殿による放射性核種の分離），淡水化（逆浸透（RO）膜）の一連の装置構成で開始された．この処理が行われているなかで，処理後の吸着塔や廃スラッジの蓄積，新たな吸着装置の計画が進行している．

これに関連あるいは対応して，伝熱・ガス流動解析，詳細な条件での水素発生収量の取得など（図 1），重要と考えられる課題について，現在も研究を進めている．

## 参考文献


1) 日本原子力学会 バックエンド部会, 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集, http://www.nuce-aesj.org.
2) Y. Kumagai, R. Nagaishi, A. Kimura, M. Taguchi, K. Nishihara, I. Yamagishi, T. Ogawa, *14th International Congress of Radiation Research* **2011**, 176; 熊谷友多, 永石隆二, 木村 敦, 田口光正, 西原健司, 山岸 功, 小川 徹, 日本原子力学会 和文論文誌 掲載予定, **2011**.
3) 東京電力, タービン建屋溜まり水分析結果（JAEA）, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110522_04-j.pdf.
4) *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs*, Nuclear and Industrial Safety Agency, Japan Nuclear Energy Safety Organization, **2011**.
5) A. G. Croff, ORNL-5621, Oak Ridge National Laboratory, **1980**.
6) *Airborne release fractions/rates and respirable fractions for nonreactor nuclear facilities*, DOE-HDBK-3010-94, U.S. Department of Energy, **1994**.
7) G. J. Quinn, J. O. Henrie, J. Greenborg, GEND-035, EG&G Idaho, Inc., **1984**.
8) N. Aoyagi, R. Nagaishi, F. Esaka, R. Yamada, *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 890; R. Yamada, R. Nagaishi, Y. Hatano, Z. Yoshida, *Int. J. Hydrog. Energy* **2008**, *33*, 929.
9) J. A. LaVerne, L. Tandon, *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 380.
10) M. Nakashima, Y. Aratono, *Radiat. Phys. Chem.* **1993**, *41*, 461; M. Nakashima, N. M. Masaki, *Radiat. Phys. Chem.* **1996**, *47*, 241.
11) A. Cecal, A. Macovei, G. Tamba, O. Hauta, K. Popa, D. Ganju, I. Rusu, *Rev. Roum. Chim.* **2008**, *53*, 203.
12) R. Nagaishi, Y. Kumagai, *Chapter 8 Radiolysis of water* in *Nuclear Hydrogen Production Handbook*, ed. by R. Hino, X. Yan, CRC Press of Taylor and Francis Group, LLC, **2011**, pp. 177–187.
13) 中吉直隆, 宮田定次郎 日本原子力学会 和文論文誌 **1995**, *37*, 1119.
14) J. Katakura, H. Yanagisawa, JAERI-Data/Code 2002-021, Japan Atomic Energy Research Institute, **1994**.
15) *Regulatory Guide: Control of combustible gas concentrations in containment following a loss-of-coolant accident*, U.S. Nuclear Regulatory Comission, **1978**.
16) N. E. Bibler, R. M. Wallace, M. A. Ebra, DP-MS-81-18, E.I. du Pont de Nemours & Co., Savannah River Laboratory, Aiken, South Carolina, **1981**.
17) Electron-Material Interaction Database (EMID), http://www3.ocn.ne.jp/˜tttabata/emid/Welcome.htm.
18) J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, NISTIR 5632, National Institute of Standards and Technology, **1995**.
19) イズカライト（イズカ）, http://www.izuka.co.jp.
20) W. G. Jasen, S. J. Amir, WHC-EP-0083-1, Westinghouse Hanford Co., **1989**.
21) G. H. Bryan, R. W. Goles, C. A. Knox, D. H. Siemens, GEND-038, Pacific Northwest Laboratory, **1984**.
22) 伊藤尚哉, 昭和 62 年度卒業論文, 東大工学部原子力工学科 (1988).
23) E. R. Bance, D. K. Agrawal, *J. Mater. Sci.* **1982**, *17*, 1889.
24) M. Kelm, E. Bohnert, FZKA 6977, Forshungszentrum Karlruhe GmbH, Karlsruhe, **2004**.

特 集 記 事

# 低線量放射線の人体影響を考察する

放射線医学総合研究所　島田 義也*, 西村 まゆみ, 今岡 達彦, 柿沼 志津子

On March 11, 2011, an earthquake categorized as 9 Mw occurred off the northeast coast of Japan. The subsequent destructive tsunami disabled emergency units of Fukushima Dai'ichi Nuclear Power Plant and caused partial meltdown of reactors and explosions. Resulting radiation releases forced large evacuations, bore concerns about food and water and fears against human health. In this manuscript, we described the effect of radiation, especially low dose radiation below 100 mSv, on cancer risk, focusing on fetuses and children.

**Keywords:** Fukushima Dai'ichi Nuclear Power Plant, cancer, children, fetus, radiation

## 1　はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大地震によって，東京電力福島第一原子力発電所において稼働していた原子炉は自動停止し，大量の放射性物質の放出がおきた．3 月 12 日正門前の放射線の空間線量は増加し，1 号炉が爆発して，半径 20 km 以内の住民に避難が指示された．続く 14 日に 3 号炉でも爆発があり，15 日の線量率は毎時 400 mSv と高い値を示した．

## 2　住民の被ばく

原子炉から，揮発性のヨウ素（I-131），セシウム（Cs-134, Cs-137）などの種々の放射性物質が大気中に飛散した．放出量は I-131 が 1.3–1.5 万 TBq（テラベクレル），Cs-137 が 0.6–1.2 万 TBq で，チェルノブイリの 10 分の 1 程度であると報告されている．放出された放射性核種はプルームとして上空を漂い外部被ばくと大気の吸入による内部被ばくをもたらした．さらに，雨により地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく，そして野菜，水，原乳などの食物からの内部被ばくと進んだ．プルームの一部は，関東にまで飛来し 3 月 22 日東京都の水道水にヨウ素（I-131）が検出され，パニックになった．3 月 17 日，厚生労働省は食品の暫定規制値を設定し，規制値を上回る食品が市場に出ない措置を講じた．しかし，その後もお茶，牛肉から規制値以上のセシウムが検出されており，食品などを通じた内部被ばくに対する不安は収まっていない．

今回の事故初期には，吸入や食物，水，そして牛乳の摂取による放射性ヨウ素やセシウムの体内取り込みが心配された．そして数ヶ月経って，物理的半減期の長いセシウムの取り込みと，環境に降り注いだセシウムからの低線量率の長期外部被ばくが問題となっている．

## 3　自然環境からの放射線

ヒトは普段から自然の放射線を浴びている．ビッグバン，超新星爆発により種々の放射性物質ができ，星が生まれた．地球は生まれたときは現在より宇宙線と大地からの放射線が多かったと考えられている．そのなごりとしてまだ地球に残っているのは，ウランやトリウム，カリウムなどである．現在，地球上の我々は，宇宙と大地からそれぞれ年間 0.39 mSv，0.48 mSv の放射線を外部被ばくしている．また内部被ばくとして，食物から 0.29 mSv（主なものは K-40 で，大人一人あたり 4000 Bq 体内に存在する），そして大気中のラドンから 1.26 mSv の放射線を被ばくする．世界平均で年間 2.4 mSv である．実際は地域によって 1–13 mSv のばらつきがあり，いくつかの場所では年間 10–20 mSv の線量に達するところもある．日本は，自然放射線のレベルが低く，平均 1.5 mSv である．国内においても，地域によっては年間 0.3–0.4 mSv の差がある．つまり，生涯（80 年）で自然放射線を 120 mSv，地域差が大きいと生涯 30 mSv の被

A Consideration of Low Dose Radiation Effects on Human Health
Yoshiya Shimada*, Mayumi Nishimura, Tatsuhiko Imaoka and Shizuko Kakinuma (*National Institute of Radiological Sciences*),
〒263–8555 千葉市稲毛区穴川 4–9–1,
TEL: 043-206-3221, FAX: 043-206-4138,
E-mail: y_shimad@nirs.go.jp

ばく線量の差があるのである．今回の事故によるさらなる上乗せが問題となる（図 1）．除染や生活における行動を通して，被ばく線量を小さくすることが急務である．

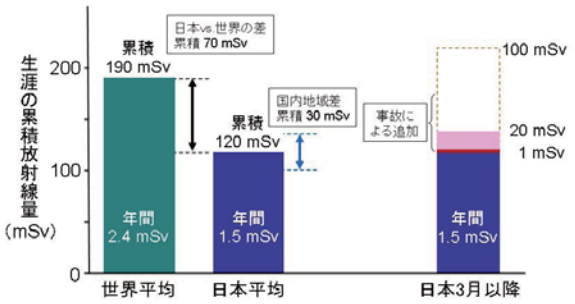



**図 1**　生涯（80 年）に被ばくする自然放射線量

## 4　人体への影響

さて，ヒトが放射線被ばくするとどのような影響がでてくるのだろうか．大きく，確定的影響と確率的影響に分けることができる（図 2）．確定的影響は，比較的高線量（100 mGy 以上）の放射線を被ばくした後，数時間から数ヶ月で出てくる影響である．例えば，「髪が抜ける」「子どもが産めなくなる」などの症状である．これらの放射線影響は，臓器を構成している細胞が被ばくによって相当数死んでなくなることが原因である．また，白内障も確定的影響である．確定的影響の特徴は，被ばく量がある値を超えて初めてでてくるということで，この値を ‘しきい値’ と言う．一番小さなしきい値は，男性の一時不妊で，100 mGy である．

一方，確率的影響は，100 mGy（実効線量で 100 mSv）未満の低線量でも発生することが否定できない影響であり，しきい値がないと考えられている（図 2）．確率的影響には，発がんと，被ばくしたヒトの子孫にあらわれる遺伝性（継世代）影響が含まれ，これらの影響は，1 つの細胞に発生した突然変異や染色体異常が原因である．しかし，多くの疫学調査の結果は，高線量域では発がんリスクの増加が認められるものの，100 mSv 程度以下の低線量域では不確かさやばらつきが大きくなる．リスクはゼロではないと考えられるが，統計的に有意な差は認められていないことが多い．また，遺伝性影響については，実験動物のハエやマウスなどでは観察されているが，ヒトでは観察されていない．調査集団のサイズが小さいことが原因かもしれない．サルなどの研究では種差が大きいことが示されているが，ヒトでみられない理由は未だ不明である．

## 5　放射線によるリスク：線量と低線量率長期被ばく[1)]

がんは，造血系のがんである白血病と肺がんや大腸がん，乳がんなどの固形がんに分けられる．放射線発がんのリスクを考える上での特徴は，発がんには「時間」がかかるということである．感染症であれば，感染後数日で症状が現れ，早い場合は 1 週間以内に生命の危機が訪れることがある．しかし，被ばくによる発がんは，白血病の場合被ばく後 2，3 年して，固形がんは 10 年以上経ってからでないと発症してこない．また，同じく大切なことは，発がんリスクの大きさは「被ばく線量」に依存するということである．被ばく線量と白血病の発生率 (死亡率) の関係は直線 2 次式であり，増加の割合は線量が高くなるほど大きくなる．一方，固形がんは直線的に増加する．しかし，線量を小さくしていくと，原爆被爆者の調査では，白血病で 200 mSv，固形がんで 50–100 mSv 以下の線量で，非被ばく群のリスクと統計的に有意でなくなる[2)]（図 3）．原爆調査以外にも，いくつもの 100 mSv 未満の被ばくによるがんリスクが検討されている．例えば，15 カ国の原子力発電所の作業者の健康調査は，累積個人線量が平均 19 mSv と低い線量であるが，固形がんの過剰相対リスクが 0.97/Sv (95% 信頼区間：0.14, 1.97) で原爆被爆者の 3 倍もある[3)]．慢性リンパ性白血病を除く白血病の過剰相対リスクは 1.93 /Sv である．これは，低線量・低線量率の被ばくにおいても，小さくとも過剰がんリスクが存在することを示している．しかし，この調査では，たばこなどの交絡因子に関する情報がない．この調査に利用された日本人の作業者は，喫煙量やアルコールの飲酒量が，累積放射線線量の高い者に多かったと報告されている．また，カナダの作業者のリスクが飛び抜けて高いが，これは対照群の設定の仕方によりリスクが影響を受けることが後に報告されている[4)]．

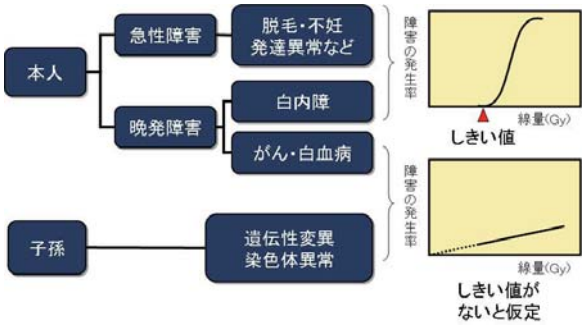



**図 2**　放射線影響の分類

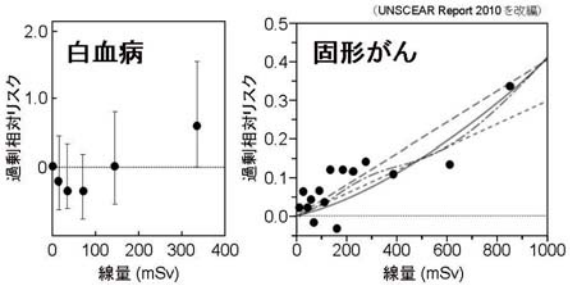



**図 3**　原爆被ばく者のがんリスク

一方，イギリスの放射線科医 100 年の研究は，追跡期間が慢性被ばくの中で最も長い調査である．放射線科医の被ばく線量が多かった 1954 年までの登録医は，がんのリスクが一般臨床医と比べ高い傾向にあったが，1955 年以降の登録医はがんリスクが小さくなっている[5]．この時期の放射線科医の被ばくは年間 5 mSv，生涯で約 100 mSv で，少しの被ばくががんリスクを低減することを示している．しかし，これは，healthy worker effect（より健康な調査集団が選ばれるための偏り効果）による可能性があると著者らは指摘している．がん以外の死亡が 1920 年以前の登録医でも低いことがそれを指示していると思われる．

100 mSv 未満の疫学調査は，原子力施設作業者，放射線科医技師，航空機乗務員，医療被ばく，環境放射線のレベルと関連した調査（エコロジカル研究）などいろいろあるが，リスクが増加したというもの，変わらないというもの，逆に低下するというもの等，一定した傾向がつかめない．つまり，積算線量として 100 mSv 未満のがんリスクは条件（交絡因子の存在や対照群の設定など）により影響を受けやすい不確実なものであると言うことである．言い換えれば，リスクはあったとしても小さいということなのであろう．

放射線の長期被ばくによる健康影響を示唆するいくつかの報告がある．ウラル地方の Mayak プルトニウム施設から，1946–1956 年に大量の放射性廃棄物がテチャ川に放出され，周辺住民が Cs-137 と Sr-90 による慢性の外部と内部の被ばくを受けた．平均積算線量は 40 mGy である．白血病の過剰相対リスクは 4.2 /Gy，固形がんのそれは 0.92 /Gy と高い[6]．しかし，線量評価の問題（最近では，子どもの内部被ばく線量が大幅に見直された）や診断の不統一，化学物質の曝露などの問題が指摘されている．一方，中国やインドでは，自然放射線の高いところの住民の健康調査が行われている．インドのケララ州はモナザイトが多く，平均 γ 線で 4.5 mSv，ラドンによる内部被ばくで 2.4 mSv，高いところは年間 16 mSv の被ばく量になる．この地区では，住民のがん死亡の過剰相対リスクは 600 mSv でも増加していない[7]．がん登録がしっかりしており，比較的信頼できるデータである．

国際放射線防護委員会（ICRP）では，主に原爆被爆者の高線量のデータを元に低線量でも直線性が当てはまるとして，100 mSv あたり 0.5% の生涯がん死亡の増加として規制値の提案をしている[1]．現在，日本人の死亡原因の約 30% ががんである．全員が 100 mSv の被ばくをすると，0.5% のがん死亡の増加は，図 4 のようになる．がんの原因が，たばこや食事などの生活習慣が主であることを考えると，0.5% の増加は，生活習慣の変化による変動幅に入ってしまう感じで，このリスクを捕まえるのに調査集団の生活習慣を調整することが重要なのは理解できる．

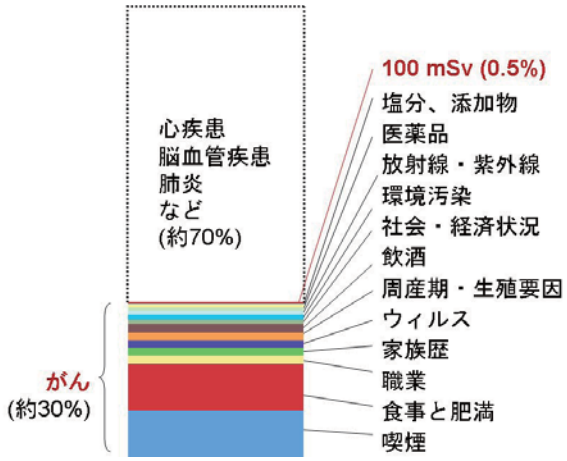



**図 4**　ヒトのがんによる死亡割合と原因

## 6　胎児・子供の被ばく

今回の事故では，胎児，子どもへの影響に対する不安が続いている．従って，政府は，妊婦，子どもを持つ母親へ適宜メッセージを発信することが大切であろう．

胎児期は，着床前期・着床期（受精から 2 週），器官形成期（3–7 週），胎児期（8 週以降）に分かれる．着床前の胚は放射線感受性が高く，100 mSv 以上の被ばくで胎児死亡がおこる．しかし，母親は気がつかないことが多い．個々の臓器の原基が形成され，細胞が活発に増殖分化する器官形成期の被ばくでは，奇形が誘発される．この時期は，薬剤投与やウィルス感染によって奇形の起こる時期と一致している．ヒトの被ばくの場合，小頭症が主である．8 週以降は脳の増殖分化が活発なときで，被

ばくによって重度精神発達遅滞や知能指数（IQ）の低下が起こる．これらの影響は 100 mSv 未満では増加しない[1]．

一般に胎児・子どもは放射線感受性が高い．組織の細胞が活発に分裂していて，放射線による傷の修復間違いが多く，また，発生した突然変異細胞のクローンが拡大するチャンスが大きいからである．また，被ばく後も長い年月を生きるので，変異細胞にさらに他の発がん物質による傷が蓄積し，悪性化する機会も多くなる．

胎児期の被ばくは，生後に小児がんを誘発する可能性がある．1950 年代のオックスフォード小児がん調査は，妊娠女性が X 線診断（線量は，10–20 mSv 程度）を受診したことで，小児白血病と小児の固形腫瘍が，対照群の 1.5 倍になったと報告している[8]．しかし，その後のコホート調査や対照・症例研究では，胎児期被ばくによるがんリスクの増加は認められていない[9]．動物実験では，胎児後期に被ばくすると卵巣がんや脳腫瘍が増えるという報告があるので，ヒトの胎児後期の被ばくでも一部のがんリスクが高い可能性は否定できない[10,11]．しかし，その場合も，10–20 mSv といった低線量のデータはない．近年，胎児期の被ばく後，成人になってのがんのリスクは子どもの被ばくに比べ小さいという結果が報告された[12]．ICRP では現在，安全サイドに立って，胎児期の被ばくは子どもの被ばくと同レベルのリスクがあるとして，防護することを提案している．

小児は被ばくによるがんのリスクが高いことが示されている．特に，白血病や甲状腺，乳腺，皮膚のがんである．ICRP では，被ばく時の年齢が 10 年高くなるにつれてがんリスクは 17% 減少する[1] としている．がんの生涯過剰罹患相対リスクは 10 才での被ばくは 40 才での被ばくに比べておおよそ 2 倍になるという計算だ．しかし，原爆被爆者のがん罹患でみると，10 才以下の子どもでも 500 mSv 以下の被ばくでがんリスクは上がっていない[13]．もちろん，調査人数が少ないこともある．小児の低線量・低線量率の被ばくによる発がんリスクは，今後さらに研究されなければならない課題である．

がん患者の数は少ない（年間 100 万人に 1 人いるかいないか程度）が，100 mSv 程度の被ばくでリスクが上がる可能性があるのが，「甲状腺がん」である．7 つの調査集団のプール解析から，15 才以下の外部被ばく患者の甲状腺がんのリスクは，直線的に増加し，過剰相対リスクは 7.7 /Sv と高い[14]．ただし，40 才以上の被ばくではリスクの増加はみられていない．今回の事故では I-131 が母乳に検出された（3 月 24 日で 32 Bq/kg，3 月 30 日には 9 Bq/kg）．水道水と野菜などの食品からの混入と考えられる．食品安全委員会は，乳児に対しては水道水のヨウ素は 100 Bq/L 以上は利用しないように勧告した．ただし，摂取した総放射能の量が重要なので，万が一与えたとしても少量であれば健康には影響がないとしている．例えば，乳児が総量として 400 Bq 摂取したとすると，甲状腺等価線量は 1.5 mSv，体全体の線量に換算した預託実効線量は，0.072 mSv である．I-131 の内部被ばくによる小児甲状腺がんの増加はチェルノブイリ事故で明らかとなった．事故 5 年後に，罹患率が 10 倍になった．最近のウクライナの 18 才以下の調査報告では，過剰相対リスクは 1.9 /Sv で，4 才以下のそれは 7.4 /Sv で高く，年齢とともにリスクは小さくなる．福島においては I-131 の内部被ばく線量が 100 mSv を超えていないと報告されている．一方，胎児については，チェルノブイリの調査によれば，原発から 150 km 圏内の胎児の甲状腺がんのリスクは 3 才以下の子どものそれの 3 分の 1 であった[15]．統計的には有意では無いが，北ウクライナでファールアウトから被ばくした胎児はリスクが逆に 3 倍ほど高いという報告もある[16]．胎児の甲状腺がんのリスクについては，今後も線量評価と合わせて，さらに研究が必要である．

## 7　おわりに

低線量被ばくで問題となるのは，発がんリスクである．ヒトのがんリスクの全ての要因のうち，喫煙や食事・肥満などの 30% と比べれば，放射線は紫外線と合わせて 2% 程度と推定されている．国立がん研究センターの報告によれば，100–200 mSv のがんリスクは，受動喫煙や野菜不足と同レベルである．また，がんは多段階であり，複数個の遺伝子の傷の蓄積が必要で，悪性化まで数年以上，多くのがんは 20 年以上もの時間がかかる．従って，悪性化する前に発がんを予防することが重要である．バランスのとれた食事，適度な運動などはがんのリスクを下げる．たばこやウィルスなどの他の要因への配慮も重要である．普段の食生活でヨウ素を多く含む食品を適度に摂取していれば，甲状腺への I-131 の取り込みも少なく，排泄する速度も高くなる．東北地方は普段のヨウ素の摂取が多い地方なので，チェルノブイリと同レベルの放射性ヨウ素を取り込んだとしても発がんリスクは低いと予想される．放射線発がんの予防研究は急務である．

## 参考文献

1) *The 2007 Recommendation of the ICRP*, **2007**, Publication 103.
2) *UNSCEAR Report 2010*.
3) E. Cardis, M. Vrijheid, M. Blettner, E. Gilbert, M.

Hakama, C. Hill, G. Howe, J. Kaldor, C. R. Muirhead, M. Schubauer-Berigan, T. Yoshimura, *Br. Med. J.* **2005**, *331*, 77.
4) J. P. Ashmore, N. E. Gentner, R. V. Osborne, *J. Radiol. Prot.* **2010**, *30*, 121.
5) A. Berrington, S. C. Darby, H. A. Weiss, R. Doll, *Br. J. Radiol.* **2001**, *74*, 507.
6) L. Y. Krestinina, D. L. Preston, E. V. Ostroumova, M. O. Degteva, E. Ron, O. V. Vyushkova, N. V. Startsev, M. M. Kossenko, A. V. Akleyev, *Radiat. Res.* **2005**, *164*, 602.
7) R. R. K. Nair, B. Rajan, S. Akiba, P. Jayalekshmi, M. K. Nair, P. Gangadharan, T. Koga, H. Morishima, S. Nakamura, T. Sugahara, *Health Phys.* **2009**, *96*, 55.
8) A. Stewart, J. Webb, D. Hewitt, *Br. Med. J.* **1958**, *1*, 1495.
9) R. Schulze-Rath, G. P. Hammer, M. Blettner, *Radiat. Environ. Biophys.* **2008**, *47*, 301.
10) Y. Ishida, T. Takabatake, S. Kakinuma, K. Doi, K. Yamauchi, M. Kaminishi, S. Kito, Y. Ohta, Y. Amasaki, H. Moritake, T. Kokubo, M. Nishimura, T. Nishikawa, O. Hino, Y. Shimada, *Carcinogenesis* **2010**, *31*, 1694.
11) Y. Shimada, M. Nishimura, Y. Amasaki, Y. Shang, K. Yamauchi, T. Sawai, S. Hirano, T. Imaoka, Y. Yamada, T. Takabatake, S. Kakinuma, *Health Phys.* **2011**, *100*, 278.
12) D. L. Preston, H. Cullings, A. Suyama, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, K. Kodama, F. Kasagi, R. E. Shore, *J. Natl. Cancer Inst.* **2008**, *100*, 428.
13) D. L. Preston, E. Ron, S. Tokuoka, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, K. Kodama, *Radiat. Res.* **2007**, *168*, 1.
14) E. Ron, J. H. Lubin, R. E. Shore, K. Mabuchi, B. Modan, L. M. Pottern, A. B. Schneider, M. A. Tucker, J. D. Boice, *Radiat. Res.* **1995**, *141*, 259.
15) Y. Shibata, S. Yamashita, V. B. Masyakin, G. D. Panasyuk, S. Nagataki, *Lancet* **2001**, *358*, 1965.
16) E. Cardis, M. Hatch, *Clin. Oncol.* **2011**, *23*, 251.

受 賞 記 事

# アンジュレータ放射光による真空紫外〜軟 X 線領域における自然二色性研究

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門　田中 真人*

Natural circular dichroism (CD) measurements in the energy regions from vacuum ultraviolet to soft x-ray need the polarizing undulator as a light source. We have developed the CD measurement system in these energy regions by using the polarizing undulator and successfully observed the CD spectra of biomolecules at the first time.

**Keywords:** synchrotron radiation, vacuum ultraviolet, soft x-ray, amino acid, chirality

## 1　はじめに

自然円二色性（Natural circular dichroism; CD）はキラル物質の高次構造を敏感に反映することから，タンパク質の二次構造解析，有機分子のキラリティの決定など，特にライフサイエンス分野における重要なツールの一つとして広く利用されている．

CD は文字通り円偏光の左右での色の違い，すなわち吸収係数の違いのことであり，その計測のためには検出光を円偏光にし，かつその左右を変化させることが不可欠である．例えば赤外〜紫外の領域での市販の CD 分光計や放射光を用いた真空紫外域 CD 計測ビームラインでは，透過型の光学素子（直線偏光子ならびに光弾性変調子）を用いて，円偏光状態の光を発生させ，かつ高速（約 50 kHz）でその左右を変調させている．このような透過型の光学素子を用いる場合，その計測波長範囲はその素子の透過範囲で決定される．一般的に真空紫外域では最短 140 nm 程度までが透過型素子の限界であり，これより短波長の真空紫外，極紫外，軟 X 線といった波長領域では有効な透過型素子は今のところ無いといってよい．（ただし，固定波長なら軟 X 線領域でいくつかの透過型素子が開発され，偏光度計測に利用されている[1]．また硬 X 線領域ではダイヤモンド位相子を用いた磁性体の CD 計測が行われている[2]．）

しかしながら多くの生体分子は真空紫外や軟 X 線領域にも特徴的な吸収を示す．これら領域でも CD を計測することによって，より高精度なタンパク質構造解析や従来装置では対象外であった $\sigma$ 結合しか有しない糖・糖鎖などの生体関連物質の構造解析が期待されている．

これらのエネルギー領域で円偏光を発生させる装置として，現状最も有用なのは放射光挿入光源の一種である偏光アンジュレータである．この場合，光源部で偏光を発生させるために，原理的に如何なる波長においても CD を計測することが可能である．

筆者らは偏光アンジュレータを円偏光光源とすることで，真空紫外から軟 X 線に渡る領域で世界初の生体分子の CD 計測に成功してきた．本稿では上記成果に関して真空紫外〜極紫外域と軟 X 線域とに分けた簡単な紹介を行う．

## 2　真空紫外〜極紫外域における CD 計測装置とその応用例

真空紫外から極紫外域（最短波長 40 nm 程度）に対応した CD 計測システムを産総研つくばセンターの電子蓄積リング TERAS のビームライン BL5 にて開発してきた[3–5]．その詳細は直近の当会誌にて報告しているので，そちらをご覧いただきたい[6]．このビームラインでは直交磁場型（小貫型）偏光アンジュレータが利用できる[7]．このアンジュレータ（図 1 参照）は全長 32 cm（周期長 8 cm × 4 周期）と非常に小型であり，そのため磁石列を機械駆動させることで左右円偏光（および鉛直水平直線偏光）を通常 2 Hz で変調発振することができる．

Natural Circular Dichroism Study in the Energy Regions from Vacuum Ultraviolet to Soft X-ray by using Polarizing Undulator
Masahito Tanaka* (*Research Institute of Instrumentation Frontier, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)*),
〒305–8568 茨城県つくば市梅園 1–1–1 つくば中央第 2,
TEL: 029-861-5199, FAX: 029-861-5683,
E-mail: masahito-tanaka@aist.go.jp

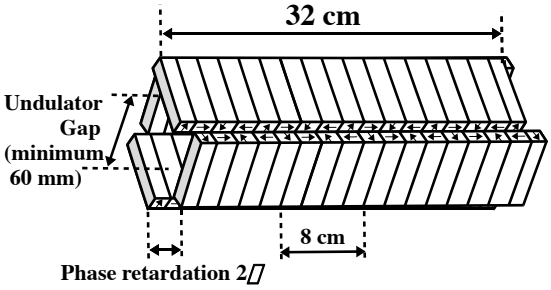



**図 1** 産総研 TERAS の小貫型偏光可変アンジュレータの概要図.

分子のキラリティに起因する CD 信号は一般的に吸収の 1% 以下の微小な信号である．このような信号を正確に計測するために，本ビームラインではアンジュレータ磁石列の駆動によって左右円偏光を変調させ，ロックインアンプ等を用いて変調信号検出を行うシステムを構築している．様々な要素技術の開発から CD スペクトルの計測に充分な 0.01% という計測感度を実現した．これによって，世界初の極紫外域（最短波長 40 nm）に渡った生体分子（アラニン）の CD 計測[8,9] や脂肪族アミノ酸の側鎖の影響を明らかにすること[10] などに成功している．

### 3 軟 X 線域における生体分子の CD 研究

X 線領域で偏光アンジュレータを用いた CD 研究のパイオニアは European Synchrotron Radiation Facility の Goulon らのグループである．彼等は主に硬 X 線領域でキラルな点群に属する結晶の CD 計測とその理論予測に成功してきた[11]．我々は彼らの成功と先行して研究が進んでいたアミノ酸の CD 理論計算の報告[12] とを足がかりとして，この研究に道を進めることとした．

軟 X 線 CD の最初の計測は SPring-8 BL23SU にて達成された．このビームラインは当時は APPLE-II 型アンジュレータが備えられており，磁石列の駆動により左右円偏光を 0.1 Hz 程度で切り替えて CD 計測を行った．この際磁石列の切替によるビーム軌道の変動の影響を最小限に抑えるために，アンジュレータ前後の補正電磁石による軌道補正法を当該ビームラインスタッフに開発していただいた[13]．また軟 X 線照射による試料ダメージを回避するために，試料の照射部位を変えても同一な計測が可能な程に均一な薄膜試料の作成も行った．

研究開始当初はまだ産総研での真空紫外 CD 計測装置開発も始まっておらず，我々の CD 計測における知識も少なかったため，本計測の困難さを過小評価していた．そのため例えば左円偏光で吸収スペクトルを計測し，右円偏光に変えてまた吸収スペクトルを計測し，それらの差分をとるなどの強度の強い磁気円二色性計測では行われている手法などを用いて生体分子の CD 計測を試みていたが，結果は全て失敗に終わった．

その後，SPring-8 スタッフの御尽力で各エネルギー点での円偏光切替などが可能になり計測精度が大幅に向上し，試料の最適化なども進めていくことで初めて図 2 に示すような CD スペクトルの計測に成功した[14,15]．これはセリンというアミノ酸薄膜の酸素 K 殻領域での結果である．例えば 540 eV 付近のピークでは L 体の CD は正，D 体の CD は負などといった L 体，D 体間で上下対称のスペクトル形状を本結果は示している．この対称性は観測した CD スペクトルの正当性を証明している．また 540 eV 付近の信号は側鎖の OH 基の酸素由来，533 eV 付近の信号は主鎖の $COO^-$ 基の酸素由来の信号であり，このように観測原子を選択して CD 計測することに成功した．

この結果を得るのに SPring-8 のマシンタイムが限られていたとはいえ，3 年以上を費やした．真空紫外域で用いている変調信号検出はこのシステムではアンジュレータ切替周波数の不安定さゆえに適用できなかったため，左右円偏光時の吸収を直接減算する直流法と呼ぶ方法を用いて計測した．一般的に直流法は感度が良くないが，それでも 0.1% 程度の CD ピークを検出できたのは SPring-8 のビームの安定性によるものが大きいと思われる．

現在は実験ステーションを同じく SPring-8 の BL25SU に移して実験を進めている．このビームラインは直列配置された 2 台のヘリカルアンジュレータの磁石列をそれぞれ左円偏光，右円偏光状態に固定しておき，電子ビームの軌道をキッカー電磁石で動かしてどちらのアンジュレータの中心に電子を通すかによって，左右円偏光を切り替えることができる[16]．最大 10 Hz までの切り替えが可能であるが，安定動作できる 1 Hz で実験を主に行っている．計測手法は BL23SU と同様に直流法を用いているが，交流検出法の導入も現在進めている．このビームラインでアラニン，アスパラギン酸など様々なアミノ酸薄膜の酸素 K 殻領域における CD 計測に成功し，特に $COO^-$ 基の $O1s \rightarrow \pi^*$ 遷移に対応するピークに違いが見られてくることなどを明らかにしてきた[17]．近年我々の実験結果を基にした軟 X 線 CD の理論計算の報告もなされており，さらなる軟 X 線 CD の理解が深まるものと期待される．

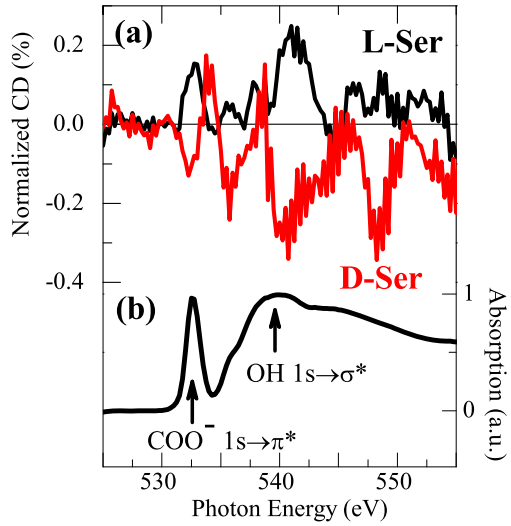



**図 2**　セリン薄膜の酸素 K 殻領域における (a)CD スペクトル (黒線；L 体，赤線；D 体)，(b) 吸収スペクトル [10]

## 4　まとめと将来展開

このように従来の透過型素子の利用では計測できない真空紫外から軟 X 線域において，偏光アンジュレータ放射を活用することで世界初の生体分子の CD 計測に成功した．今後，真空紫外域では CD による薬品のスクリーニングなどが可能なハイスループットな装置を構築するとともに，理論計算との比較等を組み合わせることで CD を様々なキラル物質の構造解析ツールとして確立させていきたいと考えている．軟 X 線域ではタンパク質等の生体高分子の計測という次の段階に駒を進めていくとともに，より短時間で高精度な計測を可能にするためのシステムづくりなどが必要である．今後更に多くの知見を蓄積していくことが，軟 X 線 CD の理解と応用を進めていく上で不可欠である．

## 5　謝辞

本受賞に至った研究成果の獲得は決して私一人の力のみで達成したものではなく，多くの方々の御尽力や御指導によって成されたものであることをここに明記させていただきます．

産総研 TERAS における真空紫外～極紫外域での CD 計測装置開発ならびに世界初の極紫外域での CD 計測は産総研・渡辺一寿博士，山田亨博士の御力添えの元で行ったものです．また TERAS の運転に関しまして，豊川弘之博士をはじめとする産総研電子加速器関係者の方々の御助力に感謝するとともに，当所のアンジュレータ開発の基礎を構築されました小貫英雄博士に深く敬意を表します．

SPring-8 において成功した軟 X 線 CD スペクトル計測に関しまして，日本原子力研究開発機構・横谷明徳博士，安居院あかね博士をはじめとする BL23SU スタッフの皆様，高輝度光科学研究センター・室隆桂之博士をはじめとする BL25SU スタッフの皆様，加速器関連スタッフの皆様の御協力に深謝いたします．特に本実験は他ユーザーに迷惑をかけることなくアンジュレータ磁石列の駆動や電子ビーム軌道のキッカー磁石による変調を行う必要があるなど多くの技術的課題がありましたが，本研究の重要性を御理解いただき上記課題等の克服に御尽力いただけたことによって，初めて本研究の成功に至ることが出来ました．

神戸大学発達科学部中川研究室の歴代学生の皆様，特に金子房恵博士（現，住友ゴム），泉雄大博士（現，高輝度光科学研究センター），古結俊行氏，埴岡（児玉）洋子氏らには試料作製から理論計算に渡る幅広い御協力を頂きました．

また本研究は文部科学省原子力試験研究費，科学研究費補助金若手研究，住友財団基礎科学研究助成などからの支援を受けて遂行されました．

最後になりましたが，本研究は全て神戸大学発達科学部・中川和道教授との共同研究，御指導の下で行われました．先生から頂戴した数多くの叱咤激励にこの場をお借りして謝恩の意を表させていただきます．

## 参考文献

1) T. Hirono, H. Kimura, T. Muro, Y. Saitoh, T. Ishikawa, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **2005**, *144*, 1097.
2) M. Suzuki, N. Kawamura, M. Mizumaki, A. Urata, H. Maruyama, S. Goto, T. Ishikawa, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 - Lett.* **1998**, 37, L1488.
3) T. Yamada, K. Yagi-Watanabe, M. Tanaka, F. Kaneko, T. Kitada, Y. Ohta, K. Nakagawa, *Rev. Sci. Instrum.* **2005**, *76*, 093103.
4) M. Tanaka, K. Yagi-Watanabe, T. Yamada, F. Kaneko, K. Nakagawa, *Chirality* **2006**, *18*, 196.
5) K. Yagi-Watanabe, M. Tanaka, F. Kaneko, K. Nakagawa, *Rev. Sci. Instrum.* **2007**, *78*, 123106.

6) 田中真人,「放射線化学」 **2011**, *91*, 51.
7) H. Onuki, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A* **1986**, *246*, 94.
8) M. Tanaka, K. Yagi-Watanabe, F. Kaneko, K. Nakagawa, *J. Synchrotron Radiat.* **2009**, *16*, 455.
9) M. Tanaka, K. Yagi-Watanabe, F. Kaneko, K. Nakagawa, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **2010**, *181*, 177.
10) M. Tanaka, K. Yagi-Watanabe, F. Kaneko, K. Nakagawa, *J. Phys. Chem. A* **2010**, *114*, 11928.
11) L. Alagna, T. Prosperi, S. Turchini, J. Goulon, A. Rogalev, C. Goulon-Ginet, C. R. Natoli, P. D. Peacock, B. Stewart, *Phys. Rev. Lett.* **1998**, *80*, 4799.
12) O. Plashkevych, V. Carravetta, O. Vahtras, H. Ågren, *Chem. Phys.* **1998**, *232*, 49.
13) A. Agui, A. Yoshigoe, T. Nakatani, T. Matsushita, Y. Saitoh, A. Yokoya, H. Tanaka, Y. Miyahara, T. Shimada, M. Takeuchi, T. Bizen, S. Sasaki, M. Takao, H. Aoyagi, T. P. Kudo, K. Satoh, S. Wu, Y. Hiramatsu, H. Ohkuma, *Rev. Sci. Instrum.* **2001**, *72*, 3191.
14) M. Tanaka, K. Nakagawa, A. Agui, K. Fujii, A. Yokoya, *Physica Scripta* **2005**, *T115*, 873.
15) 中川和道, 田中真人, 安居院あかね,「放射光」 **2005**, *18*, 363.
16) T. Muro, T. Nakamura, T. Matsushita, T. Wakita, K. Fukumoto, H. Kimura, T. Hirono, T. Kinoshita, T. Hara, K. Shirasawa, M. Takeuchi, H. Kitamura, *AIP Conf. Proc.* **2007**, *879*, 571.
17) Y. Izumi, A. Imazu, A. Mimoto, M. Tanaka, K. Nakagawa, M. Tanaka, A. Agui, T. Muro, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2009**, *190*, 012209.

## 〈著 者 略 歴〉

**田中 真人**： 2003 年神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了，博士（理学）取得，早稲田大学理工学術院客員研究助手を経て，2005 年より現職．主に偏光を用いたキラリティ計測技術，分子構造解析，磁気特性計測技術の開発と応用に従事．

とぴっくす

# 群馬大学重粒子線医学センターのご紹介

群馬大学重粒子線医学研究センター　田代 睦*

Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC) started carbon-ion cancer treatment in 2010. The facility contains three treatment rooms with four irradiation ports (horizontal, horizontal + vertical, and vertical) and an experiment room with a vertical port. The carbon-ion therapy system and the present state of the treatment are introduced.

**Keywords:** carbon-ion, radiotherpy, GHMC

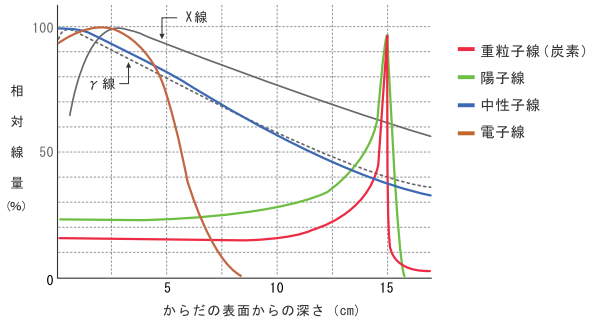



**図 1**　種々の放射線の深部線量分布の比較.

## 1　はじめに

がんは 1981 年より我が国の死因の第 1 位を占め，その対応は国民の健康を守るための最優先課題となっている．現在，がんの主要な治療法として，外科療法，化学療法，放射線療法が挙げられる．外科療法は局所の根治治療を目指しその効果も高いが，機能や形態の欠損といったデメリットがある．それに対して放射線治療は，体の外部から，あるいは線源を内部に挿入して放射線によりがんを死滅させることから，臓器を切除することなく機能や形態の温存がある程度可能である．部位によっては手術と同等の生存率が得られており，標準治療として，あるいは手術不可能，手術拒否などの場合に有効な治療法となり得る．がん患者の中で放射線治療を受ける割合は，米国では約 60% であるのに対し，日本では 25% 程度である．その要因はいくつか考えられるが，近年の放射線治療技術の発展も相まって，今後放射線治療の需要はますます増加することが予想される．

放射線療法は，放射線の照射により直接あるいは間接的にがん細胞の DNA に損傷を与え，がん細胞を死滅させる方法である．一般に X 線や電子線が用いられている．図 1 は種々の放射線の深部線量分布を模式的に表したものである．例えば X 線で体内深部の腫瘍に照射する場合，線量分布は深さに対して指数関数的に減少するため体表面近くの正常組織の線量が大きくなってしまう．これに対して，陽子線や炭素イオン線では，飛程の終端付近で線量が最大となるブラッグピークを形成するため，体内深部の標的への線量集中性を高めることができる．更に炭素イオン線などの重粒子線では，ブラッグピーク付近で高 LET であることから，DNA2 本鎖切断の修復率が低く[1,2]，生物学的効果比（RBE; Relative Biological Effectiveness）が大きい（＝同じ線量でも細胞の殺傷能力が高い）[3]，酸素効果比（OER; Oxygen Enhancement Ratio）が小さい（＝低酸素状態でも殺細胞効果が高く酸素濃度に依存しない）[4] といった特長から，従来の放射線治療で治りにくいがんに対しても有効な治療法として注目されている．

放射線医学総合研究所（放医研）では，1984 年より始まった「対がん 10 カ年総合戦略」の一環として，重粒子線がん治療装置（HIMAC）が計画・建設された．1994 年より炭素イオン線による臨床治療が開始され，これまでにおよそ 6000 人の患者が治療され，この治療法の有効性が示された．この成果を受け，群馬大学では 2006 年度より重粒子線治療施設の建設が開始された．2010 年 3 月より治療が開始され，同年 6 月より先進医療として昨年度は約 90 名の治療が行われた．今年はその 2 倍の

Introduction of Gunma University Heavy Ion Medical Center
Mutsumi Tashiro* (*Gunma University Heavy Ion Medical Center*),
〒371–8511 群馬県前橋市昭和町 3–39–22,
TEL: 027-220-8378, FAX: 027-220-8379,
E-mail: tashiro@gunma-u.ac.jp

**写真** 1　重粒子線医学センター外観.

ペースで治療数が増加しており，数年後には年間 600 人の治療を目指している．本学の装置は放医研が主体となって研究開発を進めてきた普及小型重粒子線照射装置[5] の技術実証機第 1 号と位置づけられており，今後本施設をもとに同様の施設が増加することが期待されている．施設外観を写真 1 に示す．ここでは，本学重粒子線医学センターの治療装置および治療の現状について紹介する．

## 2　装置概要

### 2.1　装置の基本仕様

装置の基本的な仕様を表 1 に示す．イオン種は炭素であり，体内飛程 25 cm 以上を確保するため，エネルギーは最大 400 MeV/u となっている．拡大ブラッグピーク（SOBP; Spread-Out Bragg Peak）とは，ビーム進行方向に拡大された，最大線量となる領域であり，腫瘍の大きさに合わせて 2–14 cm に調節可能としている．ラテラル方向の照射野サイズは最大 15 cm 四方（22 cm$\phi$）である．線量率は，15 cm$\phi$, 10 cm SOBP のビーム条件で，アイソセンタ（照射野中心）にて 5 GyE/min 以上となっており，これを実現するために治療室直前で要求されるビーム強度はおよそ $1.2 \times 10^9$ pps（particles per second）となっている．ここで GyE（Gray Equivalent）とは臨床線量の単位で，物理線量（Gy）に RBE を乗じたものである．これら治療装置としての基本的要求は放医研での臨床治療経験から導出されたものであり，現 HIMAC の治療装置とほぼ同等の性能となっている．また，治療人数は年間 600 人以上を想定していることから，治療室は 3 室（水平ポート 1 室，水平・垂直ポート 1 室，垂直ポート 1 室）で構成される．この他，照射装置の研究開発や照射実験用に垂直ポート 1 室がある．

**表** 1　重粒子線がん治療装置の基本仕様

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| イオン種 | 炭素 |
| 加速エネルギー | 140 – 400 MeV/u 可変 |
| 最大飛程 | 25 cm（水換算値） |
| SOBP | 2 – 14 cm |
| 最大照射野 | $15 \times 15$ cm$^2$ (22 cm$\phi$) |
| 最大線量率 | 5 GyE/min<br>(15 cm$\phi$, SOBP 10 cm の時) |
| 最大ビーム強度 | $1.2 \times 10^9$ pps |
| 照射方法 | 単円ワブラー法，螺旋ワブラー法，<br>呼吸同期照射，積層原体照射 |
| 治療室 | 水平・垂直 1 室，水平 1 室，<br>垂直 1 室，研究開発用垂直 1 室 |
| エネルギー・<br>コース切替時間 | 1 分程度 |

### 2.2　加速器及びビーム輸送系

加速器はイオン源，線型加速器，シンクロトロンから構成される．

イオン源は全永久磁石型 ECR イオン源で，約 10 GHz のマイクロ波により炭素 4 価を生成し，30 kV で引き出す（エネルギー：10 keV/u）．

線型加速器は RFQ（Radio Frequency Quadrupole）及び APF（Alternating Phase Focusing）方式 IH 型 DTL（Drift Tube Linac）から構成される．RFQ にて 4 価の炭素イオンは 600 keV/u に，その後 IH-DTL にて 4 MeV/u まで加速される．運転周波数はともに 200 MHz である．加速器の長さはそれぞれおよそ 2.5 m 及び 3.5 m である．2 台の線型加速器の全長は 6 m となり，HIMAC 既存のものの約 1/7 と大幅な小型化が実現している．加速された炭素イオンは線型加速器下流に設置された 50 mg/cm$^2$ 炭素フォイルにて 6 価に荷電変換され，シンクロトロンに送られる．写真 2 に入射器（イオン源，線型加速器）の外観を示す．

シンクロトロンでは 4 MeV/u で入射した炭素イオン 6 価が 140–400 MeV/u まで加速される．周長は 63 m で，直径では 20 m 程度である．加速の繰り返し周波数は 1/3 Hz 程度（可変），加速粒子数は $2 \times 10^9$ pps 程度である．ビームは遅い取り出し法で，呼吸同期照射や積

**写真** 2　入射器の外観．奥側にイオン源，手前側に RFQ 及び IH-DTL が配置されている．

**写真** 4　治療室（水平・垂直ポート）．6 軸動作が可能な治療寝台，患者位置決めの際に直交 2 方向の X 線撮影に用いられる FPD（Flat Panel Ditector, 写真では退避状態）が見られる．

**写真** 3　シンクロトロンの外観．

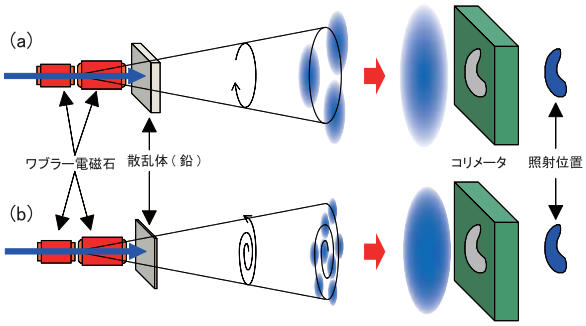



**図** 2　照射野形成の模式図 (a) 単円ワブラー法．(b) 螺旋ワブラー法．

層照射のために速いビーム on/off の応答に対応している．治療に使われずシンクロトロン内に残された炭素イオンは，入射エネルギーレベルまで減速されることにより，無駄な中性子発生を抑えて放射線遮蔽上有利となるように設計されている．写真 3 にシンクロトロンの外観を示す．

高エネルギービーム輸送系の全ての電磁石は 0.5 mm ケイ素鋼板の積層構造となっており，ビームコースやエネルギー切り替え時間を早く（1 分程度）して治療の効率や自由度を確保している．

### 2.3　照射野形成装置

治療室直前まで輸送されたペンシルビームは，患者毎に異なる大きさ・形状をもった腫瘍に一様に線量が投与されるよう，空間的に拡大される．照射装置の主な構成機器は，ビーム偏向用のワブラー電磁石，ビーム径を広げるための散乱体，SOBP 形成のためのリッジフィルタ，ビーム飛程調整用のレンジシフタ，照射野形状を腫瘍形状に合わせて整形するための多葉コリメータ，投与線量を管理するための線量モニタ等である．治療室の様子を写真 4 に示す．

横方向の照射野形成は，単円あるいは螺旋ワブラー法による．これは，ワブラー電磁石にてビームを 2 次元的に円または螺旋状に走査し，かつ，適当な厚さ（可変）の散乱体にてビーム径を広げることにより，アイソセンタ位置で必要領域について均一線量を得る方法である．図 2 に照射野形成法を模式的に示す．今回新たに導入された螺旋ワブラー法[6,7] は，単円ワブラー法に比べて，照射野内をより細かく走査するようにビームが動くため必要ビーム径が小さく，すなわち散乱体を薄くでき，その結果，ビーム利用効率及び患者最大飛程が向上する．螺旋ワブラー法は今年 3 月に薬事承認が得られ，現在ビーム試験等を行っており，まもなく臨床実用される予定で

ある．

標的への縦方向の均一線量投与のために，SOBP を用いる．SOBP は，リッジフィルタと呼ばれる，標的深さの必要幅にて臨床線量が均一となるように設計された，様々な厚みを持つギザギザ形状のアルミニウム板を用いて，ビームにエネルギー分布を持たせることにより形成される．リッジフィルタは，患者毎に必要なサイズのものに切り替えられる．

呼吸性移動を伴う臓器への照射時にも線量集中性を確保するため，呼吸同期照射に対応する．呼吸波形をモニタしてその波形レベルにより加速器からのビーム取り出しを制御する事により，決まった呼吸位相（呼気時のみ）に照射できるようになっている．

SOBP サイズは腫瘍の最も厚い部分で決められるため，これが厚い場合，照射野の辺縁部では正常組織への線量が増大し，例えばそれが体表面に達すると皮膚に障害が起こるなど問題となる可能性がある．これを回避するために，積層原体照射法[8] も使用可能となっている．この照射法では，ミニ SOBP ビームにより標的内をスライス状に分割照射する．スライス毎に多葉コリメータにて照射野形状を調節することにより，表面線量を抑えて線量集中性を高めることができる．この照射法については現在薬事申請の準備を進めており，来年度の実用化に向けて試験中である．

## 3　治療の現状

治療の大まかな流れを図 3 に示す．重粒子線治療の適応性が確認された後，固定具が作成される．固定具は患者ごとに作成され，その後の CT 撮影や治療照射において位置再現性を確保するためのものである．次に，CT 撮影が治療体位で行われ，ここで得られた 3 次元画像情報を元に，治療計画が立案される．治療計画では，がん標的やリスク臓器（放射線障害が起こり得るため耐容線量が特に制限される体積）が CT 画像上に定義され，標的体積に対してビームを設定し，線量分布が計算される．ここで重粒子線の加速エネルギーや照射野形成装置の各機器パラメータが決定される．立案された治療計画はカンファレンスにて症例検討され，ここで承認されると実際の治療照射へ向けた準備に進む．照射準備では，治療計画にて設計された，患者ごとに標的最深部の形状にビームの飛程を合わせるための治療具の加工と受入検査，治療計画にて計算された線量と実際のビーム照射量との関係を決定するための線量測定，日々の治療照射時の患者位置決めを行うための基準 X 線透過像の取得などを行う．

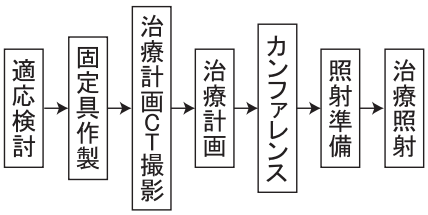



**図** 3　治療の流れ．

群馬大学で重粒子線治療が行われている部位は，現在のところ前立腺，肺，肝臓，頭頸部，骨軟部であり，その他についても順次適応を拡大しているところである．照射回数（日数）は，肺と肝臓で 4 回，その他の部位で 16 回である．一般的な X 線治療での照射回数（30 回前後）に比べて治療にかかる日数が少なくてすみ，患者への負担が少なく社会復帰が早いことも重粒子線治療の特長の 1 つである．

## 4　おわりに

以上，群馬大学重粒子線医学センターの治療装置および治療の現状について紹介した．本装置は放医研の臨床経験を基に普及型として開発されたものであるが，様々な新しいシステムが盛り込まれている．現在この装置を用いて確実に治療を行い，患者数を増加させていくことが我々の最優先課題であり，そのためのシステムや臨床体制の充実が必須である．治療では，医師，看護師，診療放射線技師，医学物理士（筆者はこれに該当する），装置運転技術員，事務員など様々な職種が協力して行っていく必要がある．効率的かつ確実に治療が行えるよう，更なる装置や測定システムの改良，開発を進めている．

## 参考文献

1) A. Takahashi, N. Yamakawa, T. Kirita, K. Omori, N. Ishioka, Y. Furusawa, E. Mori, K. Ohnishi, T. Ohnishi, *J. Radiat. Res.* **2008**, *49*, 645.
2) H. Terato, R. Tanaka, Y. Nakaarai, T. Nohara, Y. Doi, S. Iwai, R. Hirayama, Y. Furusawa, H. Ide, *J. Radiat. Res.* **2008**, *49*, 133.
3) For review, K. Ando, Y. Kase, *Int. J. Radiat. Biol.* **2009**, *85*, 715.
4) Y. Furusawa, K. Fukutsu, M. Aoki, H. Itsukaichi, K. Eguchi-Kasai, H. Ohara, F. Yatagai, T. Kanai, K. Ando, *Radiat. Res.* **2000**, *154*, 485.
5) K. Noda, T. Furukawa, T. Fujisawa, Y. Iwata, T. Kanai,

M. Kanazawa, A. Kitagawa, M. Komori, S. Minohara, T. Murakami, M. Muramatsu, S. Sato, Y. Takei, M. Tashiro, M. Torikoshi, S. Yamada, K. Yusa, *J. Radiat. Res.* **2008**, *48*, A43.
6) M. Komori, T. Furukawa, T. Kanai, K. Noda, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* **2004**, *43*, 6463.
7) S. Yonai, N. Kanematsu, M. Komori, T. Kanai, Y. Takei, O. Takahashi, Y. Isobe, M. Tashiro, H. Koikegami, H. Tomita, *Med. Phys.* **2008**, *35*, 927.
8) T. Kanai, N. Kanematsu, S. Minohara, M. Komori, M. Torikoshi, H. Asakura, N. Ikeda, T. Uno, Y. Takei, *Med. Phys.* **2006**, *33*, 2989.

連 載 講 座

# V. M. ビャーコフ・S. V. ステパノフ 放射線化学の基礎 –放射線分解初期過程– 第 1 回

産業技術総合研究所　小林 慶規*
日本原子力研究開発機構　岡 壽崇

Contents of the lecture note by Prof. V. M. Byakov and Dr. S. V. Stepanov (Institute of Theoretical and Experimental Physics, Russia) are described in a series of articles. The first article concerns basic concepts, classification and sources of ionizing radiations. Translation into the Japanese language is based on the arrangement between the Japanese Society of Radiation Chemistry and National Research Nuclear University "MEPhI", Russian Federation.

**Keywords:** radiation chemistry, radiolysis, early process

ロシア連邦理論実験物理学研究所の V. M. ビャーコフ教授，S. V. ステパノフ博士の講義録を連載講座として紹介する．連載第 1 回は，基本知識，電離放射線の分類およびその線源について説明する．（全 5 回の連載を予定）

## まえがき

我々の周りそして我々の体の中には，化学が満ちている．化学と化学技術なくしては，どんな概念も空疎なものになってしまう．物質，材料，装置，さまざまなプロセスに関する概念は，化学があってはじめて，意味をもつ．現在のマイクロエレクトロニクスの 99% は化学である．原子力エネルギー分野では，ウランの入手から核燃料の加工まですべての操作は純粋に化学的である．燃料エネルギー分野，農業分野，食品分野などにおいても同様である．科学における化学の中心的な役割を理解するために，長い時間考え込む必要はない．

化学には物理学と同様に多くの分野がある．読者諸氏は，すでに，熱化学，電気化学，光化学などを勉強する機会があったはずである．化学は物質の変化に関する学問であり，多くの化学変化には，エネルギーの消費あるいは放出が伴う．発熱反応であっても，その開始にエネルギーが必要になる場合が多々ある．よく知られている古典化学（18 世紀と 19 世紀の化学）は，本質的に熱化学である．つまり，熱の形で与えられるエネルギー源によって開始される化学過程を取り扱う．基本的なエネルギー源として電気が出現し，電気化学が誕生し（アルミニウムの生産法を思い出してほしい），強力な光源が開発されたことにより，光化学が誕生した．放射線化学の課題は，**電離放射線**の作用によって引き起こされる物質の変化である．電離放射線は，物質を通過する際に物質原子から電子をはじき出すことができる．

人々が電離放射線と出会ったのは 100 年以上前のことで，1895 年のレントゲンによる X 線（しばしばレントゲン線とも呼ばれる）の発見と 1896 年のベクレルによる**放射能**の発見までさかのぼる[*1]．この少し前の 1887 年に，ハインリッヒ・ヘルツは，光電効果と呼ばれる現象を発見している．これは，紫外線が原子を電離させる，

Foundations of Radiation Chemistry –Early Processes of Radiolysis– by V. M. Byakov and S. V. Stepanov, Part 1
Yoshinori Kobayashi* (*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*), Toshitaka Oka (*Japan Atomic Energy Agency*),
〒305–8565 茨城県つくば市東 1–1–1 産業技術総合研究所 つくば中央第五事業所,
TEL: 029-861-4886, FAX: 029-861-4622,
E-mail: y-kobayashi@aist.go.jp

[*1] 放射能（radio activity，ラテン語の「放射」を意味する "radio"，「線」を意味する "radius"，「作用」を意味する "activus" に由来する）は，原子核が自然に（自発的に）別の核に変化して，高エネルギー電離放射線（$\alpha$ 線，$\beta$ 線，$\gamma$ 線，X 線）を放出する能力を意味する．放射能は陽子あるいは中性子過剰による原子核の不安定性の現れである．過剰な陽子や中性子は，超新星内で原子核が非常に高速で合成されるために生じるものである．

つまり，原子から電子[*2]を放出させることができるというものである．

電離放射線の物質に対する作用は，**照射**と呼ばれるようになった．照射によって引き起こされる化学効果は**放射線分解（ラジオリシス）**と呼ばれるようになった．放射線化学では，照射された物質のすべての物理化学的な効果が研究対象となる．放射能自身が，写真作用すなわち $\alpha$，$\beta$，$\gamma$ 線の放射線化学的な効果によって発見されたことからもわかるように，放射線化学は，放射能の発見と同時に誕生したといえる．

初期の放射線化学の発展を後押ししたのは，放射線火傷に始まり最終的には人の死にいたる電離放射線の生物学的効果であった．放射線の生物効果は，レントゲンとベクレルによる発見のすぐあとに出現し，まもなく，照射により，分解や重合，酸化還元による変化が生じることが示された．

しかしながら，放射線化学の本格的な発展は，原子炉の出現によって始まったと言えるだろう．「**放射線化学**」という名称が 1944 年に，この分野の創始者のひとりであるバートン（M. Burton）によって導入され，放射線化学の基本的な課題は，物質，材料，化学システムの電離放射線に対する耐久性を調べることや耐放射線材料の開発，そして，放射線のエネルギーを考慮した材料の合成および改質へと変化した．

放射線化学は，物理化学という広い分野において，他の分野や近接した領域と密接に関連しながら発展した．放射線化学は，原子物理，核物理，プラズマ物理・化学，光化学，フリーラジカル化学，放射線生物学の境界領域である．多くの放射線化学の成果は，実用面における直接の成果をもたらしている．ユニークな特性をもつ新しいタイプの材料が見出されている．

このような事情により，放射線化学の中心的な課題のみですら，一冊の本，標準的な量の講義課程の枠内ですべて述べることはおそらく不可能であろう．このため，A. K. ピカエフによって書かれた三冊からなるすぐれた本である「現代放射線化学」（1985–1987 年，ナウカ）の刊行は，その当時の状況から考えてしごくもっともなことであった．

このように，放射線化学は放射線物理に似た核エネルギー論の関連分野である．研究の応用的な傾向を指していうならば，これらの分野の目的は共通しており，その違いが常にはっきりしているわけではない．国産の次世代核エネルギーを得るためには，おそらく，新しい構造材料や従来に比べて広い温度および圧力範囲を利用するモデル装置の開発が必要であろう．水，使用済核燃料の有機溶液，金属，合金，グラファイト，セラミックスなど原子力に応用される材料における放射線効果の特殊性の理解，そして，これらの生産や加工のための新しい技術の開発は，実用面から重要である．

将来の核エネルギーの需要に対応するためには，若い人材の育成・教育も必要である．しかしながら，放射線化学の諸問題に対する現代的な教科書や学習教材が，ロシア語で書かれたものだけでなく英語で書かれたものを含めてもないことがわかる．ロシア語で書かれたピカエフのモノグラフが刊行されてから，すでに 20 年以上経過している．

このような 1260 ページの多くの分冊からなるモノグラフは，もちろん，放射線化学の勉強を始めたばかりの学生のための教材として適当ではない．このような学生にとって必要なのは，その内容が一学期あるいは二学期分に相当するより少ない量の本である．このような本の主たる目的は，学生が放射線化学の基礎を会得するのを助けることにあり，核エネルギーからの要求を考慮した講義課程のための教材として書かれる本が含めるべき内容もおのずと決められる．

電子が原子の性質や原子同士の結合を決定することが知られている．このことから，物質を電離放射線が通過すると，化学結合の破壊や新しい結合の形成，新しい化合物の合成などの効果が必然的に生じる．照射の程度がさらに大きくなると，媒質の温度上昇，自己拡散の活性化，結晶化，相状態の変化，非平衡状態への変化など物理的な効果が生じる．後者の場合，個々の放射線作用で与えられるエネルギーが非常に小さいため，全体としては非常に大きな線量が必要である．生物における電離放射線の生体分子への作用は，重要な生物学的な効果を生じさせる．

今まで述べたことから明らかなように，照射された物質中で起こる現象の研究を一つの学問分野の枠内だけで行うことは不可能である．研究は，放射線化学自身に加えて放射線物理や放射線生物学を含む学際的なものとならざるを得ない．しかし，現在まで，「ありふれた」電離粒子（電子，陽子，$\alpha$ 粒子，分裂片）によって引き起こされる物理化学的な変化の研究は，化学者により行われ，「エキゾチック」な粒子（陽電子とミュオン）により誘

[*2] 「電子」という名称は，1897 年に英国の物理学者 J. J. トムソンによって，陰極線を構成する負の電荷を帯びた物質粒子に対して与えられた．電子の電荷（$1.6 \times 10^{-19}$ C，$4.8 \times 10^{-10}$ esu）は電荷の最小単位である．その質量（$9.1 \times 10^{-31}$ kg）も同様である．電子はスピン 1/2 と磁気モーメント 1.001 ボーア磁子（$0.927 \times 10^{-23}$ J/T=$0.927 \times 10^{-20}$ erg/G）を有する．電子の磁気モーメントは双極子あるいは永久磁石の磁気モーメントと類似している．電子の大きな磁気モーメントはスピンの存在と相当する電荷の回転によって説明される．

起される効果は，伝統的に物理学者の専門領域とみなされてきた．この結果，本質において似かよった現象が異なった考えや違う用語で記述されることになってしまっている．また，実験データの解釈における不一致や独断（もちろん故意によるものではないが）の原因ともなっている．さらに，しばしば，実験データが関連する現象の一義の解釈に十分ではないということが判明する．このため，別のそして唯一の正しい研究の手法が望まれる．これは，現象のより広い範囲の議論を可能にする，放射線化学と物理，陽電子とミュオンの物理・化学，発光メスバウア分光法を抱き合わせた方法で，これらを複合的に調べることにより，理論モデルの構築における不統一性を小さくすることができる．我々は，この講義録において，このようなアプローチをとることにした．

## 1　予備知識

放射線化学の基礎について述べるに当たって，当然のことながらその基本概念の説明から始めることにする．

いうまでもないことであるが，電離放射線により，イオン化だけでなく，媒質分子の励起も生じる．これら二つの最も重要なエネルギー付与過程を，我々は**電子の活性化**という共通の言葉で表すことにする．

電気的に中性の分子は，普通，偶数個の電子をもっている．このため，その合成スピンと磁気モーメントはゼロである．とはいっても，例外がある．最もよく知られた常磁性分子の例は，$O_2$ と NO である．反磁性分子はイオン化により電子を失い，陽イオン（正に帯電したイオン，より正確には，陽イオンラジカル）に変化する[*3]．

**ラジカル**は，一つ以上の不対電子をもつ分子あるいは原子であり，化学的に活性である．遊離ラジカル（フリーラジカル）は，適当な相手を見つけ，結合しようとする．通常，奇数個の電子をもち，磁気モーメントがゼロでないため，ラジカルは常磁性である．最も単純なラジカルは H，Li，Na などの原子である．

**陽イオン**は正に帯電したイオンである．分子がイオン化すると，**陽イオンラジカル**が生成する．これは，不対電子をもつ化学種で，正の電荷を併せもつ．どの電子がたたき出されるかによって，たとえば，水分子の場合，2 つの異なった陽イオンラジカルが生成する．OH 結合に関与している電子がたたき出された場合，酸素原子の孤立電子対から電子がたたき出された場合，それぞれ，図 1 のようになる．

**図 1**　水分子の陽イオンラジカル．左：OH 結合に関与している電子がたたき出された場合，右：酸素原子の孤立電子対から電子がたたき出された場合

**陰イオン**は負に帯電したイオンである．**陰イオンラジカル**は，偶数個の電子をもつ分子あるいはイオンに電子が結合することによって生じる．たとえば，正の**電子親和力**をもつアセトン分子に電子が結合すると次のような陰イオンラジカルが生じる．

$$e^- + (CH_3)_2CO \longrightarrow (CH_3)_2CO^- \qquad (1)$$

電子は電子親和力が負である分子とは結合しない．このような分子の例は，窒素，水，二酸化炭素そして多くの炭化水素である．電子親和力という概念は，陰イオンに対しては，中性分子（原子）に対する第一イオン化ポテンシャルと同じ意味をもつ．

照射によって生じる化学効果は，物質の単位質量あたりに吸収されたエネルギーの大きさで決まる．このようなエネルギーを**吸収線量** $D$ と呼ぶ．これは本質的に照射によって物質に貯えられるポテンシャルエネルギー密度である．SI 単位系では，吸収線量の測定にはグレイ（Gy）が使われる[*4]．1 Gy は照射された物質 1 kg に 1 J の電離放射線のエネルギーが与えられたことを意味する．より古い単位である 1 rad もまだ使われている[*5]．1 rad = 100 erg/g = 0.01 Gy．線量を eV/g（あるいは eV/cm$^3$）で表すこともある．1 Gy = $6.24 \times 10^{15}$ eV/g = $6.24 \times 10^{15} \times \rho$ eV/cm$^3$．ここで，$\rho$（g/cm$^3$）は物質の密度である．

実験データは，通常，観測された何らかの定量的な特性の吸収線量依存性として示される．これは，放射線分解で生じた生成物の濃度，媒質の粘度，電気伝導率などである．このような依存性は，**線量曲線**，蓄積曲線ある

[*3] 陽イオンと陰イオンという用語は，ファラデーによる．電気分解において，電解質に浸された陰極（cathode）と陽極（anode）にそれぞれ向かって移動する化学種をそれぞれ陽イオン（cation），陰イオン（anion）と名づけた．「イオン」は，ギリシア語で「移動するもの」を意味する．

[*4] ルイス・ハロルド・グレイ（Louis Harold Gray）．英国の物理学者，放射線生物学者．

[*5] 吸収線量を意味する英語 “radiation absorbed dose” のそれぞれの単語の最初のアルファベットから名づけられた．

いは分解曲線と呼ばれる（得られた依存性が直線であっても「曲線」である）．

観測された効果の定量的な特徴づけのために，生成物 $i$ の**放射線化学収率**$G_i$ という概念が導入された．これは研究対象物によって照射エネルギー $dE$ が吸収された際に生じた，あるいは，分解または変化した粒子（分子，イオン，ラジカルなど）の数 $dn_i$ である．$dE$ として放射線化学では，100 eV が用いられている[*6]．

それぞれの系に対する放射線化学収率は，成分の濃度，温度，物質移動など多くの因子に依存する．これらの因子は，照射の途中で変化する．このため，一般的には，収率は線量の関数で，$G_i = f(D)$ となる．**初期収率**$G_i^0$ とある時間における**観測収率**$G_i(D)$ は区別される．初期収率は線量ゼロに外挿された収率であり，観測収率は吸収線量 $D$（$D \neq 0$）における収率である．収率は任意の線量曲線あるいは線量依存性を記述する解析的な表式の微分によって決定される．

$$G_i = \frac{dn_i}{dE} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d(n_i/V)}{d(E/\rho V)} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dc_i}{dD} \qquad (2)$$

ここで $\rho$ は照射された対象物質の密度で，$c_i$ は放射線分解生成物 $i$ の濃度である．解析的な表式を用いる方法がより好ましい．

物質に対する電離放射線の作用で生じる放射線分解の一次生成物および中間生成物（電子，イオン，励起状態）の初期収率は，原則として，10 粒子/100 eV をこえない．

一次生成物および中間生成物は基本的にラジカルであり，反応性が高い．これらは自分自身と相互作用して分解したり，出発物質やあるいはそこに含まれている添加物と反応したりする．基本的に次の三つのシナリオが考えられる．

1. 中間生成物は基本的に自分自身と相互作用したり，分解したり，出発物質を再生する．このとき，観測される出発物質の分解収率，たとえば，$G(\text{-}H_2O)$ は，一次生成物の初期収率と比べて小さい．このような物質や材料，系は**放射線耐性**であるといわれる．
2. 中間生成物はそれ自身と相互作用するか，あるいは，分解して出発物質とは異なる安定な放射線分解生成物を与える．この場合，照射された物質の分解収率は中間生成物の初期収率と同じくらいになる．中間生成物が物質に含まれる添加物と反応する場合も同様である．
3. 中間生成物は連鎖反応を開始させることができ，出発物質を変化させる．この条件では，最終生成物の収率は初期生成物の収率を大きく上回る．

種々の物質で観測された放射線化学的な変化の収率は，100 eV あたり $10^{-6}$ から $10^8$ 粒子まで非常に大きな範囲で変化する．

放射線分解は定常的な放射線照射，あるいは，間欠的なまたは孤立したパルス照射で行うことができる．パルス照射では，系に一度に多くの線量が照射される．

定常的な照射の際の放射線化学収率 $G_i$ は，照射中の系の化学過程の速度を決定する．実際，定義によれば，化学反応速度は $dc_i/dt$ に等しい．ここで，$c_i$ は $i$ 番目の試薬の濃度（粒子/cm$^3$），$G_i = dn_i/dE$，$n_i$ はエネルギー $E$（100 eV）の吸収で形成される（分解する）粒子の量である．$\rho$ を媒質の密度（g/cm$^3$），$D$ を放射線の吸収線量（eV/g），$\dot{D}$ を**線量率**（eV/(g·s)）とする[*7]．そうすると

$$\frac{dc_i}{dt} = G_i \cdot \dot{D} \cdot \frac{\rho}{100} \text{ あるいは } \frac{dc_i}{dt} = G_i \cdot \dot{D} \cdot \frac{\rho}{100} \cdot \frac{1}{N_A} \qquad (3)$$

となる．あとの式で，濃度 $c_i$ はしばしば行われているように，dm$^3$ あたりのモル数（mol/dm$^3$ ≡ M），$\rho$ は dm$^3$ あたりの kg，吸収線量は kg あたりの eV で示されている．$N_A = 6 \times 10^{23}$ はアボガドロ数である．

ここで述べなかった放射線化学の基礎概念は，あとで実際に必要になったときに述べることにする．

## 2　電離放射線：分類と線源

電離放射線には二種類ある．一つは粒子放射線である．これは質量をもった高速で運動する素粒子および原子で，荷電粒子（電子，陽子，加速イオン）と中性電荷の粒子（高速中性子）がある．もう一つは電磁放射線で，紫外線，レントゲン線，$\gamma$ 線など 10 eV 以上のエネルギーをもつ光子である．

放射線が発見された当時のレントゲン線の線源は手づくりのもの（レントゲン管）であったし，$\alpha$ 線，$\beta$ 線，$\gamma$ 線の線源は天然のウラン塩であった．放射性壊変の結果として形成される原子は，通常，それ自身放射性であり，壊変を続けてより単純な原子へと変化していく．最終的に安定な非放射性原子が形成されて，壊変は止まる．放射能の本質はこのようなものであり（ラザフォード，ソディ，1903 年），外部からエネルギーが与えられなくて

[*6] 近年，100 eV の代わりに 1 J が用いられている．この場合の収率は，照射対象物が 1 J の放射線エネルギーを吸収した際の生成物あるいは分解生成物のモル数で示される．2 つの収率を結びつける次の関係がある．$G$（粒子数/100 eV）= 9.68 × $G$（$\mu$mol/J）．

[*7] 線量率（dose rate）．単位時間あたりの吸収線量の増加量．

も，放射性物質は長期間エネルギーを放出しつづける．原子核壊変の結果，出発元素とは物理的性質だけでなく，化学的性質も異なる元素が形成される．したがって，放射性壊変は元素の化学変化も伴う．

その後，地球上の電離放射線源である放射性原子の他に，地球外電離放射線である宇宙線が見出された．電離放射線源を自然放射線源と人工放射線減に区別することは現在でも行われている．

人工放射線源は原子炉と種々の荷電粒子加速器である．宇宙線以外の自然放射線の線源は，多くの放射性原子核である．これらの約 30 個はエネルギーが 5–8 MeV の $\alpha$ 粒子を放出する．ほぼ同数の放射性同位元素がエネルギー 0.1–2 MeV の $\beta$ 粒子（電子と陽電子）を放出する．ウラン，トリウムおよびその放射性壊変核は系列（放射系列）を形成するが，どれも自然に存在する基本的な放射線源である．これ以外のどこにでもある放射性核は $^{40}$K で，最大エネルギー 1 MeV の $\beta$ 粒子を放出する．$^{40}$K は，土，岩石，水，（人を含む）生物中のカリウム原子 $10^5$ 個あたり 1 個の割合で含まれている．ウラン，トリウム，カリウムの放射線は，石炭や石油といった自然エネルギー源の形成に特別な役割を演じている．地球誕生のときから存在していてさらに今後何十億年と存在し続けるであろう多くの元素に加えて，自然界にはこれ以外のより少ない量で存在する放射性原子もある．

## 2.1　自然電離放射線源

### 2.1.1　$\alpha$ 放射性核

原子核の $\alpha$ 壊変では，当該核から自発的に正電荷を帯びた $\alpha$ 粒子（ヘリウム $^4_2$He の原子核）が飛び出す．このとき，核の電荷は 2e 減少し，核子の数は 4 減少する．放出される $\alpha$ 粒子はきわめて大きな，そして，一定の運動エネルギー（原子核の種類に依存して，5–8 MeV）をもっている．自然界に存在する原子核から放出される $\alpha$ 粒子のエネルギーは普通 8 MeV をこえない．

キュリー夫妻は 1 g のラジウムから放出される $\alpha$ 粒子の吸収による熱を測定し，100 cal/h という値を得た．これは，4 日間で 1 g のラジウムを含む 1 杯のコーヒーを沸騰させることができる熱量である．この元素にこのように多くのエネルギーが含まれているということは，当時の社会の広い範囲にわたって，大きな興味を引き起こした．

$\alpha$ 壊変の最も単純な理論（G. ガモフ，1928 年）においては，$\alpha$ 粒子は物質の原子核の内部に存在していると仮定される．原子核は $\alpha$ 粒子にとってポテンシャルの谷となる．核内の $\alpha$ 粒子のエネルギーはポテンシャル障壁を「古典的」に乗り越えるには不十分であり，$\alpha$ 粒子は原子核内にとどめられることになる．しかし，トンネル効果のおかげで $\alpha$ 粒子は原子核から飛び出すことができるのである．つまり，指数関数的に小さいが，ゼロではない確率で，$\alpha$ 粒子は有限な大きさのポテンシャル障壁を透過する．$\alpha$ 粒子の放出時刻は予測できず，放射性壊変現象は確率的である．理論によって，単位時間における壊変の確率，あるいは，その逆数である放射性原子核の平均寿命だけを知ることができる．

### 2.1.2　$\beta$ 放射性核

$\beta$ 壊変には三つの種類がある．原子核からの高速（0.1–2 MeV）の $\beta^-$ 粒子，$\beta^+$ 粒子（陽電子）の放出と電子捕獲である．電子捕獲とは，原子核が電子殻（通常は，原子核に最も近い K 殻）から電子を捕獲してしまう過程である．上記すべての場合において，原子核の電荷は 1 だけ変化するが，核子の数は変化しない（ただし，原子量はごくわずかだけ小さくなる）．

原子核から完全に一定のエネルギーで放出される $\alpha$ 粒子と異なり，放射性同位元素から放出される $\beta$ 粒子は種々のエネルギーをもつ．$\beta$ 粒子の中で最も速いものは，光速に近い速度で運動する．種々のエネルギー値は $\beta$ 粒子にまったく決まった形で分配される．$E$ と $E + dE$ の間のエネルギーをもつ $\beta$ 粒子の数のエネルギー $E$ に対する依存性をグラフで示すと，どんな放射性物質の $\beta$ 線に対しても得られる曲線の形は同じになる．エネルギーが増加するにつれ，$\beta$ 粒子の数は，最初増加し，最大値をとり，その後しだいに減少してゼロになる（図 2）．$\beta$ 粒子の数がゼロになるエネルギー $E_{max}$ は，放出される $\beta$ 粒子の最大エネルギーである．最大エネルギーは，それぞれの $\beta$ 放出同位元素に対して，$\alpha$ 放出同位元素に対する $\alpha$ 粒子のエネルギーとまったく同様に特徴的な量である．自然界の $\beta$ 放出体については，$E_{max}$ の大きさはたいてい 0.3–3 MeV の範囲にある．重要な水素の同位体である $^3$H（トリチウム）だけがずっと低いエネルギーの $\beta$ 線を放出する．トリチウムの $\beta$ 線の最大エネルギーは 18 keV で，平均エネルギーは 5.7 keV である．

$\beta$ 壊変において，原子核は一定のエネルギー $E_{max}$ を失う．$\beta$ 粒子のエネルギーが一定にならない理由は，各 $\beta$ 壊変において原子核が二つの粒子を放出するためである（W. パウリ，1931 年）．これらの粒子は，正または負電荷をもつ電子あるいは陽電子と中性電荷の粒子である反ニュートリノあるいはニュートリノである．平均では，（反）ニュートリノは $E_{max}$ の 2/3 のエネルギーを，$\beta$ 粒子は 1/3 のエネルギーをもち去る．

$\beta$ 壊変で飛び出す電子（陽電子）は核の内部に存在して

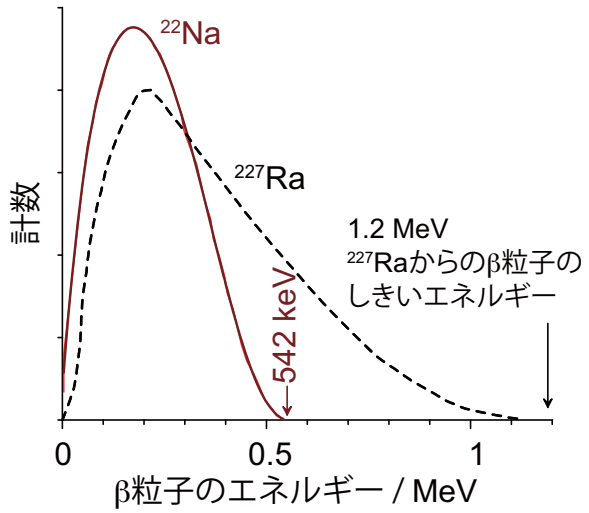



**図 2**　$^{22}$Na ($\beta^+$ 壊変) と $^{227}$Ra ($\beta^-$ 壊変) の壊変にともなう $\beta$ 粒子のスペクトル

いるわけではなく，陽子あるいは中性子が変化することにより生成される．$\mathrm{n} \longrightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \tilde{\nu}_e$，$\mathrm{p} \longrightarrow \mathrm{n} + \mathrm{e}^+ + \nu_e$．この考えでは，$\beta$ 粒子は核内粒子ではなく，核子に含まれている粒子ということになり，$\alpha$ 壊変にくらべてはるかに深く物質の構造に立ち入っていることになる．$\beta$ 壊変の理論はエンリコ・フェルミによって 1934 年に構築された．

### 2.1.3　$\gamma$ 放射能

$\alpha$ 壊変や $\beta$ 壊変と異なり，いわゆる $\gamma$ 壊変は電荷および質量数の変化を伴わない．原子核からの $\gamma$ 量子（高エネルギーの光子）の放出は，原子核の長寿命励起状態から基底状態への自発的な遷移によって生じる．事実，$\gamma$ 線が放出されても，原子核の原子番号も核子の数も変化しない．

$\gamma$ 量子の放出の他に**内部転換**と呼ばれる別の過程も存在する．内部転換過程では，核によって解放されたエネルギーは，$\gamma$ 線にではなく，原子の電子の一つに与えられ，原子のイオン化が起こる．**電子捕獲**と呼ばれるこれとは逆の過程では，原子核は自発的に自分自身の軌道電子（通常は K 殻電子）の一つを吸収する．これらの過程のそれぞれおいて，原子の内殻に生じた空孔を電子が満たす際に，X 線の放出が起こる．

### 2.1.4　自発核分裂

$Z \geq 90$ の原子核（Th, Pa, U および超ウラン元素）は，二つのほぼ同じ質量（$m_1 : m_2 \approx 2 : 3$）の原子核片に自身で分裂する．これを，自発核分裂（K. A. ペトロジャック，G. N. フレロフ，1940 年）という．分裂片は非常に多量のエネルギーをもち去る．たとえば，$^{235}_{92}$U の核分裂では，分裂片が獲得する全運動エネルギーは 160 MeV にもなる．このような大きなエネルギーが生じる原因は，最初の原子核の質量が分裂片に比べて大きいことにある．

### 2.1.5　放射性壊変後の原子

$\alpha$ 粒子の放出後に残される原子は，電子の電荷の二倍に等しい負の電荷をもつと考えられる．しかし，原子核壊変後の原子が，正に帯電していることが明らかとなった．これは $\alpha$ 粒子の放出後に残される陰イオンが，発射後の大砲のように，反跳を受けるためである．$\alpha$ 壊変後の陰イオンの速度は十分大きく，光速の 0.001 倍程度にもなる．このように大きな速度のため，陰イオンは反跳後に衝突する相手の分子を強くイオン化する．しかし，それと同時に，陰イオン自身もこのような衝突で自身の電子を失う．このとき，付加している二つの電子だけでなく，さらに一つか二つの電子を失う．分子との衝突がありえない高真空では，原子核壊変後の原子の電荷の変化は起こらない．

### 2.1.6　放射性壊変の法則

一つの放射性核は壊変によって別の放射性核になり，生成核がさらに壊変していくため，多くの壊変生成物が形成される．これらの生成物の全体は放射系列を構成する．壊変前の元素を**親（母）核種**，壊変後の核種を**娘核種**と呼ぶ．自然に存在する放射性元素が形成する三つの放射系列には，トリウム系列，ウラン–ラジウム系列，アクチニウム系列がある．これ以外に四番目の系列としてネプツニウムの $\alpha$ 壊変によって生じる放射系列がある．ネプツニウムは原子炉や核爆弾の爆発で生じる元素である．これら各系列の最後は鉛の安定同位元素（トリウム系列，ウラン–ラジウム系列，アクチニウム系列）あるいはビスマスの安定同位元素（ネプツニウム系列）である．

放射性壊変は，温度や圧力などの外部パラメータがどんなに広い範囲にわたって変化しても，影響されることはない．放射性壊変の法則，すなわち，ある瞬間に壊変していない放射性核の数 $N(t)$ の時間依存性は，この核がどれだけ「生きのびてきたか」に関係なく，壊変確率が一定であるとすれば，簡単に求められる．微小な時間間隔 $dt$ の間に壊変していない核の数 $N(t)$ は $dN$ だけ減少する．このとき，$dN$ は $N(t)$ と $dt$ に比例する．

$$dN = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt \tag{4}$$

比例定数 $\lambda$ は時間に依存しない**核の壊変確率**である．(4) のマイナス記号は壊変していない核の数が時間とともに減少することを意味している．この式から，速度 $dN/dt = -\lambda N$ となるので，$N(t)$ は時間とともに指数関数的に減少する．

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau} \tag{5}$$

ここで $N_0$ は $t$=0 における放射性核の最初の数で，$\tau$=1/$\lambda$ は放射性核の平均寿命である．放射性壊変の法則は，exp のかわりに 2 を用いて次の形で表されることもある．

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \tag{6}$$

この場合，$T_{1/2}$ は**半減期**と呼ばれる．時間 $T_{1/2}$ において，原子核の量が最初の半分になることは明らかである．(5) と (6) の右辺を比べることにより，次の関係が得られる．

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2 \approx 0.693\tau \tag{7}$$

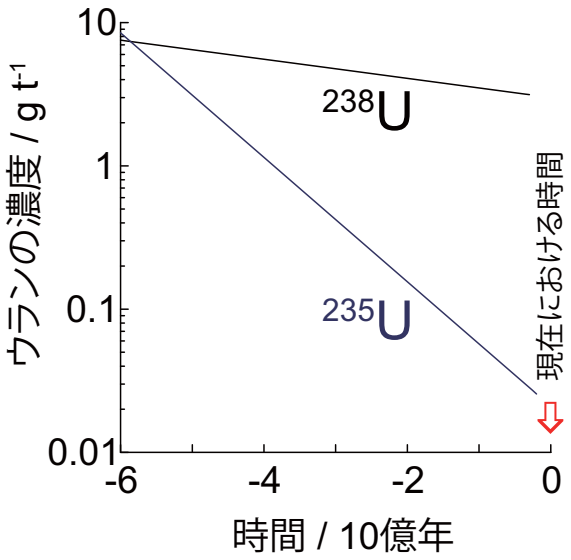



**図 3**　地殻におけるウランの同位体の質量濃度（g/t）の時間依存性．地殻内ウランの平均含有量は 3 グラム/トンに等しいとした．

### 2.1.7　地球におけるウランの分布

放射性壊変の法則から，超新星の爆発で噴出された物質中の $^{235}$U と $^{238}$U の同位体比 $^{235}N_0/^{238}N_0$ を見積もることができる．最近の理論によれば，超新星は宇宙のウラン工場である．約 50 億年前に，太陽の近くで爆発した超新星の一つから放出された物質が，そのとき形成されつつあった太陽系と地球に取り込まれたと考えられている．

現在の $^{238}$U に対する $^{235}$U の天然同位体存在比は，0.00725 である．$^{235}$U の寿命が短いため，昔はこの比はずっと大きかったはずである（これらの同位体の寿命の測定値は，$\tau_{238} = 6.5 \times 10^9$ 年，$\tau_{235} = 10^9$ 年である）．

現在の地殻のウラン含有量は，1 トンあたり 3–4 グラムである．図 3 にウランの同位体の濃度の地質学的時間による変化が示されている．地球の形成時のウランの同位体組成比が基本的に現在と異なっていたことがわかる．50 億年前には，$^{235}$U の量は $^{238}$U と同程度であった．

地殻 1 トンあたりのウランの重量平均含有量はおよそ 3–4 グラムであり，トリウムの平均含有量は約 10 グラムである．自身の壊変生成物と平衡になっている 1 グラムの天然ウランは，1 秒間に 0.95 erg のエネルギーを排出する．トリウム 1 グラムの 1 秒間の排出エネルギーは 0.27 erg である．したがって，地殻 1 トンあたりの 1 秒間の放出エネルギーは 6 erg/(t·s) = $1.4 \times 10^{-7}$ cal/(t·s) となる[*8]．

地球を構成する物質の単位質量あたりの放射線源の密度は，地球全体で変化せず，地殻に対して求められた値と同じであると仮定しよう．そうすると，地球の単位体積あたりのエネルギー放出速度は，$A = 7.7 \times 10^{-13}$ cal/(cm$^3$·s) に等しくなる．ここで，地球全体の平均物質密度として 5.5 g/cm$^3$ を用いた．これから，地球全体から排出される熱量は，

$$Q = \frac{4}{3}\pi R^3 \cdot A \approx 8 \times 10^{14} \text{ cal/s} \tag{8}$$

となる．ここで $R$ = 6400 km は地球の半径である．

定常状態では，地球内の発熱と地表からの熱の放出が等しくなければならないので，

$$Q = 4\pi R^2 \cdot \kappa \left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=R} \tag{9}$$

となる．ここで，$\kappa \approx 0.004$ cal/(deg·cm·s) は，水成岩の熱伝導係数の平均値である．これから，地球の全体積でウランとトリウムの分布が均一であると仮定すれば，ウランとトリウムの放射壊変系列によって生じる地球における熱勾配の大きさを見積もることができる．

[*8] ここで用いた数値は K. U. アレンの便覧 “Astrofizicheskie Velichini”（天文物理量），Moskva，IL，1960 から引用した．

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=R} = \frac{AR}{3\kappa} \approx 0.04\ \mathrm{deg/cm} \qquad (10)$$

この値は観測値 $3\times10^{-4}$ deg/cm に比べて 100 倍大きく，地球中心部において温度が非常に高いことになる．もちろん，ここで得られた見積もりは，地球における熱の定常状態が達成されている場合に対応しているため，地表で可能な最も高い温度勾配の大きさを与えていることになる．定常状態が達成されるまでに必要な時間は，$\sim R^2/(6D_T) \approx 3\times10^{11}$ 年であり，地球の年齢を大きくこえている（ここで，$D_T = 0.006\ \mathrm{cm^2/s}$ は花崗岩と玄武岩の熱伝導係数である）．しかしながら，非定常状態の可能性を考慮した数値計算によっても，不一致は解消されない．

食い違いのもっともな理由の一つは，地殻におけるウランの優先的な濃縮である．地球の体積全体にわたって放射性元素の分布が一様であるという仮説を否定して，放射性同位元素が地球の厚さ $h$ の表面層にのみ集中していると仮定しよう．この場合，定常状態において，$h << R$ であれば，

$$4\pi R^2\cdot\kappa\left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=R} = A\int_{R-h}^{R} 4\pi r^2 dr \approx 4\pi R^2\cdot hA \qquad (11)$$

が得られる．これから，

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=R} \approx \frac{Ah}{\kappa} \qquad (12)$$

となる．温度勾配の値が 0.0003 deg/cm に等しいと仮定すると，ウランが濃縮している地殻層の厚さは，おおよそ，$h \approx 10$ km となる．

地質学的時間 $t$（10 億年単位）の間に，岩石中に濃度 U（g/t）含まれているウランの壊変で生じる $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ 放射による吸収線量（MGy）は，次のようになる（$\tau_{238} = 6.5\times10$ 億年）．ここで，$D_\alpha$，$D_\beta$，$D_\gamma$ は $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ 放射によるそれぞれの吸収線量，$D_{\mathrm{total}}$ はこれら全体の吸収線量である．

$$D_\alpha = 17.38\cdot\mathrm{U}\cdot(\mathrm{e}^{t/6.5}-1) \approx 2.8\cdot\mathrm{U}t$$

$$D_\beta = 2.28\cdot\mathrm{U}\cdot(\mathrm{e}^{t/6.5}-1) \approx 0.368\cdot\mathrm{U}t$$

$$D_\gamma = 1.48\cdot\mathrm{U}\cdot(\mathrm{e}^{t/6.5}-1) \approx 0.239\cdot\mathrm{U}t$$

$$D_{\mathrm{total}} = 21.14\cdot\mathrm{U}\cdot(\mathrm{e}^{t/6.5}-1) \approx 3.4\cdot\mathrm{U}t$$

全体の吸収線量は数 MGy に達し，最も大きな寄与は $\alpha$ 放射によることがわかる．$\alpha$, $\beta$, $\gamma$ 放射の相対的な寄与はそれぞれ 82.2，10.8，7% である．

物質に分布している $^{232}$Th とその壊変生成物も同様に寄与する．ウランとトリウムの $\alpha$ 放出壊変生成物による全吸収線量は

$$D_\alpha(\mathrm{MGy}) = (2.8\cdot\mathrm{U} + 0.8\cdot\mathrm{Th})\cdot t$$

となる．ここで，前と同様に，U と Th はウランとトリウムの濃度（g/t）を示している．また，$t$ は 10 億年単位の時間である．

### 2.1.8 オクロの天然原子炉

原子炉の開発は，20 世紀前半の人類による最も偉大な成果とみなされている（しごく妥当な見解である）．しかし，自然は人間よりずっと先んじていたのである．

1972 年にフランスの研究者が，オクロ（ガボン）の鉱山に含まれている天然ウランの同位体組成が周知の組成と大きく異なることを見出した．通常は 0.72% ある $^{235}$U が 0.64% しかないという場合もあった．当初，これは遠い昔に地球にやってきた宇宙人が使用した原子炉の痕跡とされ，この発見に関するすべての情報が機密扱いとされた．しかし，その後，この原子炉は，はるか昔に自然に形成されたものであることが判明した．すでに述べたように，$^{235}$U の半減期は $0.71\times10^9$ 年であり，$^{238}$U の半減期 $4.5\times10^9$ 年より短い．このため，初期の地球では，$^{235}$U の含有量は現在の約 30 倍であった．$^{235}$U の分裂で生成する元素の同位体の精密分析により，約 $2\times10^9$ 年前のオクロでは，$\approx 0.6\times10^6$ 年間天然の原子炉（軽水炉）が稼動していたことが明らかにされた[*9]．この原子炉は，ウランを含む物質の四つの「ブロック」からなり，それぞれのブロックの体積は 300 m$^3$ であった．合計出力は 0.1 MW で，中心の温度は 400–600 °C であった．

今のところ，オクロ以外に過去に天然原子炉が存在したという証拠は得られていない．しかし，先カンブリア時代には「オクロ現象」はただ一つではなかったという考えがある．地球の進化における天然原子炉の役割は，連鎖核分裂で排出されるエネルギーという点からも，また，分裂片から放出される電離放射線の影響という点からも大きなものであった可能性がある．

### 2.1.9 宇宙線

1912 年に，地球における電離放射線源である放射性原子の他に，地球外自然電離放射線，すなわち，宇宙線がオーストリアの物理学者ヴィクトル・ヘスによって発見された．

ヘスは気球に乗り，現在から見るときわめて簡単な測

[*9] これは当時の天然ウラン中の $^{235}$U の含有率が 3% をこえていたことから，可能であった．

定器であるはく検電器をもって，上空高くあがり，高度上昇とともに強度が増加する，つまり，宇宙空間から地球にやってくる，放射線束を発見した．その後，宇宙線が宇宙空間から上層大気圏にやってくる荷電粒子および中性粒子であることが明らかにされた．

宇宙線は主に陽子（90%）と $\alpha$ 粒子（7%）からなっているが，これ以外の粒子も含まれている．その大部分は，より重い原子核（1.2%），電子（1.5%），陽電子（0.3%）そして反陽子である．宇宙線に含まれる光子はさほど多くないことがわかっている．宇宙線には，間違いなく，ニュートリノが存在する．宇宙線の化学組成の特殊性は，宇宙全体の平均より $10^5$ 倍も多くのリチウム，ベリリウム，ホウ素が含まれている点にある．このほか，宇宙線には，宇宙全体に比べてずっと多くの重い元素が含まれている．その中には，$Z > 30$ のものもある．

一次宇宙線の強度は大体 2 粒子/($cm^2$·s) である．地球および大部分の銀河における宇宙粒子の数は，およそ 1 立方センチメートル当たり 1 水素原子である星間ガスの粒子の濃度と比べてごくわずかである．それにもかかわらず，宇宙線のエネルギー密度は，~1 eV/$cm^3$ で，銀河ディスクおよび銀河を満たす媒質ガスの運動エネルギー密度と等しい．宇宙線によって地球にもたらされるエネルギーは，太陽から受け取るエネルギーの $3 \times 10^8$ 分の 1 であり，星の可視光線から受けるエネルギーに大体等しい．地球および惑星間空間の磁場の影響をのぞけば，一次宇宙線は等方的で定常的であると考えられる．

宇宙線の一次成分のエネルギースペクトルは，$10^8$ eV から非常に高いエネルギー $10^{20}$ eV まで及んでいる．宇宙粒子の平均エネルギーは，$10^{10}$ eV 程度である．核子については，$10^9$ eV 以上の運動エネルギーの領域では，宇宙線束 $F(E)$ はエネルギーの増加とともにべき乗則 $F(E)dE \propto E^{-2.7}dE$ で減少する．宇宙線粒子のかなりの部分は，現在の加速器でも得られないエネルギーを有しているように思われる．

主要な宇宙線源は，おそらく，超新星である．地球の周辺では，太陽で発生した宇宙線の影響も大きい．地球の大気を通過する際，（ニュートリノ以外の）一次宇宙線粒子は大気の原子との衝突によってエネルギーを失い，二次宇宙線に変化する．海面で測定される粒子は，一次宇宙線に比べてはるかに少ない（図 4）．これらは，硬成分を構成するミュオン（≈70%），軟成分である電子と光子（≈30%）そしてニュートリノである．ニュートリノの流束は，一次放射線の全流束の 0.1 倍である．ハドロン（陽子，中性子，パイオン）は 1% より少ない．大気を通過した宇宙線の海面におけるエネルギーは，30 分の 1 に低下する．大気は地球における生命の発展を守る頼りになる盾として作用している．しかし，海面に到達する二次宇宙線は弱くなっているとはいっても，地表における自然放射線バックグラウンドの 4 分の 1 に相当する．自然放射線バックグラウンドの残りは，鉱石，土壌，水，大気に含まれる放射性同位元素による．

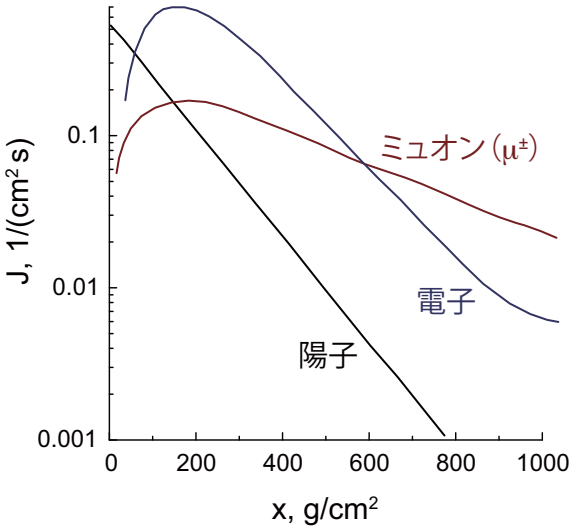



**図 4**　1 秒間に水平面 1 $cm^2$ にふりそそぐ宇宙線の種々の成分の粒子数．上層から地表までの高さによる変化．横軸の $x$ は，底面の面積が 1 $cm^2$ で高さの異なる大気の円柱の重量を示している．海面では，$x$ = 1 kg/1 $cm^2$ = 1000 g/1 $cm^2$ であり，横軸の右端に対応する．

### 2.1.10　宇宙線によって形成される放射性核

二次宇宙線の大気分子の核との衝突は原子の破片を生じるが，その一部は放射性である（図 5）．中性子成分の多くは $^{14}$N 核によって吸収され，$^{14}$C を生成する．

$$n + {}^{14}N \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H$$

ところが，エネルギーが 4 MeV 以上である 5% の中性子は，トリチウムを生成する．

$$n + {}^{14}N \rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H$$

大気中の $^{14}$C 形成の全速度は約 2.2 $cm^{-2}s^{-1}$ であるが，分裂片として直接形成されるトリチウムは 0.2 $cm^{-2}s^{-1}$ である．高層大気で生じるこれらの放射性生成物はすぐに酸化して，$^{14}CO_2$，$^{3}HOH$ を形成し，そして，大気中で生じる通常の化学過程に関与する．$^{14}$C と $^{3}$H の半減期は，それぞれ 5730 年および 12.33 年である．これらの生成物が大気中にとどまっている時間は，およそ 25 年

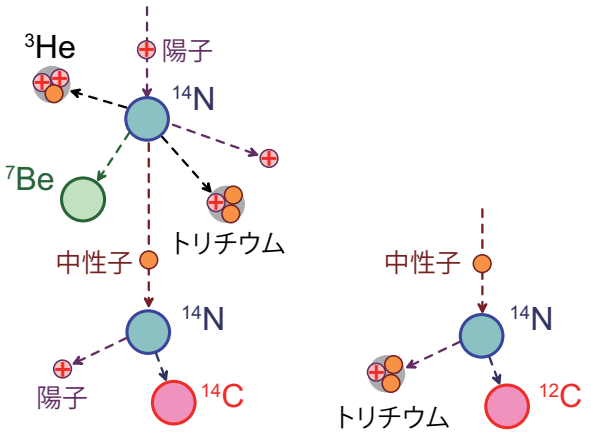



**図 5**　大気中における $^{14}$C とトリチウムの生成．高エネルギーの陽子が $^{14}$N 核を破砕し，これに伴って放出された中性子が別の $^{14}$N 核と相互作用して，$^{14}$C あるいはトリチウムが形成される．

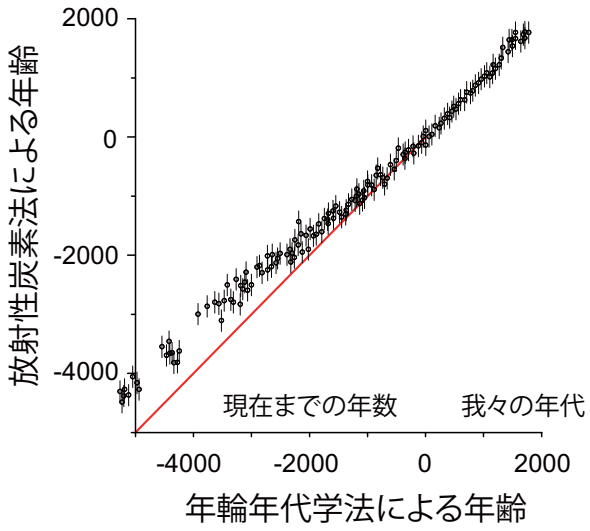



**図 6**　松の年輪サンプルの $^{14}$C 法による年代測定．放射性炭素法で決定された年齢がいくらか年輪年代法より若いことがわかる（M. ロンゲイル，Astrofizika Visokikh Energii，M. Mir, 1984）

である．その後これらの生成物は，雨として海あるいは陸地に降り注ぎ，生物に取り込まれる．$^{14}$C と $^{3}$H の含有量から残留有機物を含むサンプルの年齢を決定することができる．トリチウムは，標識原子として，気象学の研究や農業生産物の年齢の決定に利用されている．$^{14}$C は考古学の研究に広く用いられていて，年代決定のための放射性炭素法の基本の同位元素である．

$^{14}$C 法の正確さは，地球磁場や太陽風が変化することが原因となり，平均的な宇宙線束が変動し $^{14}$C の生成速度が一定でなくなるため制限される．これらの因子は，放射性炭素法で求められた年齢と独立な方法で決定された年齢を比較すれば調べることができる．最も長い期間の連続した年代は，非常に古い木（たとえば，カリフォルニアの山の松）の年輪から得られ，紀元前 5500 年までさかのぼった比較が可能である．検量線が図 6 に示されている．放射性炭素で決定された年齢が，年輪年代学法で得られた年齢より，少しだけ若いことがわかる．

## 2.2　人工放射線源

### 2.2.1　原子炉

原子炉は最も強力な中性子源である．原子炉で得られる中性子束は，$10^{15}$ 中性子/(cm$^2$·s) に達する．原子炉から得られる中性子のエネルギースペクトルは連続的で，100 分の数 eV から 10 MeV に及んでいる（核分裂中性子の平均エネルギーは大体 2 MeV である）．

すべての原子炉において，核分裂過程の結果，多量の $\beta$ 放射性核が生成するが，$\beta$ 壊変は常に反ニュートリノの生成を伴う．このため，原子炉は強力な反ニュートリノ源でもある．反ニュートリノが原子炉を用いて実験的に確かめられた（1953–1956 年）のはこのような理由による．

原子炉で生成される副生成物として，新たな放射性元素が得られてきた．安定な同位元素に原子炉からの中性子を照射すると，主として $\beta$ 粒子と $\gamma$ 線を放出する人工放射性物質をつくることができる．たとえば，$^{60}$Co は原子炉の中でコバルトの棒に中性子を照射することによって得られる．$^{60}$Co は放射線テクノロジーにとって強力でかけがえのない $\gamma$ 線源である．

### 2.2.2　荷電粒子加速器

加速器は電界加速により荷電粒子を高エネルギーに加速する装置である．加速される粒子の種類によって，電子加速器，陽子加速器，イオン加速器がある．加速される粒子の軌道によって，直線型のものと円あるいはらせん型のものがある．

最初の直線型の加速器は 1931 年に米国の物理学者ヴァン・デ・グラーフによってつくられた．通常，この加速器はエネルギー 0.5 から 5 MeV までの電子，陽子，ヘリウムイオンビーム（直流あるいはナノ秒時間幅のパルスビーム）を発生させる．大型の装置で高いエネルギー

を発生させている．しかし，加速される粒子に一度に大きなエネルギーを与える代わりに，少しずつ加速してエネルギーを大きくすることもできる．この考えはサイクロトロンとして具体化された（E. ローレンス，1931 年）．これは，現在のすべてのサイクロトロン共鳴加速器の原型となった．

レントゲン装置は，熱陰極から放出された電子の加速に高電圧を用いている．電子は真空管内を飛行し，そして陽極に衝突する．このとき，電子の運動エネルギーの一部が高エネルギー量子に変化する．レントゲンにより発明された装置は 40 kV の電圧で使われた．最近のレントゲン管は，数 kV から 1 MV をこえる電圧で使われている．電圧が高ければ高いほど，レントゲン線のエネルギーは高くなり，その透過力も大きくなる．

サイクロトロン，ヴァン・デ・グラーフ加速器，線型加速器など現在産業利用されている装置は，荷電粒子を 100 MeV を大きくこえるエネルギーまで加速することができる．

## 〈原 著 者 プ ロ フ ィ ー ル〉

**フセヴォロド・ミハイロヴィッチ・ビャーコフ**：
Vsevolod Mikhailovich Byakov．1954 年モスクワ大学（Lomonosov Moscow State University）卒業．大学では，理論物理学者テルレツキー（著書「相対性理論のパラドックス」（東京図書）で日本でも知られている）の研究室で宇宙線の起源に関する研究を行った．大学卒業後，ESR の創始者であるザボイスキーの招きで，理論実験物理学研究所（Institute of Theoretical and Experimental Physics, ITEP）に入所（母方の祖父が勤務していた化学工場でザボイスキー家の人々と一緒の時期があったとのこと）．原子炉（均一型軽水炉）関連の物理化学過程や排ガス中の硫黄，窒素酸化物の放射線除去などの研究を実施．1973 年には，水および分子性物質中において，放射線分解による水素生成とポジトロニウム形成が共通の機構で生じることを提唱した．地球における石炭や石油の生成における放射線の役割についての研究も行っている．現在，ITEP 相談役，ロシア化学技術大学（D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia）教授．主な研究分野は，放射線化学，宇宙物理学．

**セルゲイ・フセヴォロドヴィッチ・ステパノフ**：
Sergey Vsevolodovich Stepanov．1983 年，モスクワ金属工業大学（Moscow Institute of Steel and Alloys）卒業，1987 年，“Spin dynamics of the polarized short-lived beta-active nuclei. Beta-NMR spectroscopy” の研究で ITEP から Ph. D. 取得．2005 年，“Positrons in molecular media: theoretical grounds of positron annihilation spectroscopy” の研究で，博士学位取得．現在，ITEP の原子スケール研究センターの副センター長．モスクワ大学主任研究員と国立核研究大学（National Research Nuclear University “MEPhI”）の准教授を兼任．主な研究分野は，原子核プローブによるスピンダイナミクス，ポジトロニウム化学．

**図 7**　原著者近影．左：ビャーコフ氏，右：ステパノフ氏．

## 〈著 者 略 歴〉

**小林 慶規**：1976 年 東京大学工学部卒業，1981 年 東京大学大学院工学系研究科単位取得退学，工学博士．通商産業省 工業技術院 化学技術研究所，1997 年 物質工学工業技術研究所 研究室長，現在，産業技術総合研究所 計測標準研究部門 研究室長．専門：材料分析，放射線化学，陽電子科学．趣味：ランニング，将棋ほか．

**岡 壽崇**：1998 年 早稲田大学理工学部卒業，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）．早稲田大学理工学総合研究センター，産業技術総合研究所，千葉大学大学院を経て，2009 年より日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 博士研究員．専門：高分子物性，放射線化学，放射線生物学．趣味：ウインタースポーツ，ラグビー観戦ほか．

連 載 記 事

# TEX 入門
# 第 1 回「インストール」

日本原子力研究開発機構　岡 壽崇*
産業技術総合研究所　伊藤 賢志

Here, introduced is how to install TEX into your PC for getting knowledge of writing a manuscript on TEX to publish in *Radiaiton Chemistry*. In this topic, let us install relevant applications to TEX and do TEX by ourselves.

**Keywords:** TEX, LATEX, e-Print

本連載記事では，学会誌「放射線化学」向けの原稿執筆に必要な TEX の知識が習得できるよう，TEX のインストールや原稿の作成方法について解説していきます．第 1 回目は，TEX 関連ソフトウェアのインストール方法と，TEX を利用して実際に原稿を作るまでを説明します．

## 1　TEX とは？

TEX は Donald E. Knuth 博士（スタンフォード大学名誉教授）が開発した組版処理言語で，「テフ」あるいは「テック」と読みます．また，その仲間には，TEX を扱いやすくすると同時に本誌のような長い文章を効率的に版組みするために拡張した LATEX （ラテフ，レイテックス），これらを日本語に移植した pTEX や pLATEX があります．とりわけ，数式を含んだ理系の文章を表現するのに優れており，自宅の PC とインクジェットプリンタだけでも商業誌並みの版組みを行うことができます．また，版組み再現性にも優れており，日本放射線化学会の会員に馴染みの深い

- アメリカ化学会（American Chemical Society）
- 米国物理学協会（American Institute of Physics）
- アメリカ物理学会（American Physical Society）

等，主要学会および専門誌への投稿に TEX による原稿作成が推奨されています．本誌でも第 91 号から TEX を利用した編集作業を行っています．

この連載では，日本語の版組み用に普及している pLATEX2ε をベースに解説していきます．なお，説明が足りないと感じる読者のために，学会誌の Web サイトに簡易マニュアル[1,2] も用意しましたので必要に応じてご参照ください．

## 2　TEX による原稿作成の流れ

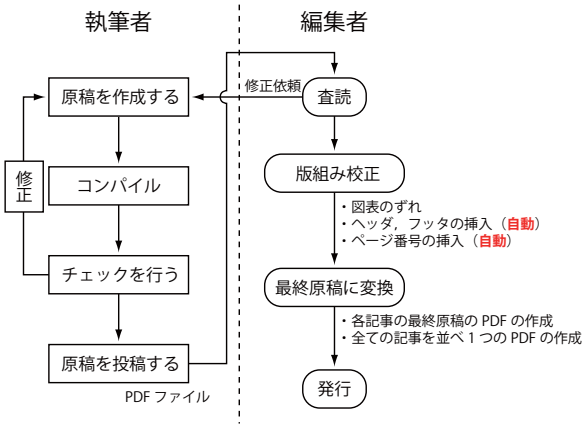



**図 1**　TEX 投稿の流れ．

TEX では，Word のように印刷レイアウト上に文章を入力するのではなく，C 言語のプログラミングと同じで，文章とともに数式を出力する命令など，他の版組み情報と一緒にテキスト形式の原稿ファイルを作成し，変換（=コンパイル）することにより印刷レイアウトを確

---

Introduction to TEX, Part I, "How to install it."

Toshitaka Oka* (*Japan Atomic Energy Agency*), Kenji Ito (*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*),
〒319–1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2–4 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 放射場生体分子科学研究グループ,
TEL: 029-284-3524, FAX: 029-284-3516,
E-mail: oka.toshitaka@jaea.go.jp, rc.texhelp@gmail.com

認することができます．本誌に投稿する際の編集過程の例を図 1 に示します．執筆者は原稿執筆から投稿用原稿（PDF ファイル）作成までを行います．編集者は，記事の修正を行った後，各記事および全体の PDF ファイルを作成し，WEB サイトにアップロードして発行となります．

## 3 インストール

編集作業で最低限必要なソフトは，

- TEX 本体
- プレビュワー（文章レイアウトの簡易表示）
- 画像表示ツールソフト

の 3 つです．また，TEX 用の文書を書くためにチューンアップされたエディタを利用すると作業効率が上がります．

TEX 本体や関連ソフトの多くはオープンソースソフトとして無料で入手できます．市販の解説本の付録や Web サイトから入手するのがてっとりばやいと思います．

**■解説本**　大きめの書店や大学生協に行くといろいろな TEX の解説本が置いてあります．ここでは，奥村晴彦さんの「改訂第 5 版 LATEX2ε」[3] をお勧めします．同著者のホームページにも TEX の情報がまとまっています．

**■Web サイト**　前述のように TEX には様々な種類がありますが，今回は pLATEX2ε のインストールを行います．以下にインストール方法の一例を紹介します．

### 3.1 Windows の例

阿部紀行さん（あべのり）の TEX インストーラ 3

http://www.math.sci.hokudai.ac.jp/~abenori/soft/abtexinst.html

を使用します．これを使えば TEX の本体，プレビュワー等，版組みを完了するためのソフトを一通りインストールできます．インストール方法は

http://www.econ.kobe-u.ac.jp/~nomura/computer/tex-inst.html

をご参考ください．

※ごくまれに TEX のファイルをダウンロードしてくる先の URL に接続できずにエラーが出ることがあります．そのときは abtexinst.exe を実行して 2 つ目現れる「W32TeX のインストール設定を行います.」というウインドウで他の URL を選んでみてください．

### 3.2 Mac OS X の例

小川弘和さんのホームページ

http://www2.kumagaku.ac.jp/teacher/herogw/

から TEX のパッケージ（Drag & Drop UpTeX，OS 10.6 以降専用）をダウンロードしてインストールします．また，GPL Ghostscript 9.02 もダウンロードします．なお，10.5 以前の OS では Drag & Drop UpTeX を使用できませんので，該当する場合は rc.texhelp@gmail.com までご相談ください．

ダウンロードした DMG ファイルをダブルクリックしてマウントし，ReadMe.rtfd を参考にしながらインストールしてください．（Drag & Drop UpTeX は UpTeX ファイルをアプリケーションにコピーする，Ghostscript は gplgs.pkg ファイルを実行する）

## 4 使ってみる

前述の通り TEX による原稿作成では，テキストエディタ（「.txt」形式で保存できるメモ帳やワードでも可）で「ソースファイル」を作成し，TEX 本体でコンパイルして「DVI ファイル」あるいは「PDF ファイル」に変換した後，閲覧します．他のプログラミング言語同様，ソース入力（=原稿執筆）・コンパイル・閲覧を制御する統合環境を持ったエディタがいくつも開発されていますので，ここではその御利益に預かることにします．

なお，以下，Windows と Mac OS ごとに進めますので，事前に「放射線化学」用 TEX テンプレートを

http://www.radiation-chemistry.org/tmp_dl.html

からダウンロードしておいてください．全ての設定が終わったら RCtypeset.tex を開いてコンパイルしてみましょう．

### 4.1 Windows 用エディタ

ここでは WinShell3 を推奨します[*10]．

Winshell3 を

http://www.winshell.org/

からダウンロードの上，インストールしましょう．

[*10] 前述の推薦図書[3] では TeX Works を推奨していますが，漢字コードの整合性からここではお奨めしません．TeX Works 上で学会誌用のテンプレートを使用するとエラーが「必ず」出ますのでご注意ください．

http://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/texwiki/?WinShell3

にインストールおよび設定方法の説明があります．特に注意が必要な箇所は，「BibTeX」，「GSview」，「PDFview」の 3 カ所です．

#### 4.1.1 コンパイル

マウスで「メニューの実行（X）」→「LaTeX　F5」を選択します．原稿（ソースファイル）に問題がなければ下の出力画面の表示が「RCtypeset - 0 個のエラー，0 個の警告，0 個のオーバーフル，2 個のアンダーフル」と出るはずです．オーバーフルとアンダーフルは，1 つの行に文字が多すぎる／少なすぎる場合のメッセージですが，基本的には無視して構いません．入力ミスなどのエラーがある場合は，その原因となる行の番号が表示されますので，該当行を確認します．エラーの多くはほとんどが命令の打ち間違えか，「{...}」などの括弧の数が合っていないことが原因です．図表を入れている場合，図表番号を自動で振る必要があるためコンパイルは必ず2 回行います．

#### 4.1.2 ファイル閲覧

できあがったファイルの閲覧は「メニューの実行（X）」→「DVI 閲覧　F7」で行います．TEX の出力ファイルである DVI ファイルを開くためのプログラム Dviout が自動的に立ち上がります．ここで刷り上がりのイメージが（初めて）確認できます．

#### 4.1.3 PDF ファイル作成及び閲覧

学会誌の一連の編集作業は PDF ファイルで行いますので，さらに「メニューの実行（X）」→「PDFLaTeX F10」し，出来上がった PDF ファイルを「メニューの実行（X）」→「PDF 閲覧　F11」で設定した PDF ビュワー（通常は Adobe Reader）で開きます．

なお，ここではコンパイルから閲覧までの作業をマウスで行いましたが，各命令の後ろにある F5 や F11 はショートカットを示していますので，コンパイルは F5，DVI 閲覧は F7 を押すだけでも実行できます．

### 4.2 Mac OS X 用エディタ

ここでは TeX Shop を推奨します．

http://pages.uoregon.edu/koch/texshop/obtaining.html

から「Latest TeXShop」をダウンロードして解凍し，解凍された TeXShop ファイルをアプリケーションフォルダにコピーします．そして，ソフトを立ち上げ，環境設定を行います．

書類タブの左下の設定プロファイルから「pTeX（Shift JIS）」を選び，タイプセットタブのデフォルトのスクリプトを「Tex + DVI」にします．さらに，内部設定タブの設定を以下のように行います．

- （pdf）TeX（デフォルト：/usr/texbin）
  「/Applications/UpTeX.app/teTex/bin」
- LaTeX（デフォルト：simpdftex latex）
  「Xtexshop」

他の箇所は特に直さなくても問題がないようです．詳しい解説は小川版の Mac 用 TEX（Drag & Drop UpTeX）内の ReadMe.rtfd や，

http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~taku/osx/install_texshop.html

をご参照ください．

#### 4.2.1 コンパイル・ファイル閲覧・PDF ファイル作成

TeXShop では，画面上の「タイプセット」ボタンを押すことで，コンパイルと PDF ファイル作成およびファイル閲覧を一度に実行します．エラーがある場合は，ウインドウ上に表示されますので，指摘箇所を修正し，再度タイプセットしてください．

## 5 おわりに

今回は TEX の説明とダウンロード・インストール・設定方法を解説しました．上記に沿って設定を行った場合，テンプレートのファイルをコンパイルして閲覧できるはずです．どうしてもうまくいかない場合は，rc.texhelp@gmail.com までご相談ください．なお，次号（93 号）以降では TEX での原稿執筆の説明を行います．余裕があればいくつかの論文誌への TEX 投稿についても解説したいと思います．

## 参考文献

1) TeX インストールのための簡易マニュアル，
http://www.radiation-chemistry.org/doc/tex_install.pdf
2) 会誌用 TeX テンプレートの使い方簡易マニュアル，
http://www.radiation-chemistry.org/doc/how_to_write.pdf
3) 奥村晴彦，「改訂第 5 版 LATEX2ε 美文書作成入門」，技術評論社，2010 年 8 月，ISBN978-4-7741-4319-4 C3055

## 書　　評

# 工藤久明 編・著「放射線利用」オーム社

本書は，東大の原子力専攻（専門職大学院），原子力国際専攻での筆者らの教育の実践を基に，東大の教員，原子力機構や産業界の研究者によって分担執筆されている「原子力教科書」シリーズの一つとして刊行された．工藤久明氏が編集を担当し，執筆者には勝村庸介氏（東大）のほか，日本原子力研究開発機構の第一線の研究者10名が名を連ねている．

**写真**:　放射線利用

構成をあえて分類するとすれば大きく2部に大別され，前半の1〜6章が「放射線化学の基礎」（1章 放射線の種類と線源，2章 放射線と物質の相互作用，3章 線量測定，4章 ラジカルとESR，5章 パルスラジオリシス法，6章 水溶液の放射線化学）であり，Spinks and Woodsの教科書（Wiley）や田畑先生の原子力工学シリーズの教科書（東京大学出版会）の構成にやや似ている．オーソドックスなスタイルであると思う．後半の8〜17章は「放射線の産業応用・利用」（8章 高分子の放射線加工と応用，9章 半導体，10章 環境浄化への応用，11章 無機材料創製，12章 イオンビームを用いた材料分析，13章 イオンビームによる植物の突然変異誘発，14章 重イオンマイクロビームを用いた細胞局部照射実験，15章 食品照射（食品や農作物の殺菌・殺虫・芽止め技術），16章 ポジトロンイメージング技術を用いた植物研究，17章 医療における放射線利用）となっている．なお，7章には「原子力工学と放射線効果」が配置されており，これまでに刊行されてきた放射線化学，放射線利用に関する教科書，参考書にはあまり見られなかった本書の特徴となっている．以上の章だてをもって，原子力を学ぶ学生にとっては必要かつ十分な構成になっている．

難易度としては，それほど難解に書かれているとは思わない．学部生でも内容を理解できると思う．参考文献は章によってばらつきはあるが，比較的多く挙げられているので，本書の内容に疑問を持った場合には容易に調べることができる．ただ，前半である1〜6章でもう少し丁寧な説明が欲しいと思う部分もある．例えば，ベーテの式などは，（他の教科書でも大抵そうであるが，）式がいきなり示され，何故導出されたのか，式の物理的意味，あるいはイメージを学生に抱かせる様にはなっていない．一方で，パルスラジオリシスの5章では，反応速度論の基礎的部分やランバート・ベール則など，補足的な説明に紙面が割かれており，初学者にも親切である．後半部分である8〜17章は，非常に読みやすかった．材料開発・改質から育種，食品，医療，環境浄化に至るまで，非常に幅広い放射線の産業利用の全体像が，本書でつかめるのではないだろうか．

各章末には数は多くはないが演習問題が示されている．巻末には演習問題の解答例もある．但し，演習問題には良くありがちな計算問題が非常に少なく，大部分は論述，説明させる問題であり，考えさせる問題である．「なるほど．東大ではこの様な教育，講義をしているのかぁ．」と，私などは本書を読みながら，「私自身の今後の講義運営に活かせないか？」などと考えたりもする．

最後に，本書の特徴をもう一つ挙げるとすれば，図や写真を豊富に掲載している点にある．本文中では残念ながらモノクロであるが，扉を開けた最初の十数頁は，カラーの綺麗な写真が満載で，見ているだけでも楽しい．特に，本学会の若手会員にはお勧めの一冊である．

(福井大　　泉 佳伸)

# 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告

2011 年 7 月 6 日から 8 日にかけて，第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会がお台場の日本科学未来館で開催されました．そこで，今回行われました発表会についての感想等を報告させていただきたいと思います．

今回の発表会は，福島第一原発事故の影響により放射線に対する世間の注目が高まっているためでしょうか，一般の方やマスコミ関係者等の研究者以外の方々の参加も多かったのではないかと思います．実際 7 月 6 日には，“放射線から人を守る―福島原発事故の健康影響を正しく理解する為に―” と題して緊急公開講座が開催され，環境に放出された放射性物質の測定と飲食物への影響・人体への影響と防護の仕組み・リスクコミュニケーションの立場から，等の講演が行われました．7 月 7 日には，“福島原子力発電所から放出された放射能の環境影響，社会生活への影響：我々科学者の仕事は何か？” と題して緊急公開セッションが開催され，陸域への影響・海洋への影響・人体への影響・食品飲み水への影響・緊急時放射能測定・リスクコミュニケーション：フルディスクロジャーを考える，等の講演が行われました．また，放射線計測分科会イブニングセミナーとして，“原子力事故災害の今後の課題” と題して東電福島第一原発災害直後の線量測定・環境土壌汚染について―過去の経験に学ぶ，等の福島第一原発事故関連について多くの講演がされました．一般の方々にも大変興味深い内容であったのではないかと思います．

昨今，エネルギー問題は非常に重要な時期に直面しており，原子力発電に対する決断が今後の日本の将来を大きく左右することと考えられます．その決断において，一般の方々の総意が非常に貴重であるため，この様な意見交換の場が設けられることは非常に大切なことだと思います．今回以降の発表会においても，是非ともこのようなセッションが設けられたら思います．また，来年以降の研究会では，原子力発電関係の研究発表が一気に増加するのではないかと密かに期待しております．

原発事故に対する私個人の意見としましては，福島第一原発事故は非常に深刻な事故ではあるものの，野菜や牛等の汚染食品問題については少し騒がれすぎているという印象があります．冷戦時代の原水爆実験における汚染量は，今回の原発事故の汚染量と比較して桁違いに多かったはずです．また X 線 CT 検査等の放射線医療分野における被ばく量も現在マスコミ等で騒がれている被ばく量と比較して桁違いに多いからです．セシウムが検出された牛を食べ続けた場合，被ばくのリスクよりも生活習慣病のリスクの方が高いのではないか，とも思ってしまうのですが，過剰な節電による熱中症のリスク，風評被害のリスク，食中毒のリスク等，世の中には色々なリスクがあります．これらを “数値化” し，個々人に適った最小リスクの生活様式を追求するのも現実的課題かな，と考えてしまいます．

ところで，今回，私は 7 月 8 日の陽電子消滅セッションで研究発表をさせていただきました．これまでライフサイエンスや放射線計測分野のセッションで何度か発表しましたが，陽電子消滅セッションで発表するのは実に 7 年ぶりでした．その当時は “理工学における同位元素・放射線研究発表会” という会議名で，東京の日本青年会館で開催されていました．当時と比較すれば，陽電子消滅セッション全体の発表内容は基礎研究から応用研究へと進展している，という印象を持ちました．例えば，以前は高分子や金属等の構造解析研究が中心であったのに対し，近年では大型低速陽電子ビーム装置を利用して，スピン偏極陽電子研究，マイクロ陽電子ビーム及びこれを応用した陽電子寿命イメージング等の測定手段の研究が盛んになり，その応用研究分野も多様化してきていると感じました．口頭発表件数も全 122 件の内，陽電子消滅関連は 28 件もあり，放射線関連において一大分野を形成しているような感じを受けました．多数あるアイソトープの中でも，主に $^{22}$Na を用いた陽電子消滅研究が 2 割以上を占めるということは，よく考えるとすごいことのように思えます．

現在の私の研究としましては，金属系陽電子寿命標準物質の開発と陽電子寿命検査装置の開発を行っておりまして，陽電子消滅研究の普及と発展に貢献していきたいと考えております．

最後になりますが，このような素晴らしい発表会を開催して頂きました，日本アイソトープ協会様，運営委員，幹事の方々に感謝致します．

(独立行政法人産業技術総合研究所　山脇 正人)

# 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会報告

第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会（於：日本科学未来館）において，緊急公開講座「放射線から人を守るー福島原発事故の健康影響を理解するためにー環境や人体への影響，リスクコミュニケーションについて」（市民向け）および緊急公開セッション「福島原子力発電所から放出された放射能の環境影響，社会生活への影響：我々科学者の仕事は何か？」（研究者向け）が開催され聴講したので，報告する．

市民向けの公開講座は，7 月 6 日（水）15:50〜17:40 に開催された．事前登録した市民が緑色のリボンで名札を吊るし，会員と共に，みらい CAN ホール（収容人員：天井桟敷を含めて 350 名）をぎっしりと埋め尽くす様は壮観だった．講師は直前になって決まった由．筆者は，福島第一原発事故以来，一般の方々から放射線・放射能・Bq・Sv・体外被曝・体内被曝等あらゆる単語・数値について質問を受ける，話をして欲しいと頼まれるが，放射線化学でラジカル生成に目を奪われてきて，原子炉問題は部外者に近い．「どういう事を，どんな風に語れば，受け入れて貰えるのか」を学ぼうと，少々後ろめたい思いでこのセッションに参加させてもらった．

まず，「環境に放出された放射性物質の測定と飲食物への影響」と題して，学習院大学の村松康行氏の講演が行われた．体内の自然放射能（核種）とその物理的半減期 $T_p$，K-40（13 億年），C-14（5730 年），Rb-87（480 億年）などについて話され，これらに対し核実験やチェルノブイリ事故，福島第一原発事故により放出された放射性核種による汚染では，I-131，Cs-137，St-90 が問題となることを，多くの実測例をあげて説明された．放射線測定器（ガイガー カウンター，Ge 半導体検出器，Whole body counter など）も紹介された．

筆者が特に興味を持ったのは，土壌から植物への放射性物質の移行に関する以下の話題であった．チェルノブイリ事故から数年して，住民の内部被ばく線量を Whole body counter により測定した経時変化が示された． 実効半減期が約 70 日の Cs-137 減衰カーブである．ところが，Cs-137 ピークがノコギリ刃状に出る爺さまがいた．調査の結果この爺さまは，毎シーズン森林に自生するキノコを採って喰っていたことがわかった．粘土質土壌は Cs が強く吸着し植物への移行は遅いが，有機物が多い森林土壌は Cs を緩く吸着し，Cs を吸収するキノコなどの菌類や山菜に特異的に大量に蓄積される．この Cs-137 は 1945 年から 1980 年まで 400 回以上行われた核実験のフォールアウトに由来するものであるという（日本でのピークは 1963 年）．

松村氏は，作物中の放射能濃度の測定値をベクレルで示す方が，生産者も消費者も安心出来る，放射線の正しい理解・生産者ー消費者のネットワークの構築が必要である，と締めくくられた．

次に，大分県立看護科学大学の甲斐倫明氏による「人体への影響と防護の仕組み」と題した講演が行われた．講師は ICRP 第 4 委員であり，ICRP 2007 年勧告（pub.103）を踏まえて説明された．放射線影響 vs 線量の図についての説明があった．放射線の影響は確定的影響（しきい値あり）と確率的影響（LNT モデル）に分けて考える．DNA が損傷した場合修復が行われるが，誤りの修復が行われた時，細胞が自ら死んで個体を守る（アポトーシス）か，ガン化する，という生体メカニズムについて解説された．

最後に，読売新聞編集委員の前野一雄氏により，「リスクコミュニケーションの立場から」と題して，科学者・専門家の社会的役割と使命について，話題提供があった．

研究者向けの公開セッションは，7 月 7 日（木）12:30〜16:00 に開催され，6 件の講演が行われた．

「陸域への影響」について，東京大学大気海洋研究所の鶴田治雄氏は，「実測とモデル計算から，いつ頃（特に 3 月 15-16 と 20-23 日），どの地域でどの程度の乾性・湿性沈着したかを明らかにする必要がある」とし，大気エアロゾルや降水・土壌中の放射性物質を国と自治体が連携して測定，公表している結果の解析について説明があった．上智大学の廣瀬勝己氏は，「海洋への影響」について，大気経由と直接放出に分けて，国内外の推定結果をまとめて紹介された．大気経由で海域に降下した Cs-137 総量は 5.0 PBq，直接放出された Cs-137 総量は 1.4 PBq と推定される．

放射線医学総合研究所の酒井一夫氏は，「人体への影響」について，20 世紀後半までは，がんは DNA の傷が原因であり，放射線量に直線的に比例する（LNT モデル）とされていたが，DNA 損傷を修復する能力やがん化した細胞やがん化する可能性のある細胞を取り除く「生体防御能力」が身体に備わっていることがわかってきた事，いまだ確たる結論には至っていないが，チェルノブイリ事故の際に LNT モデルで予測されたような，がん死亡数が観察されていないことは、LNT モデルが必ずしも実際の健康被害を反映するものではないことの状況証

拠のひとつと考えられる，と説明された．

元放射線医学総合研究所の稲葉次郎氏より，食品汚染の現状について，公表データを使って紹介された．現時点での問題点として，食品個々の放射能濃度が得られても，内部被ばく量の計算をするのは難しく，現在行われていない日常食の測定が必要である．一日の尿中へのCs 排出量，もしくは，Whole body counter による直接計測ができれば被ばく評価ができる．過去の大気圏実験のころの日本人の体内 Cs-137 は 1964 年の 560 Bq が最高である．稲葉氏の予備的測定によれば，今回の事故による体内蓄積量は Cs-134 約 70 Bq，Cs-137 約 80 Bq であった．

日本分析センターの池内嘉宏氏より，事故後の日本分析センターが行ってきた膨大な試料測定や現地での放射線測定支援について紹介された．Cs だけでなく，Sr や Pu，U も化学分離後に分析している．Ge 半導体検出器は，15 台から追加されて現在 33 台体制で対応しているとの事であった．東京大学公共政策大学院の奥村裕一氏は，行政の中に科学のわかる専門家を置くことが大事で，それがリスクコミュニケーションを上手にやることにつながる，と述べられた．

以上，緊急公開講座およびセッションについて振り返った．今回の事故で，改めて放射線の勉強をし直した 2 日間であった．

(神奈川大学　　峯岸 安津子)

# ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告

ワークショップ「原子力における放射線効果」(International Workshop on Radiation Effects in Nuclear Technology) は東京大学 GCOE プログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」主催で，2011 年 3 月 9，10 日に東京大学弥生講堂一条ホールで開催されました．本ワークショップは 6 つのオーラルセッションとポスターセッションに区分され，国内外合わせて約 60 名の参加者による闊達な討論が行われました．各オーラルセッションにおいて講演者発表後に長時間の質疑応答を行う形式であるため，セッションのテーマについて包括的な議論を行うことを特徴としています．

初日は主催であられる東京大学勝村教授による開会挨拶後，セッション 1 において日立製作所の和田氏，JAEA 東海の Lin 氏，東京大学の室屋氏，および CEA Saclay の Baldacchino 氏より BWR，LWR 等の原子炉内の水の放射線化学に関する研究成果についてご講演がありました．続く特別講演では，東工大名誉教授の簱野先生により，近年出版された「Charged Particle and Photon Interaction with Matter. Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications.」，および「Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Recent Advances, Applications, and Interfaces.」のご紹介がありました．また，余談になりますが，簱野先生のご講演中，11 時 45 分頃三陸沖を震源としたマグニチュード 7.2 の地震が発生しました．筆者は講演を真剣に聞いていたため気がつきませんでしたが，関東地方も震度 3 とかなり揺れたようです．この 2 日後にマグニチュード 9.0 にもおよぶ東日本大地震が発生しました・鉄道や航空便の運休により，海外から参加された方々は日本に滞留されたのではないかと心配しましたが，皆様無事に帰路に着かれたようです．特別講演の後，ランチを挟み行われたポスターセッションは，過密日程により発表時間が短い中でも活発な意見交換が行われていました．ポスター賞が，一般研究者，若手研究者，および学生に区分されて設定されており，意欲的な学生の積極的な参加を促す素晴らしいシステムであると思いました．午後最初のセッション 2 では，JAEA 東海の永石氏，パリ南大学の Mostafavi 氏，JAEA 高崎の須郷氏，CIAE の He 氏，および北京大学の Peng 氏による講演が行われました．セッション 2 の共通キーワードは「再処理における放射線化学」ですが，5 者 5 様の異なるアプローチの研究発表であったため，専門外の筆者でも非常に興味深く拝聴することができました．初日最後のセッション 3 では，原子炉等で利用されている高分子の耐放射線性やその劣化度の非破壊評価法，および無機化合物コーティングによる改良法について，ParisTech の Colin 氏，大阪大学関氏，福井工業大学砂川氏，産総研小林氏によりご講演がありました．その後，バンケットが東大構内の松本楼で開催され，美味しい食事やお酒を頂きながら歓談が行われました．また，本ワークショップを開催するに当たり

多大なるご助力を賜りました東京大学勝村研究室を中心とするスタッフのご紹介があり，参加者一同から感謝の意を込めて盛大な拍手が送られました．

翌日 10 日朝のセッション 4 では，表面における放射線化学と題し，固/液界面における水の放射線誘起活性種及び分解生成物に関する知見について, Notre Dame 大学の LaVerne 氏，Royal Institute of Technology の Jonsson 氏，JAEA 東海の熊谷氏，Manchester 大学の Pimblott 氏による講演がありました．セッション 5 では腐食における放射線化学と題し，放射線誘起活性種による水中の合金や炭素鋼の酸化還元反応について Western Ontario 大学の Wren 氏，広島大学の日高氏，JAEA 東海の山口氏による発表がありました．昼食休憩後のポスターセッションはポスター賞の投票時間を兼ねているため，各人が投票先を決めるべく最後まで積極的な意見交換がなされていました．セッション 6 では，医療応用等に関する放射線化学と題し，北海道大学の市川氏，JAEA 高崎の田口氏，東京大学の前山氏，Chalmers 大学の Sihver 氏, Sherbrooke 大学の Autsavapromporn 氏より発表がありました．Summary では ACR Technology Development の Wren 氏が，すべての講演について詳細に解説され，Western Ontario 大学の Wren 氏により総括が行われました．最後にポスター賞の発表および東京大学勝村教授による閉会の挨拶により全行程が終了と相成りました．勝村先生は挨拶にて「原子力には放射線が付随し，システムの健全性に悪影響を与える．今後は原子力における放射線化学の責任が重要になってくる」とおっしゃっていましたが，今思えばなんと先見の明がある言葉であったことかと思う次第であります．東日本大震災に付随して発生した福島原子力発電所の事故を経て，筆者も日々その対応に追われる毎日ですが，改めて原子力における放射線化学の重要性を痛感しております．原子力の屋台骨である放射線化学分野をさらに発展させていくため，今後も意義のある国際ワークショップとして継続して開催されることを願っております．

(日本原子力研究開発機構　　木村 敦)

# ワークショップ「原子力における放射線効果」参加報告

平成 23 年 3 月 9 日–10 日に東京大学弥生講堂で開催された International Workshop on Radiation Effects in Nuclear Technology に参加したので，その概要を報告する．この会議は，東京大学グローバル COE プログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」の支援の下, 東京大学と日本原子力研究開発機構との共催で行われた原子力における放射線効果に関する国際ワークショップである．参加者は 59 名で，うち海外からは 15 名が参加した．口頭発表は 25 件, ポスター発表は 30 件あり, テーマも多岐にわたった．口頭発表は 6 つのセッションに分けて行われた．1 日目は東大の勝村庸介先生によるオープニングトークから始まり, 午前中にセッション 1「Radiation Chemistry relevant to Water Chemistry」が行われた．水化学や SCC 関連の発表はポスターでも 4，5 件出ており，水化学研究の現状を知ることができた．セッション 1 の後，簱野嘉彦先生によるプレナリートークが行われた．このプレナリートークでは昨今発刊された放射線化学の 2 冊の本「Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Chemical, Physicochemical, and Biological Consequences with Applications.」,「Charged Particle and Photon Interactions with Matter. Recent Advances, Applications, and Interfaces.」についてのレビューや発刊の経緯が説明された．昼食とポスターセッションを挟み，午後にはセッション 2「Radiation Chemistry Relevant to Reprocessiong」，セッション 3「Radiation Chemistry of Polymers in Nuclear Technology」が行われた．ここでは放射性核種の分離に用いる有機溶剤や高分子化合物の放射線劣化に関する研究などが発表された．1 日目の夜にはバンケットが東大本郷キャンパス内にある松本楼で開かれた．2 日目は午前中に「Radiation Chemistry at Surfaces」,「Radiation Chemistry relevant to Corrosion」というタイトルでセッション 4，5 が行われ，セッション 4 ではアルミナ微粒子存在下における過酸化水素やシリカ微粒子存在下における OH ラジカルの挙動など、物質表面における化学反応についての研究成果が発表された．セッション 5 では原子炉内の腐食についての発表があったが，オクロの天然原子炉についての講演などもあり興味深かった．昼食とポスターセッションを挟んだ後に最後のセッションとなる「Radiation Chemistry relevant to Medicine and Others」が行われた．バイスタンダー効果

や重イオンパルスラジオリシスなど幅広い分野の研究成果が報告された．閉会式の前には現 ACR Technology Development の David Wren 先生と University of Western Ontario の J. Clara Wren 先生ご夫妻による講評が行われた．このワークショップの翌日に東日本大震災に見舞われた．海外からのワークショップ参加者の安否が心配されたが，全員が無事に帰国されたと聞いて安心した．勝村先生をはじめとするワークショップのスタッフの方々のご尽力によるものである．大震災のあとの福島第一原子力発電所の事故によって，原子力を取り巻く状況が一変した．今後の原子力政策がどのような方向に向かうのかわかりかねるが，今回のような国際ワークショップを継続的に開催していくことは非常に重要なことであり，第二回，第三回と続けられていくことを願う．

**写真 1**　弥生講堂入り口にて集合写真

(日本原子力研究開発機構　　端 邦樹)

# RadTech Asia 2011 参加報告

平成 23 年 6 月 20 日–23 日，神奈川県・パシフィコ横浜にて，RadTech Asia 2011 が開催された．本会議は，第 12 回紫外線・電子線硬化技術国際会議（12th International Conference on Radiation Curing）と称し，主に紫外線・電子線硬化を用いた加工技術及びその産業応用に関する会議として数年に 1 度開催されている．

本年 3 月に起きた大震災及び福島第一原子力発電所事故の影響から参加者の減少が心配されたが，アジア各地・北米・ヨーロッパなどから多くの参加者が集い，口頭発表 109 件・ポスター発表 48 件が行われた．また，企業からの参加者が多く，企業ブースも特設展示場にて 33 社を数えた．

20 日夜に Get-Together-Party が催され，21 日午前より講演が開始された．まず，Area Overview として，北米・アジア・ヨーロッパの各地域，続いて中国・韓国・日本各国の紫外線/電子線硬化技術の市場動向に関する講演が行われた．以降の講演は 3 会場に分かれて行われ，General Session・Special Session 合わせて 15 の Session に分類されていた．General Session には，紫外線硬化インク等に関する “Printings”，表面硬化を利用した部材樹脂等への機能付加に関する “Coatings (Wood, Metals, Inorganic Materials, Plastics, Paper, Films)”，“Adhesives (Laminating, Pressure Sensitive, Release Coating)” 等の Session があり，照射装置に関する “Equipment: UV/EB Systems, Laser Source” Session もあった．また “Photofabrication: 3D-Fabrication, Micro-and Nano-fabrications” Session では，光照射による 3 次元構造体の作製，中でもマイクロサイズのロボットに関する講演は興味深く思った．

Special Session においては，“Nano Imprint”，“Nano Lithography”，“Green Technology”，“New Trend in Display Technology”, “Technology of Film Molding System” があり，微細加工の最新の動向やフレキシブル有機 EL 等のディスプレイに関する講演が並んだ．“Nano Lithography” Session では，EUV を用いたリソグラフィ及びレジストに関する講演がほとんどを占めているのが印象に残っている．

私の聴講した範囲は限られているが，開始剤やモノマーの反応メカニズムの検討から，コスト計算まで，基礎から産業応用へと幅広い内容であるように思った．応用分野を見ても，自動車や携帯電話，デジタルカメラの構成材料への応用から，新機能ディスプレイ等への新しい応用展開も見られ，紫外線/電子線硬化の幅広い可能性を感じる．また，環境負荷低減への取り組みに関する講演もあり，低環境負荷のモノマーの利用や紫外線 LED を用いた効率的な硬化技術に関する講演が印象的であった．私自身，“Green Technology” Session にて発表を行うとともに，人生で初めての座長の経験をした．至らない点があり，心が折れそうにもなったが，発表者の暖かい励ましにより，何とかやり遂げられたと勝手に思っている．「何事も経験」，多くのことを勉強させて頂いた機

会であった.

本会議は，最先端の情報を得られるばかりでなく，「Current Status〜」等の言葉を含む講演タイトルが散見されたように，紫外線・電子線硬化技術の動向を俯瞰するに非常に良い機会であると感じた.

**写真** 1　講演会場の様子

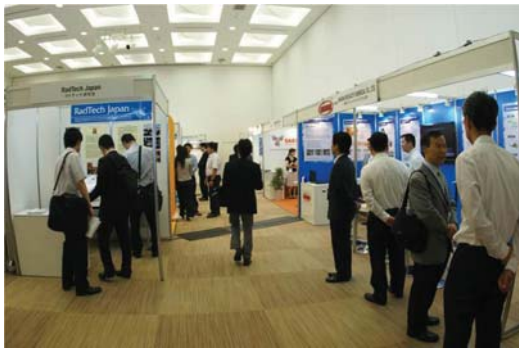


**写真** 2　企業ブース

(日本原子力研究開発機構　　佐伯 誠一)

# 27th Miller Conference on Radiation Chemistry 参加報告

2011 年 5 月 20 日から 25 日にかけて，スウェーデンで 27th Miller Conference on Radiation Chemistry が開催された．ミラー会議はヨーロッパ各国で隔年開催されている．会場は首都 Stockholm から長距離列車で 3 時間ほどの所にある Siljan 湖の畔の Tällberg という避暑地で，のどかな田舎町だった．ヨーロッパを中心に，北米，中国，インド，ニュージーランド，日本などから約 80 名の参加者があり，20 件の招待講演，事前審査で選ばれた若手研究者による 8 件の口頭発表，45 件のポスター発表があった．

**写真 1**　講演会場の様子

**写真 2**　招待講演の様子

発表内容は放射線化学初期過程，ラジカル・イオン反応，高分子化学，材料科学，原子炉応用など多岐に渡り，活発な議論が交わされた．筆者は Jay LaVerne 氏（アメリカ Notre Dame 大学）や Robert Crowell 氏（アメリカ BNL）によるナノ粒子や固体液体界面における放射線化学基礎過程の講演に特に興味を引かれた．会議が行われたのは夏至の一ヶ月前で，日の出が午前 4 時頃，日没が午後 10 時頃で，昼が長い北欧の初夏だった．スウェーデンでは 6 月に夏至祭が行われるそうだ．航空機の便の関係で，1 日目の Welcome dinner とその後の講演を聞くことができなかった．2 日目は午前 8 時 30 分から始まり，若手研究者の口頭発表などの後ランチとなった．ランチの後はディナーまで自由時間で，参加者はコーヒーを飲みながら議論したり，プールで泳いだり，テニスをしたり，周辺を散策したりと気ままに過ごしていた．ディナー後のセッションは午後 9 時 30 分まで続いた．2 日目は午前のセッションの後，長い昼休みとなり，ディナーの後にポスター発表があった．筆者は水和電子のフェムト秒パルスラジオリシスについてポスター発表を行った．

**写真 3**　エクスカーション，Siljan 湖畔の風景

3 日目は午前のセッションの後，エクスカーションがあり，夜にはカンファレンス・ディナーとなった．エクスカーションは Siljan 湖対岸の Mora という町までバスで行き，Mora 出身の 19 世紀の画家 Anders Zorn の美術館・邸宅などを見学した後，Siljan 湖をボートでクルージングしながら Tällberg まで戻って来た．その後のカンファレンス・ディナーではスウェーデンの伝統舞踊などが披露され，参加者はワインを飲みながら議論に花を咲かせ，夜を明かしていた．4 日目は午前のセッションの後，長い昼休み，午後のセッションとなり，会議の全日程が終了した．5 日目の朝に Tällberg を離れ Stockholm へと戻った．ランチからディナーまでが自由時間いうスタイルの国際会議は筆者にとって初めての経験であったが，各国の著名研究者や若手研究者と議論することができ，有意義な会議だった．

(大阪大学産業科学研究所　　法澤 公寛)

# 東日本大震災の被害と震災対策報告

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では，東北大学にも甚大な被害が発生しました．特に青葉山キャンパスでは，いくつかの建物で立ち入り禁止となるなど，現在に至るまで，研究・教育機能への顕著な影響が続いています．

宮城県は日本の中でも大地震の多発する地域です．また，東日本大震災の発生前には，宮城県沖を震源とするマグニチュード 7〜8 クラスの地震の発生確率が，向こう 30 年間で 99% であるとされてきました．そのため，東北大学においても，平常の安全点検活動において，地震対策を重点的に行ってきました．この対策の大部分が功を奏し，地震発生時のキャンパス内での負傷者はゼロでした．今回の震災から得られる教訓として，化学系の研究室において，どのような安全対策が有効であったのかについて，個人の経験と周囲の研究室・学科の状況を併せて報告致します．

## 1　建物の被害と耐震補強の有効性

今回の大震災までに，多くの建物で耐震補強が進められました．ですが、全ての建物で施工が完了したわけではなく，被害の大きかった建物も，概ね，耐震補強工事の未実施のものでした．また，建物の一部（例えば低層階）のみに耐震補強がなされていた場合には，未実施の箇所の損傷が激しく，結果的に全棟立ち入り禁止となることもあったようです．

損傷の激しい建物についても，倒壊・崩落という事態は生じませんでした．地震発生数日後に立ち入り検査を実施したところ，柱や梁の損傷が大きく，大きな余震が発生した場合に倒壊の恐れがあるとして，立ち入り禁止が措置されました．その後，大きな余震も発生しましたが，幸い，倒壊などには至っておりません．

## 2　研究室内での被害と安全対策の有効性

私の研究室では，ガラス器具が最も被害を受けました．特に，乾燥機の中のガラス器具は，ビーカーなどのシンプルな形状のものを除き，ほぼ全滅でした．また，書庫や書棚などのうち，地震対策を施していなかったものはほぼ全て倒れました．光学ベンチについては，固定していたにも拘らず，50 cm ほど動きました．

乾燥機やその他の装置について，低いスチール棚などに設置していたものは倒れずに済みました．また，耐震薬品庫は，移動していましたが，中の薬品は全て無事でした．さらに，ガスボンベも，ボンベスタンドを固定していたため，全て倒れませんでした．

今回の被害を受け，研究室内で留意すべきポイントは，概ね以下のものであると思います．装置や荷物の落下・倒壊に対しては，棚などの全体の重心を低くして設置し，なおかつチェーンなどにより建物の強固な部分に固定すると，被害が最小限になります．また、ガラス器具などについては，キャスター付のケースなどに入れておくと，ケース自体は動きますが，中身は無事のことが多いです．さらに，ボンベについては，できれば床にアンカーボルトで固定したボンベスタンドに設置すると，ボンベスタンドごと倒壊することがほとんどありません．

## 3　地震発生後の対処

地震発生後に最も留意すべきなのは火災です．特に化学系の研究室では，薬品火災やガスボンベからのガス漏れについて，できれば避難のときに情報を集めることができれば良いのですが，一人で対処できない火災などの場合，避難を優先すべきです．避難した後には，避難者名簿を作成し，各研究室のおおよその被害状況の情報を収集すると，後の対処が容易になります．

地震による停電が生じた場合，通電時に火災が生じやすくなります．そのため，もし建物に立ち入る余裕があれば，全ての部屋のブレーカーを落としておくと，通電時の火災を予防できます．今回の震災で，我々の学科でも，震災当日にブレーカーを落としておいたため，通電火災を防ぐことができました．

## 4　さいごに

今回の震災では，「想定外」の事態が多数生じました．ですが，事前に備えがあれば，震災時の事故や不便の多くが緩和されることを，身を以って知りました．震災からすでに時間も経ち，災害対策に対する気運も低下してきましたが，日ごろからの備えが非常に重要です．ぜひ，研究室や家庭の防災について，今一度チェックをしていただけることを希望致します．

(東北大院工　　越水 正典)

# 東日本大震災体験記：東京大学原子力専攻

当専攻は茨城県東海村に位置しています．当時，外国人数名を招きミニシンポジウムの最中でした．地震は日常的なので，初期微動の段階では「今日も御挨拶が来た」程度の認識でしたが，そこに瑕疵がありました．揺れは加速度的に激しさを増し，シンポジウムは中断，一目散に周囲に構造物のない中庭へと避難しました．それから数分間，地面は沸騰したように波打ち，立つことも困難でした．敷地の至る所に凹凸が生じ，ライフラインも断たれました．ただ幸い津波は到達せず，また耐震補強工事を一年前に終えていたこともあり，建屋の倒壊や人的被害は免れることができました．当専攻には原子炉や電子・イオン加速器等の設備があり，地震後は直ちに点検しなければならないのですが，絶え間なく続く余震で小生のチキンハートにも火が点いてしまう中，懐中電灯を片手に恐る恐る建屋内へと入りました．静まり返った暗闇には辺り一面物が散乱し，加速器のビームラインは曲がり，レーザーには落下物が覆い被さり，組み上げていた実験体系も原形を留めていない（写真 1）など，翌週予定していた実験への淡い期待は完膚無きまでに粉砕されました．さて，取り残された外国人を一刻も早く母国へ帰さねばなりません．中には初来日の方もおり，募る不安は測り知れません．しかし高速道路も交通機関も全て閉鎖され，唯一残された手段は一般道でひたすら東京を目指すことでした．信号は消え道路の至る所は陥没し，未曾有の大渋滞の中を 16 時間かけて東京に辿り着きました（普段は 2 時間足らず）．外交問題を解決し東海村へ戻ると、福島原発の影響により環境放射線レベルが上昇したとのこと．以降，計測器の前に陣取り 24 時間体制で放射線レベルを文科省へ報告し続けました．結局，自宅に戻り復旧作業を始めたのは一週間後のことでした．我が家の家具達は驚くほど謙虚であり，帰宅した私を，皆土下座で出迎えてくれたのでした．震災では多くのものが失われましたが，国境を越えた互いの信頼感，約 1 カ月にわたる避難生活の中で人との絆や生活の知恵など多くのものを得たことも確かです．復興はまだ始まったばかりですが，気持ちを新たに取り組んでいきたいと思う昨今です．

**写真** 1　照明復旧後に撮影したパルスラジオリシス実験体系

(東大院工原子力専攻　　室屋 裕佐)

# 東日本大震災体験記：JAEA 東海と東海村内

2011 年 3 月 11 日午後，東日本大震災が起こりました．私は東海の原子力科学研究所（旧原研東海研）の居室で仕事をしていました．この地震の特徴は非常に揺れている時間が長かったことでしょうか．最初は同室の人と，地震ですね．と話していましたが，どんどん揺れが大きくなり停電し，私は机の下に身を隠しました．揺れは収まることなく，数分間続いたように感じました．パソコンが倒れ，ディスプレイが落ち，床に書類と本が散乱し，目の前を入れたばかりのコーヒーが落ちていきました．その後，建物の外に退避した後も，同じような規模の地震が数回，襲って来ました．立っているのがやっとで，中には座り込んでいる人たちも見受けられました．携帯はまったく繋がらず，かろうじて，娘からのメールだけ届きましたが，返事も出せませんでした．

地震で心配であったのは実験室，特に管理区域内の実験室でした．当日は大きな余震が絶え間なく続き，最終的に安全確認を行うという判断が下され，管理区域に入った時は既に暗くなり始めていました．実験室の安全確認を行っている最中にも大きな余震が続き，とても嫌な時間でした．幸いなことに，装置類の転倒，落下は

我々の実験室ではありませんでしたが，大きな装置がいとも簡単に実験室の中であちこちに動き回ったと思われる状況を見て，地震発生時に誰もいなくて良かったと，本当に思いました．人がいたら，間違いなく，大きな装置と装置の間に挟まれていたのではないかと思われる状況でした．地震の際には慣性で動きますので，どんなに大きく重たい装置でも容易に動きます．私の自宅のピアノは 1 メートルほど動いていましたが，ピアノの上の花瓶はひとつも落ちませんでした．今回の地震の加速度の大きさがお分かり頂けると思います．そのような地震で起こった事象には，重量物の容易な移動，重心の高いものの転倒，引き出しが出てくることによるキャビネットの転倒，アンカーの強度不足による転倒などがあります．今回の地震で，普段から，実験室・居室などの耐震対策が行ってきたことが，幸いしたと言えます．その中でもいくつかの教訓があるとすると，実験室などの重量物がある場所では，退避場所の確保をしておくこと．アンカーで固定する際には，ある程度荷重評価を行うか，必要以上と思える丈夫な固定を行う．キャビネットなどは引き出しが出てこないようにしておくこと．などがあるでしょう．また，今回の地震は金曜日の午後であり，実験室で実験途中の薬品や使用中の RI などが無かったことも幸いしていると思います．実験室から離れるときには，危険物は安全な状態にしておくことが必要であるかもしれません．

その後，ようやく帰宅できることになったのは 18 時を過ぎていたと思います．東海村内の道路はいくつかの場所で大きく破壊され，車の通行を阻んでいました．川や鉄道にかかっている橋は通行禁止になったところが多数ありました．そのため渋滞が発生し，研究所内から出ることが出来ない車で所内は大渋滞していました．私は家まで約 6 キロの距離でしたので，車を研究所に残し，歩いて帰宅しました．災害時にどのように避難するか，自宅にはどうやって戻るか，などは普段から考えておくべき必要があると知らされました．現在，私は車に折りたたみ自転車を入れてあります．地震直後から断水になっていましたので，途中のコンビニなどではすでに水のペットボトルが完全に売り切れていました．お茶などのペットボトルはまだ一部の店で売られていましたので，帰宅途中で何本も購入し，両手に持って帰りました．このとき思ったのは，たとえ小さくても，懐中電灯を持っているべきであったと感じました．歩道には崩れた塀，高いところから落ちてきた瓦礫が散乱し，また，ところどころ陥没し，凹んでいました．完全に停電している状態では真っ暗で，歩いて帰るのも容易ではありませんでした．また，車からも見えづらく，危険でした．家に帰宅すると家族は家の前の車道に車を出し，車内にいました．大きな余震が続いていたため，家の中に留まっていることが出来る状況ではありませんでした．地鳴りと余震の恐怖の中，真っ暗闇に光り輝いていた満天の星の美しさに驚いていました．

東海村は太平洋に面しており，5 メートルを超える津波が襲いました．隣接する東海第 2 原子力発電所では，1 台のディーゼル発電機に被害がありましたが，津波対策で堤防の高さのかさ上げ工事を行っている最中であり，そのため，残りの発電機が生き残ることができ，大事には至りませんでした．東海村の北に隣接する日立港では津波が海岸線の国道も超え，大きな被害が出ています．また，南には那珂湊，大洗がありますが，ここでも津波による大きな被害が出ています．

最近になってようやく，研究所内の建屋の被害が甚大であることが分かってきました．食堂は立ち入り禁止となり，使用不能．被害は居室やコールドの実験室だけでなく，管理区域もあり，私の非密封ＲＩ管理区域内の実験室も，建屋の損傷により，現在，実験が禁止されていて，復旧がいつになるか分からない状況です．我々にとってこの震災は，まだまだ現在進行形です．

(日本原子力研究開発機構　　平出 哲也)

# 東日本大震災体験記：生化学実験室で体験したこと

3 月 11 日の大地震は原子力機構・原子力科学研究所（茨城県東海村）で遭遇しました．これまでに体験したことのない激しく長い地震で数分間は全く身動きがとれませんでした．直ぐさま，研究室内の人員掌握を行い，実験室の二次災害を防ぐため，一時的な点検を済ませましたが，その後は一時避難場所で引き続き起こる大きな余震に震えるばかりで何もできない状況でした．その時，平地に避難していましたが，海岸近くに立地してい

る我々の事業所は津波の危険についてはそれほど心配しておりませんでした．しかし，近くまで 10 m 近い津波が押し寄せていたと聞いて，あまりに無防備であったと反省しております．幸い当機構では人身被害もなく原子炉からの放射能漏れなどもありませんでした．しかし，J-PARC をはじめとする大型の施設は甚大な被害を受け，復旧までに相当の時間と費用を要すると見込まれています．

**写真**: 実験台上の DNA シーケンサが落下し大破した．

我々の実験室は，薬品保管庫や大型の装置などは転倒防止を行っておりましたので，固定されていたものの半分程度の実験装置は，被害を免れることができました．しかし，転倒防止を行った実験台の上で固定されていない装置は，転倒してしまい 1000 万円の DNA シーケンサが大破してしまいました（写真）．意外にも 19 インチラックなどのキャスター付の装置や，固定されていない実験台の上の装置は，台が動くことで揺れを吸収したらしく，装置は被害を免れたものも多くありました．また，大きな装置を壁にアンカー固定したものは，アンカーごと抜けてしまい，転倒こそはしませんでしたが，アンカーの意味をなさなかったものも多く見受けられました．以上が実験室の主な被害状況です．

このような中，福島第一原発において事故が起こり，当機構は支援に全面的に協力する体制が引かれました．事故直後から，福島において環境放射線モニタリング作業への動員や原発事故後の健康に対する不安に答えるための「健康相談ホットライン」が文科省により開設され，私も 4 月上旬に電話対応を経験しました．その経験を通して私自身が感じたことは，放射線の生体影響に関して，福島の地元住民の方々に科学的な知見を説明してもあまり理解してもらえないことでした．特にこの度のような低線量放射線の生物影響というのは，統計的なデータに有意な差がなく，科学的な知見から物事を判断しにくいこと．また，これまでの原発安全神話が崩壊したことによる反原発意識が原因ではないかと思います．この電話相談によるリスクコミュニケーションの詳細については，当機構の赤松氏が「放射線生物研究, 46, 87–92 (2011)」に記事としてまとめてあります．当機構が福島支援を本格的に行うに際して，機構理事長が発表した声明の一部に以下のような文言がありました．「単なる知識の普及というよりも，県民のみなさんと痛みを分かち合う精神的交わりが肝要である」これは，我々が一般向けにアウトリーチを行う際にとても重要な考え方であると思います．今後，放射能汚染を最小限に抑えることと，見えない放射線に対する知識を広めることが放射線に関する専門家としての当学会が抱える課題ではないかと考えます．また，1000 万トンともいわれる放射性廃棄物の安全な埋蔵に向けて効果的な方法を提供することや，除染廃棄作業への協力が直接的に我々の協力できることだと思っております．最後にこの度の大震災で被災された方々のご冥福をお祈りするとともに，被災地の一日も早い復興を祈念いたします．

(日本原子力研究開発機構　藤井 健太郎)

# 福島県緊急被ばくスクリーニング

被災者の方々には心よりお見舞い申し上げます．

非常に長周期の揺れが長く続き，廊下に出ました．それが東日本で起こった驚くほどの巨大地震のせいだったとは，数分後，ネットで見たニュースで知りました．3/11 に未曾有の震災が発生して以来，有数の原発立地県である福井県では，県内各施設の緊急的な安全点検，視察が続きました．筆者も県の原子力安全専門委員の立場で，発電所のディーゼル建屋や取水設備等の視察に追われました．この間，福島原発の事態の推移が気がかりでしたが，なかなか足を運ぶことができずにいました．

文部科学省より原発事故への対応，協力について照会があり，福井大学附属国際原子力工学研究所からは，「GW 期間中の 10 日間，スクリーニング要員を派遣する用意がある」旨，回答していました．GW 期間中としたのは，本務（特に講義）に与える影響が最も少ないと判断したからです．GW 直前の 4/28 になってようやく，「引き上げる派遣チームが多く，GW 期間からスクリーニング体制が手薄になる．是非お願いしたい.」旨，協力要請を受け，翌日からの活動に向けて動き出しました．前半の 4/29–5/3 を 3 名体制，後半の 5/4–5/8 を 2 名体制で派遣協力することにし，派遣メンバーに連絡しました．

現地では，福島県緊急被ばくスクリーニング本部を拠点として毎朝晩のミーティングがあり，日々の担当会場は当日朝に知らされました．福井大チームは，主に川俣町体育館スクリーニング会場を受け持つこととなり，1 日のみ，会津保健福祉事務所スクリーニング会場を担当しました．

**写真**: 川俣町体育館スクリーニング会場（写真では分かりにくいが、建物周囲の地面が約 20 cm 下がってしまっているところもある.）

基本的には，10 時–17 時の時間帯に受付に来られたスクリーニング希望者に，GM 式サーベイメータで着衣の上から全身の汚染検査を行います．1 日当たりのスクリーニング人数は全 10 会場合わせて 1,000 名弱であり，事故直後と比べて随分と落ち着いてきている様子でした．検査そのものは 1 人あたり 5 分もかかりません．マニュアルでは 100 kcpm 以上で全身除染と決められていましたが，除染対象者は一人もおらず，部分的に高い値（多くは靴底）を示しても，せいぜい数 kcpm でした．（除染対応として，建物外には自衛隊がテントを張り，待機していました.）数 kcpm と言えば，日常の管理区域での値よりはかなり高いわけですが，ICRP 2007 年勧告でも述べられている「現存被ばく状況」にあり，「計画被ばく状況」とは明らかに異なるわけです．例えば，スクリーニング会場の床は朝はバックグラウンドが低いのですが，土足で上がって頂くので夕方までには外の砂が徐々に持ち込まれ，そのために室内床の計測値は上がってきます．一歩屋外に出ると，雨のかかる様な場所はアスファルト路面であっても，相当の計数率を示します．

余談ですが，私たちが担当した時期がちょうど山菜の季節でしたので，山で採れた筍やタラの芽，ワラビ，ゼンマイなどの持ち込みが多かったです．出荷用ではなく，ご自分たちで食べるのを毎年楽しみにしている様です．食品については暫定規制値があり，放射能濃度の絶対測定が必要です．GM 式サーベイメータではその様な対応は無理ですので，「お墨付きは与えられないですが参考までに.」と説明を加えた上で，測定対応しました．また，犬（毎日散歩させますので，どうしても肉球あたりに放射性物質がくっつきます）や自家用車の測定依頼も一日数件ありました．汚染を極力防ぐ方法，除染の方法など，一般的注意をお話しし，不安な点をお聞きして少しでも不安を解消できる様に努めました．（一般的なボランティアとは異なり，専門家としての対応が求められる部分です．また，大学人という専門家として，また中立の立場からの説明は，住民に安心感を与える様でした.）

学会に所属する私たちいわゆる専門家集団として，今回の事態にどの様に貢献できるかを考えますと，色々な形があると思います．一度拡散してしまった放射性物質は長く環境中に残りますので，効率的で安全な除去処分方法の提案と共に，息の長いスクリーニング活動や健康相談等が必要だと感じた次第です．

(福井大　　泉 佳伸)

# 東日本大震災顛末記–液状化と原発事故–

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災および福島第一原子力発電所の事故により，都立産業技術研究センターにおいても施設および業務に多大な影響が及んだ．特に原発事故に関しては，未だ多くの関連業務が展開されており，いつ収拾がつくのか不明であるが，平成 23 年 8 月現在までの状況について報告する．

震災前の予定では，都立産業技術研究センターは平成 23 年 4 月より，東京都江東区青海に建築中の新しい施設に移転する事になっていた．震災当日は，移転のために機器や器具・書類等を段ボールに詰める最終作業中だった．東京での震度は 5 強であり，東北地方に比べれば弱い揺れではあったが，長時間に渡る横揺れは水分を多く含む土壌に液状化現象をもたらした．お台場近くの埋め立て地に建設中の江東区青海の施設は，液状化のため外構舗装の沈下や建物本体と共同溝との接続部分が損傷し，引き渡しを目前に修理が必要となった．一方，駒沢支所（旧アイソトープ総合研究所）は，3 月末までに撤去する事が決まっており，とりあえず北区西が丘の本部に移った．8 月下旬に建物が引き渡され，9 月に移転作業の予定となっている．

震災当日は JR が終日運休となり，職場に宿泊してひたすらテレビで震災の状況を見続けた．悲惨な津波の映像の合間に，福島第一原発が停止はしたが冷却不能になっている，という報道が入るようになり，不吉な予感を感じながら 12 日の朝，家路についた．家に着くなり電話が鳴り，「福島第一原発が冷却不能になっていて放射性物質が飛散する危険性がある．ついては，放射能を連続測定する体制を整えたいので，集合するように」との事であった．

駒沢支所には，もともと空間線量率を連続測定するモニタリングポストが設置されていた．しかし，移転のため梱包され，再設置することは無理であった．そこで，駒沢支所の敷地内に，シンチレーション型サーベイメータで空間線量率を連続測定してプロッタに打ち出すシステムと，大気浮遊塵の捕集器をセットした．浮遊塵を捕集したろ紙を測定するゲルマニウム半導体検出器も梱包されていたが，開梱し，測定が始まった．これを皮切りに，原発事故に関連した業務に対応している．内容を図 1 にまとめたので，ご参照いただきたい．

3 月 15 日の早朝 5 時ころ，それまでバックグラウンドレベル（0.06–0.07 $\mu$Sv/h）であった空間線量率が約 1.5 倍の数値を示した．そこで，大気浮遊塵の捕集時間間隔を 8 時間から 1 時間に短縮することになった．10 時過ぎ，空間線量率がバックグラウンドの約 10 倍に上昇し，この一時間に捕集された核反応生成物の放射能濃度も最大値を示した．15 日夜と 16 日未明および 21–23 日にかけての降雨の際に，空間線量率および浮遊塵とも数値の上昇が確認されたが，その後は減少し，現在ではほぼバックグラウンドレベルに回復している．この間の測定データは，所内の研究発表会（http://www.iri-tokyo.jp/joho/seika/h23_youshi/t-fukko01.html）および RADIOISOTOPES 誌に論文投稿されているので，興味のある方は参照されたい．これらの測定結果は，東京都新宿区の健康安全研究センター（http://monitoring.tokyo-eiken.go.jp/mon_air.html）や原子力研究開発機構のモニタリングポストで測定され公表されている結果（http://www.jaea.go.jp/jishin/monitor.pdf）と比較すると，当然のことながら，経時変化の傾向がよく一致していることが確認できる．数値の低下をうけて，大気浮遊塵の捕集時間は，3 月 24 日から 8 時間に，4 月 11 日から 24 時間になった．しかし，シンチレーションサーベイメータによる空間線量率の測定および大気浮遊塵の捕集は，4 月以降も職員不在のまま駒沢支所で続いており，回収したろ紙を西が丘本部に移転させたゲルマニウム半導体検出器で測定する，という変則的な状態となっている．現在までの浮遊塵の測定結果は, http://www.sangyo-rodo.metro.tokyo.jp/whats-new/measurement.html から確認することができる．

3 月 21–23 日の核反応生成物を含んだ降雨により，水の放射能濃度が上昇したことが報道され，東京都水道局の依頼で 22 日から浄水場の浄水の測定が入った．23 日まではヨウ素 131 が 100 Bq/kg を超えていたが，徐々に減少し，4 月以降はほぼ検出限界以下である．当センターでの測定は，8 月 7 日まで続いた（http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/press/shinsai22/pdf/110606/110606_03.pdf）．また，農産物・畜産物や魚介類から核反応生成物が検出された，と報道があるたびに，東京都農林水産部の依頼で測定を行っている（図 1 参照）．7 月には，土壌・8 月からは，家畜由来の堆肥等の分析も行っている．

原発事故の風評被害の一つに，一般の工業製品が放射能汚染していないのか，というものがある．基本的に屋内で製造・保管されていた製品については，空から降っ

てきた核反応生成物が付着するはずはないのだが，証明書がないと取引を拒否する国もある．そこで，持ち込まれた工業製品の放射線量測定試験（と言っても，汚染検査みたいなもの）を 4 月 15 日より開始した（図 1 参照）．測定器は，GM サーベイメータもしくはシンチレーションサーベイメータをお客様の要望によって選択してもらい，英語の証明書も出す．また，センターに持ち込めない製品については，出張して測定するサービスを 7 月 26 日から開始した．このように，原発事故に関連した新たな業務が次々と発生し，いつ終わりが来るのか見えない状況である．これら，当初は駒沢支所で研究員として勤務していた職員 12 人程度で始めた作業が，7 月からはアルバイト 2 名も含めて総勢 20 人近い体制となった．

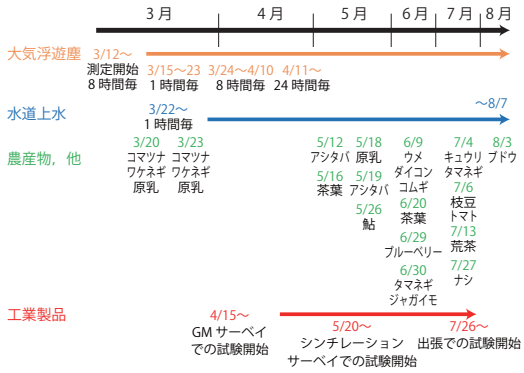



**図 1**　原発事故に伴って都立産業技術研究センターで実施している業務

原子力機構や放射線医学総合研究所，大学の原子力工学系の学科の方々の中には，原発事故による健康相談を担当させられた方も多く，本誌においても報告がされているところである．健康相談ホットラインほど多いわけではないが，公表している測定データに関する問い合わせから始まって，砂場で子供を遊ばせて大丈夫か，プールで泳がせても大丈夫か，とか市販のサーベイメータなる物を購入して測定したら数値が高い，等々の相談が都民からあった．東京では 3 月 15 日を除けば平常時より若干高い程度であり，そもそものバックグラウンドが同レベルの地域も存在するわけだが，どうにも理解が進まないようである．東京で騒いでいては，福島の人たちはどうなってしまうのか，と思ってしまう．

現在，福島市内の空間線量率は，1–2 $\mu$Sv/h 程度である．この線量率はどの程度のものであろうか？先日，原子力機構高崎の TIARA サイクロトロンでイオンビーム照射のマシンタイムをいただいたので，照射室内の線量率を測定してみた．ビームの取り出し口の下で 3 $\mu$Sv/h であった．すなわち，イオンビーム照射直後のポートと同様の線量率の下で福島市民は生活している事になる．照射室では，照射が終了すれば線量率は急速に低下する．しかし，福島市内の空間線量率は，表層の土壌を総入れ替えでもしない限り，年のオーダーで今の状態が続くことになる．業務従事者の手当てをもらっていいものか，と思った．

事故以来，放射線化学を生業としてきた者として，何か役に立てる事はないのか，自分のできる事で貢献できないのか，という思いで向き合ってきたつもりである．多種多様な業務の手伝いをしてきたが，どうにも役に立っている，という実感が全く得られていない．事態の早期収束と空回りする思いの終わる日を待ち望むのみである．

(都立産業技術研究センター　　中川 清子)

# A Huge Tragedy Befalls a Great Nation

Professor Y. Katsumara invited me to the International Workshop on Radiation Effect in Nuclear Technology held at the University of Tokyo. On 10th March after a series of interesting discussions during our sessions the workshop drew to a close. A few of Professor Katsumara's colleagues from Tokai, namely Dr M. Lin and Dr Y. Muroya, invited myself and a team from Beijing University headed by H. He to give a lecture after the conference in Tokyo. The University's centre for research on radiation effects is located close to the Japan Atomic Energy Agency and the sea. At 9:30 am on 11th March as I entered the centre I noticed that the building had changed in appearance, large metal pillars had been notably added. I asked why these pillars were installed. I was informed that in order to adequately protect the building against earthquakes it had become necessary to reinforce the building with steel

columns. My lecture commenced at 1:30 after lunch; and at 2:15 Professor H. He started his speech on Chinese nuclear projects. At about 2:45, as the lecturer was informing us of China's ambitious nuclear project, the building began to shake.

As a result of the 12 trips I had previously made to Japan in the past decade I had grown accustomed to these tremors. However, I immediately felt that this one was different to the previous earthquakes I had experienced. The tremors did not become weaker with time, instead they increased in intensity. Dr Muroya told us to leave the lecture room. When we left the building I saw cars being thrown about, bouncing up and down like tennis balls; it was a terrible scene to witness. As humans we step outside and place our feet on the ground without a second thought, this is something we take for granted. At the moment I felt my feet losing grip my mind went crazy; I started to imagine the ground opening up and swallowing me, and then images of my wife and daughter came to the forefront of my mind. Dying without being able to speak to them for one final time was inconceivable.

Photo. 1 The picture that I made by my iPhone at the guesthouse, showing the earthquake time on 11 March 2011.

Around me, shocked women were crying. Of course, we were all shocked but tried hard to suppress the feeling. My Japanese colleagues immediately announced that they had never experienced an earthquake quite like it in all their lives. I noticed a few people gathered around the YAYOI nuclear reactor nearby; and later I found out the earthquake had caused some damage to the JAEA reactors which are located at 200 m. The picture 1 that I made by my iPhone at the guesthouse, showing the earthquake time on 11 March 2011.

An hour later, a young Japanese researcher approached me to apologise for the earthquake. His apology affected me so much; it was almost as shocking as the earthquake itself! Apologising for a natural disaster is such a bizarre concept in western culture! It was cold at night and I slept in the hallway of a guesthouse with several families who had left their homes. We were hungry; once every half an hour another major tremor would awaken us and some of us went outside the building several times during the night. The assistance I was given in leaving Japan by my colleagues in the country and the general reaction of the Japanese people in the face of such a catastrophe showed the foundations of a great nation. We did not discover the intensity of the quake until the following day on our journey to Tokyo when we were able to reconnect the TV and iPhone. The 120 km journey to Tokyo lasted for 14 hours. Watching the images on TV, it was impossible to grasp the effects of the tsunami.

On 13th of March, I left Japan but my thoughts were still with the Japanese people. The airport was packed with camping passengers before my departure. My flight was the first to land in France after the earthquake and on my arrival at the airport I was approached by tens of journalists eager to hear of my experience of the quake but it was very difficult to describe what I went through in Japan. One thing's for sure: I will not forgot this unique experience for as long as I shall live.

(Universite Paris-Sud 11 Mehran Mostafavi)

# 第 54 回放射線化学討論会

**日時**　平成 23 年 9 月 28 日（水）–30 日（金）
**場所**　大阪大学 吹田キャンパス
（大阪府茨木市美穂ヶ丘 8–1）
**会場**　産業科学研究所 管理棟 1 階 講堂
インキュベーション棟 1 階 講義室 I-117
**主催**　日本放射線化学会
**共催**　大阪大学産業科学研究所，日本化学会，日本原子力学会，日本加速器学会
**スコープ**　放射線化学の基礎，応用及び関連分野の研究発表を行います．関連分野には，原子力，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，デバイス物理などと放射線化学との境界領域を含むものとします．
**登録費**　一般：3,000 円　学生：2,000 円
**懇親会**　平成 23 年 9 月 29 日（木）18：30〜　生協食堂
会費：3,000 円
**事務局**　〒567–0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8–1
大阪大学 産業科学研究所 吉田研究室

## プログラム

9 月 28 日（水）［第 1 日目］管理棟 1 階 講堂
開会のあいさつ（13:00〜）

口頭発表 1，2（13:10〜14:55）
座長：高橋憲司

1O01 フェムト秒パルスラジオリシスによる水和電子生成過程と反応機構の研究
○法澤公寛，樋川智洋，近藤孝文，菅晃一，楊金峰，古澤孝弘，吉田陽一（阪大産研）

1O02 Direct measurement of hydroxyl radical by picosecond pulse radiolysis
○ M. Lin[1]，Y. Muroya[2]，Y. Katsumura[2]，A. K. El Omar[3]，M. Mostafavi[3]，J. Meesungneon[4]，J.-P. Jay-Gerin[4]（1：原子力機構，2：東大院工，3：Univ. Paris-Sud，4：Univ. Sherbrooke）

1O03 沸騰水の放射線分解による水素の発生と濃縮 -福島第一原子力発電所 4 号機の水素爆発の謎
○勝村庸介[1]，山下真一[2]，平出哲也[2]，松浦千尋[3]，岩松和宏[1]，田口光正[2]（1：東大院工，2：原子力機構，3：科学技術社会研）

座長：永石隆二

1O04 フリッケゲル線量計による炭素線の線量分布測定
○前山拓哉[1]，福西暢尚[1]，石川顕一[1,2]，深作和明[1,3]，高木周[1,2]，古田琢哉[1]，野田茂穂[1]，姫野龍太郎[1]（1：理研，2：東大院工，3：碑文谷病院）

1O05 高温水中における水和電子の高速時間挙動：熱化距離およびスパー反応
○室屋裕佐[1]，林銘章[2]，Sunuchakan Sanguanmith[3]，Jintana Meesungnoen[3]，勝村庸介[1]（1：東大院工，2：原子力機構，3：Univ. Sherbrooke）

1O06 Computer modeling of inhibition of $\alpha$-radiolysis of water by $H_2$2 addition
○ P. Lertnaisat[1]，Y. Tamoto[1]，Y. Katsumura[1]，S. Mukai[2]，R. Umehara[3]，Y. Shimizu[3]，M. Suzuki[3]（1：東大院工，2：NDC，3：MHI）

1O07 フェムト秒パルスラジオリシスによるアルコール中の溶媒和電子および溶媒和前電子の生成過程の研究
○樋川智洋，法澤公寛，近藤孝文，菅晃一，楊金峰，古澤孝弘，吉田陽一（阪大産研）

（休憩 20 分）

口頭発表 3，4，5（15:15〜17:30）
座長：小林一雄

1O08 ゼオライトによる放射性汚染水処理における放射線効果の検討
○永石隆二，熊谷友多，西原健司，山岸功，小川徹（原子力機構）

1O09 水とモルデナイトとの混合物の放射線分解での水素発生と収量評価
○熊谷友多，永石隆二，山田禮司，西原健司，山岸功，小川徹（原子力機構）

1O10 イオンビームパルスラジオリシス法による塩化物および臭化物イオンをプローブとした水分解挙動の解明
○岩松和宏[1,2]，田口光正[2]，須郷由美[2]，倉島俊[2]，勝村庸介[1]（1：東大院工，2：原子力機構）

座長：近藤孝文

1O11 アデニンダイマーカチオンラジカルの電荷移動のダイナミックス
○小林一雄，古澤孝弘（阪大産研）

1O12 培地移動放射線バイスタンダー効果におけるミトコンドリア ROS と長寿命ラジカルレベルの時系列比較
○熊谷純[1]，見置高士[1]，菓子野元郎[2]，渡邉正己[3]（1:名大院工，2:大分大医，3:京大原子炉）

1O13 Excess electron transfer through consecutive thymine sequence in DNA
○ Man Jae Park，Mamoru Fujitsuka，Kiyohiko Kawai，Tetsuro Majima（阪大産研）

座長：室屋裕佐

1O14 イオン液体中の過剰電子の溶媒和ダイナミクス
○高橋憲司[1]，James F. Wishart[2]（1：金沢大，2：ブルックヘブン国立研究所）

1O15 フェムト秒パルスラジオリシスによるドデカン中の電子の時間挙動の研究
○近藤孝文，楊金峰，法澤公寛，菅晃一，樋川智洋，小林仁，小方厚，吉田陽一（阪大産研）

1O16 100 フェムト秒高時間分解能パルスラジオリシスの可能性
○楊金峰，近藤孝文，菅晃一，樋川智洋，法澤公寛，小方厚，吉田陽一（阪大産研）

理事会（18:00〜 管理棟 2 階 大会議室）

9 月 29 日（木）［第 2 日目］管理棟 1 階 講堂
口頭発表 6，7（9:15〜11:00）
座長：小泉均

2O01 放射線化学による分離型ラジカルカチオンの吸収と発光
○藤乗幸子，藤塚守，真嶋哲朗（阪大産研）

2O02 放射線重合における線量率効果および LET 効果の検討
○中川清子[1]，田口光正[2]，木村敦[2]（1：都産技研，2：原子力機構）

2O03 パルスラジオリシス法を用いた芳香族化合物の一電子還元種の炭素イオウ結合解離による分解反応機構の研究
○山路稔[1]，木村巧[2]，藤乗幸子[2]，藤塚守[2]，真嶋哲朗[2]（1：群馬大院工，2：阪大産研）

2O04 多層シクロファン内正電荷非局在過程の検討
○藤塚守[1]，藤乗幸子[1]，芝原雅彦[2]，渡辺源規[3]，新名主輝男[3]，真嶋哲朗[1]（1：阪大産研，2：大分大教育福祉，3：九大先導研）

座長：藤塚守

2O05 Photochemistry of pyridine—OH complexes by using pulse radiolysis-laser flashphotolysis
○ Mohamad Syafie，Kazumasa Okamoto，Ryoko Fujiyoshi，Takashi Sumiyoshi（北大院工）

2O06 放射線照射による導電性高分子の重合
○小泉均，石垣彰大（北大院工）

2O07 放電法によるかご型シルセスキオキサンへの水素原子包接とその脱離挙動
○駒口健治，岡山竜大，岡和行，今榮一郎，大山陽介，播磨裕（広大院工）

（休憩 15 分）

総会（11:15〜12:00）

昼食（60 分）

ポスター発表（13:00〜14:30，インキュベーション棟 1 階 講義室 I-117）

（休憩 10 分）

受賞講演（14:40〜15:20）
座長：中川和道
アンジュレータ放射光による真空紫外〜軟 X 線領域における自然二色性研究
田中真人（産総研）

（休憩 10 分）

シンポジウム（15:30〜17:30）
「東電福島原発事故 特別セッション」
座長：田川精一
依頼講演

2S01 原子力発電所の安全確保の仕組みと福島第一原子力発電所事故
○中村隆夫（阪大院工）

2S02 高分子捕集材等を利用した環境からの放射性物質回収除去技術の開発
○伊藤久義，瀬古典明，黒木良太，矢板毅，長縄弘親，中山真一（原子力機構）

コメンテーター

2S03 福島支援に放射線化学は何ができるか？
○勝村庸介（東大院工）
2S04 原子力と放射線の教育活動の経験から
○中川和道（神戸大院）

懇親会（18:30〜 生協食堂）

9 月 30 日（金）［第 3 日目］管理棟 1 階 講堂
口頭発表 8（9:00〜10:00）
座長：楊金峰

3O01 超高速微粒子による衝突電離過程の研究
○柴田裕実 [1]，池田卓矢 [1]，平井隆之 [2]，大橋英雄 [3]，佐々木晶 [4]，小林正規 [5]，岩井岳夫 [6]（1：京大院工，2：総研大，3：東京海洋大，4：国立天文台，5：千葉工大，6：東大院工）
3O02 極端紫外自由電子レーザーによる極薄膜高分子中のスパー制御
○岡本一将 [1,2]，古澤孝弘 [2,3]，及川敬太 [1]，初井宇記 [2]，永園充 [2]，亀島敬 [2]，富樫格 [4]，登野健介 [4]，矢橋牧名 [2,4]，木村洋昭 [2,4]，仙波泰徳 [4]，大橋治彦 [2,4]，石川哲也 [2]，住吉孝 [1]（1：北大院工，2：理研，3：阪大産研，4：JASRI）
3O03 A Role of Sub-nm Holes in Molecular Rejection of Composite Membranes for Water Filtration Probed by Low-energy Positron Annihilation Techniques
○ Z. Chen，K. Ito，H. Yanagishita，N. Oshima，R. Suzuki，Y. Kobayashi（産総研）
3O04 Analysis of hierarchical structure of ETFE-based graft-type polymer electrolyte membranes by small angle X-ray scattering
○ Tap Tran Duy[1,2]，Shin-ichi Sawada[1]，Shin Hasegawa[1]，Yojiro Oba[3]，Masato Onuma[3]，Yosuke Katsumura[2]，Yasunari Maekawa[1]（1：原子力機構，2：東大院工，3：物質・材料研究機構）

（休憩 15 分）

特別講演（10:15〜10:55）
座長：吉田陽一
パルスラジオリシによる短寿命化学種の研究
住吉 孝（北大院工）
口頭発表 9（10:55〜11:40）
座長：岡本一将

3O05 イオン注入レジストにおける表面硬化層形成とその水素ラジカルによる除去性
○河野昭彦 [1]，新井祐 [1]，飯田貴之 [2]，信田拓哉 [2]，田川精一 [3]，堀邊英夫 [1,3]（1：金沢工大，2：日東分析センター，3：阪大産研）
3O06 イオンビームリソグラフィーによるポリスチレンの微細加工 〜立体規則性ならびにモルフォロジーの及ぼす影響〜
○大島明博 [1]，大久保聡 [2]，大山（五輪）智子 [2]，鷲尾方一 [2]，田川精一 [1,2,3]（1：阪大産研，2：早大理工研，3：JST CREST）
3O07 EUV レジスト用酸増殖剤のパルスラジオリシス
○榎本一之 [1,2]，有光晃二 [3]，吉澤篤太郎 [3]，山本洋揮 [1,2]，大島明博 [1]，古澤孝弘 [1,2]，田川精一 [1,2]（1：阪大産研，2：JST-CREST，3：東理大理工）

若手ポスター賞授賞式（11:40〜11:50）

閉会の挨拶（11:50〜12:00）

量子ビーム科学研究施設見学会（終了後）

編集委員会（12:00〜 管理棟 2 階中会議室）

ポスター発表 インキュベーション棟 1 階講義室 I-117

P01 パルスラジオリシス法を用いた活性酸素に応答する転写因子 (SoxR) の酸化還元挙動
○藤川麻由，小林一雄，古澤孝弘（阪大産研）
P02 ポリマーゲル線量計における無機塩の効果
○林慎一郎，藤原郁也，笛吹修治，富永孝宏（広国大）
P03 レーザーブレークダウンプラズマで生じる化学活性種と水ミスト界面での反応および分光計測
○黒澤知里，山瀬亮，高橋憲司（金沢大）
P04 ナノ秒ダブルパルスレーザー照射による液中でのサブマイクロ半導体微粒子の生成
○西田真麻，市瀬健太郎，折戸宏彰，高橋憲司（金

沢大）

P05 放射線グラフト重合法によるアニオン交換型ETFE 電解質膜の開発
○浅野雅春[1]，越川博[1]，八巻徹也[1]，前川康成[1]，山本和矢[2]，三瓶文寛[2]，朝澤浩一郎[2]，山口進[2]，田中裕久[2]（1：原子力機構，2：ダイハツ）

P06 水溶液中でのヒドロキシルラジカルとハライドアニオンの半結合
○山口真（原子力機構）

P07 イオン液体中の天然高分子の放射線改質に関する研究
○木村敦，長澤尚胤，田口光正（原子力機構）

P08 172 nm 真空紫外光照射によるアルデヒド類の分解プロセスに関する研究
○川瀬極[1]，宮野雅人[1]，宇都慶子[2]，辻正治[1,2]（1：九大院総理工，2：九大先導研）

P09 銀ナノプリズムのサイズ選択的室温合成と光学特性評価
○辻正治[1]，五味慧[2]，松永美香[1]，河済博文[2]（1：九大先導研，2：近大産業理工）

P10 マイクロ波誘電吸収法を用いた原子力プラントのケーブル経年変化研究
○砂川武義[1]，佐伯昭紀[2]，関修平[2]（1：福井工大，2：阪大院工）

P11 A Study on the Absorption Spectra of $Br^-$, $Br_2^-$, $Br_3^-$ in Aqueous Solutions at Elevated Temperatures
○ M. Lin[1], Y. Muroya[2], Y. Katsumura[2], P. Archirel[3], N. T. Van-Oanh[3], R. Nagaishi[1], Y. Kumagai[1], M. Mostafavi[3]（1：原子力機構，2：東大院工，3：Univ. Paris-Sud）

P12 放射線架橋による多糖類微小ゲルの創製
○長澤尚胤[1]，Bozena Rokita[2]，Piotr Ulanski[2]，廣木章博[1]，Janusz M. Rosiak[1]，田口光正[1]，玉田正男[1]（1：原子力機，2：ウッジ工科大）

P13 フェムト秒パルスラジオリシスによるイオン液体中の溶媒和電子・溶媒和前電子と捕捉剤の反応の研究
○近藤孝文[1]，楊金峰[1]，吉田陽一[1]，永石隆二[2]，田口光正[2]，高橋憲司[3]，加藤隆二[4]（1：阪大産研，2：原子力機構，3：金沢大，4：産総研）

P14 ベンジルエステルを酸発生剤とする化学増幅型レジストの開発
○佐藤達哉[1]，小泉均[2]（1：北大総化，2：北大院工）

P15 Ar プラズマを用いた FEP の表面改質 ～ラジカル生成とグラフト重合～
○坪倉英裕[1]，吉川妙子[1]，大山（五輪）智子[1]，大島明博[2]，田川精一[1,2]，鷲尾方一[1]（1：早大理工研，2：阪大産研）

P16 有機シリカ複合 PECVD 膜中のサブナノ空孔形成と陽電子消滅
○伊藤賢志，岡壽崇，小林慶規，鈴木良一，大平俊行（産総研）

P17 ヒドロキシプロピルセルロースを母材とするゲル線量計の開発 ～ γ 線照射での白濁化に対する検出剤組成の影響～
○山下真一，廣木章博，長澤尚胤，田口光正（原子力機構）

P18 早稲田大学におけるフォトカソード RF 電子銃を用いた大強度電子ビーム源の開発
○横山悠久[1]，浦川順治[2]，柏木茂[3]，川内洋平[1]，黒田隆之助[4]，坂上和之[1]，鈴木達也[1]，照沼信浩[2]，早野仁司[2]，山本隆之[1]，鷲尾方一[1]（1：早大理工研，2：高エネ研，3：東北大電子光，4：産総研）

P19 パルスラジオリシス法による塩素系電子線レジストの反応機構の研究
○保坂勇志[1]，別當良介[1]，小方宏一[1]，大山（五輪）智子[1]，坂上和之[1]，榎本一之[2]，大島明博[2]，鷲尾方一[1]，田川精一[1,2,3]（1：早大理工研，2：阪大産研，3：JST CREST）

P20 早稲田大学におけるナノ秒・ピコ秒分解能パルスラジオリシスシステムの現状と評価
○別當良介[1]，保坂勇志[1]，川内洋平[1]，小方宏一[1]，坂上和之[1]，鷲尾方一[1]，黒田隆之助[2]，柏木茂[3]，丑田公規[4]（1：早大理工研，2：産総研，3：東北大電子光，4：理研）

P21 電子線ナノインプリント法による架橋 PTFE 部材作製
○小林亜暢[1]，大島明博[2]，田川精一[1,2]，鷲尾方一[1]（1：早大理工研，2：阪大産研）

P22 モンテカルロ法による高温高圧水の放射線分解反応シミュレーション
○ 室 屋 裕 佐[1]，林 銘 章[2]，Sunuchakan Sanguanmith[3]，Jintana Meesungnoen[3]，Jean-Paul Jay-Gerin[3]，勝村庸介[1]（1：東大院工，2：原子力機構，3：Univ. of Sherbrooke）

P23 高分子材料の熱・放射線加速劣化試験における時間温度線量率重ね合わせ則の修正

工藤久明，○新井見幸（東大院工）

P24 等価速度分光法のための電子ビームの縦・横方向分布変調の研究
○菅晃一，楊金峰，小林仁，近藤孝文，法澤公寛，小方厚，吉田陽一（阪大産研）

P25 軟 X 線照射した DNA 薄膜の軟 X 線吸収スペクトル変化
○藤井健太郎，横谷明徳（原子力機構）

P26 B16 細胞のメラニン誘導 UVA バイスタンダー効果とその発現機構
西浦英樹[1,2]，菓子野元郎[3]，渡邉正己[4]，○熊谷純[5]（1:京大医，2:日本コルマー（株），3:大分大医，4:京大原子炉，5:名大院工）

P27 原子力施設環境におけるケーブル絶縁材料の劣化メカニズム
○島田明彦[1]，工藤久明[2]，瀬口忠男[3]，田村清俊[3]，杉本雅樹[1]，出崎亮[1]，吉川正人[1]（1：原子力機構高崎，2：東大院工，3：原子力機構東海）

P28 被照射ポリイミドの自由陽電子寿命による評価
○平出哲也[1,2]，岡壽崇[1]，森下憲雄[1]，出崎亮[1]，島田明彦[1]（1：原子力機構，2：茨城大院理工）

P29 マイクロ波誘電吸収法を用いた水溶液中における DNA の損傷評価の研究
○河田拓也[1]，砂川武義[1]，小嶋崇夫[2]，松尾陽一郎[3]，泉佳伸[3]（1：福井工大，2：阪府大，3：福井大）

P30 窒素・酸素の K 殻イオン化による DNA 変異と不対電子の関係
○岡壽崇，横谷明徳，藤井健太郎（原子力機構）

P31 極端紫外自由電子レーザーによる電子線レジストへのエネルギー付与
○及川敬太[1]，岡本一将[1,2]，古澤孝弘[2,3]，初井宇記[2]，永園充[2]，亀島敬[2]，富樫格[4]，登野健介[4]，矢橋牧名[2,4]，木村洋明[2,4]，仙波泰徳[4]，大橋治彦[2,4]，石川哲也[2]，藤吉亮子[1]，住吉孝[1]（1：北大院工，2：理研，3：阪大産研，4：JASRI）

P32 ヒドロキシプロピルセルロースゲル膜の機械的特性改善
○廣木章博[1]，佐藤利弘[2]，長澤尚胤[1]，田口光正[1]，玉田正男[1]（1：原子力機構，2：日本コンタクトレンズ）

P33 Study on Resist Performance of Polymer Bounded Photo-acid Generators (PAG) and blended PAG
○ Dang Nguyen Tuan[1,2], Hiroki Yamamoto[1,2], Seiichi Tagawa[1,2]（1：阪大産研，2：JST CREST）

P34 Solvated Electron Reaction with Some Polymer Bound Acid Generators or Blended Acid Generators
○ Ravi Joshi[1,2]，Hiroki Yamamoto[1,2]，Kazuyuki Enomoto[1,2]，Seiichi Tagawa[1,2]（1：阪大産研，2：JST CREST）

P35 EUV リソグラフィ用化学増幅型レジストの現像過程の解明
○山本洋揮[1,2]，田川精一[1,2]（1：阪大産研，2：JST CREST）

P36 Synthesis of Amine-type Adsorbents with Emulsion Graft Polymerization of 4-hydroxybutyl Acrylate Glycidylether
○ Hongjuan Ma，Hiroyuki Hoshina，Noriaki Seko（原子力機構）

P37 ベンゼン環の開裂におけるフッ素置換効果 ～内殻励起による結合切断～
○吉田啓晃[1,2]，関口雷太[1]，平谷篤也[1,2]（1：広大院理，2：広大放射光）

P38 アクリロニトリルを用いた放射線エマルジョングラフト重合の検討
○佐伯誠一[1]，Tita Puspitasari[2]，瀬古典明[1]（1：原子力機構，2：インドネシア原子力庁）

(大阪大学　吉田 陽一)

# 平成 22 年度日本放射線化学会各賞の選考結果

平成 22 年度日本放射線化学会奨励賞は「アンジュレータ放射光による真空紫外～軟 X 線領域における自然二色性研究」の研究に対して産業技術総合研究所 田中真人氏に授与されることになった．以下に授賞理由を記す．

田中真人氏の業績は，一貫して放射光を用いた固相アミノ酸の光誘起反応に関するものである．波長領域は真空紫外光-軟 X 線の領域であり，放射線化学初期過程の観点から最重要の領域である．同氏は生命の根源であるアミノ酸の円偏光二色性に注目した．

キラルな分子の右円偏光に対する光吸収断面積は，左円偏光に対するそれとはわずかばかり異なる．このような光吸収断面積における差を円偏光二色性とよぶ．アミノ酸分子の円偏光二色性を光吸収断面積の大きな上記の波長領域で測定することは，宇宙における物質進化を解明するために必要不可欠である．ところが断面積の差は，わずかに 1/100 以下であるために，それを高精度で測定することは極めて困難である．田中氏は可変偏光アンジュレーターの利用により，それを可能にした．もちろんその業績は光源加速器の進歩に負うところが大きいかもしれないが，同氏の貢献もそれに勝るとも劣らないと思われる．まさに光源の進歩と同氏による測定システムの進歩が車の両輪のごとくかみ合って生まれた成果である．同氏はこのような成果を放射線化学討論会において次々と発表しており，本学会の活性化に対する寄与も大きい．入会時期は，1998 年であり受賞資格である “おおむね 5 年以上本会会員として活動し” を満足している．奨励賞としてふさわしいと評価できる．

(平成 22 年度日本放射線化学会各賞選考委員会委員長
河内 宣之)

# 本　会　記　事

## 第 94 回 日本放射線化学会 理事会議事録（案）

**日時**　平成 23 年 4 月 6 日（水）–
（3 月 11 日の震災の影響で電子メール会議で開催）

**出席者**　電子メールは会長・副会長・常任理事・理事に配信された.

**議題**

1. 前回（第 93 回理事会）議事録（案）確認（事務局）
承認された.

2. 平成 22 年度役員名簿（平成 23 年 3 月 1 日現在）確認（事務局）
4 月から理研の丑田先生が北里大学に移られるということで，理研には現在，放射線化学会の会員がいないので，候補者を探していること，また，北里大学に移られる丑田先生にはこのまま，役員として残って頂くべきである, との報告があった.

3. 平成 22 年度賛助会員名簿（事務局）
9 月にコーガアイソトープが退会，および住友スリーエムが 3 年間会費を滞納していること, が報告された.

4. 平成 22 年度予算執行状況（事務局）
予備費から新しい学会 WEB の立ち上げのための支出があったことが報告された．従来の WEB サーバーがあと 1 年ほどで使用できなくなるということから，新しい WEB の立ち上げを準備していたが，震災の影響で，理事会開催前に立ち上げとなった.

サーバー（ロリポップ）
契約期間：12 ヶ月（2011/02/24–2012/02/23）
請求額：4,725 円
（サーバー使用料：次年度以降 3,150 円）
ドメイン（ムームードメイン）
契約期間：12 ヶ月（2011/02/17–2012/02/17）
請求額：950 円
ドメイン：「radiation-chemistry.org」とした.

契約サーバー上で 5 つのメーリングリストを作成できるので，現在，会員向け，理事会，編集委員会で 3 つを使用中である．また，学会ドメインのメールアドレスを作成することも可能．（メールアドレスを使用したいときには事務局まで）

5. 入退会一覧（事務局）
入会者 2 名に対し，退会者が 7 名に上ることが報告された．現在の会員数 259 名．他に年度末退会予定者希望者が 4 名.

6. 放射線化学若手の会「夏の学校」報告（事務局）
昨年の討論会の終了後に行われた若手の会についての報告書が紹介された．収入の合計が 409,000 円，支出が 360,622 円となっており，黒字のように見えるが，貯金から 50,000 円予算に入っており，実質，貯金を取り崩して運営されていることが報告された.

7. 平成 23 年放射線化学討論会準備状況
討論会はいわきのホテルハワイアンズで開催予定であったが，東日本大震災の影響で，現在，ハワイアンズは営業を停止していること，福島県ということで，営業再開後も大変ではないかと予想されるので，来年，あるいは再来年に討論会を開催したいという報告が平出からあった.
中川会長から，次年度の開催予定も東北大学であり，繰り上げての開催も困難であることから，代替の開催地として関西方面を考えたところ, 阪大産研の吉田陽一先生が検討してもよいという返事を頂き, 阪大産研への開催地の変更の提案があり，了承された．開催期日は 9 月 28 日–30 日.

8. 平成 24 年放射線化学討論会準備状況

# 本 会 記 事

昨年 10 月に東北大学の越水先生から，24 年度の開催について浅井先生のご承諾を頂けたと言うご連絡を頂いていることが報告された．開催は来年のため，現状では東北大学にお願いするということで良いが，東北大学の被災状況などを考慮しながら柔軟に対応していくことが必要になると考えられることなどが報告された．また，平成 23 年度から越水先生か浅井先生を理事にご就任頂いた方がよろしいのではないかという意見が出された．

9. 学会賞選考委員会報告
審査の結果が報告され，奨励賞 1 件の授賞が決定した．

10. その他
柴田理事より企画委員会の活動報告があった．また，勝村理事より 2012 年に中国が開催を担当する第 4 回アジア環太平洋放射線化学シンポジウムの計画について報告があった．

# 本 会 記 事

## 平成 22 年度役員名簿（平成 23 年 8 月 1 日現在）

| | | |
|---|---|---|
| 会長 | 中川 和道 （神大院人間発達環境） | |
| 副会長 | 河内 宣之 （東工大院理工）<br>平出 哲也 （原子力機構・東海） | 鷲尾 方一 （早大理工研）<br>小林 慶規 （産総研） |
| 常任理事 | 丑田 公規 （北里大）<br>小嶋 拓治 （原子力機構・高崎）<br>錦見 敏朗 （NHV コーポレーション）<br>柴田 裕実 （京大院工）<br>住吉 孝 （北大院工） | 辻 正治 （九大先導研）<br>永石 隆二 （原子力機構・東海）<br>真嶋 哲朗 （阪大産研）<br>吉田 陽一 （阪大産研）<br>勝村 庸介 （東大院工） |
| 理事 | 青木 康 （住友重機械）<br>長島 章 （放振協）<br>小嶋 崇夫 （大阪府大院工）<br>依頼中 （原子力機構・関西）<br>工藤 久明 （東大院工）<br>熊谷 純 （名大院工）<br>伊藤 賢志 （産総研）<br>関 修平 （阪大院工）<br>鈴木 信三 （京産大理）<br>堀邊 英夫 （金沢工大） | 砂川 武義 （福井工大）<br>高橋 憲司 （金沢大工）<br>竹中 康之 （北教大）<br>中川 清子 （都立産技研）<br>中村 一隆 （東工大セラミック研）<br>駒口 健治 （広大院工）<br>藤原 邦夫 （イーシーイー）<br>依頼中 （京都工芸繊維大学）<br>泉 佳伸 （福井大）<br>山路 稔 （群馬大院工） |
| 監事 | 南波 秀樹 （原子力機構・東海） | 平岡 賢三 （山梨大工） |
| 事務局 | 茨城地区 （原子力機構・東海） | |
| 顧問 | 佐藤 伸<br>田川 精一 （阪大産研）<br>田畑 米穂 （原子力システム研究懇話会） | 旗野 嘉彦<br>濱 義昌 （早大理工研）<br>市川 恒樹 （北大院工） |
| 名誉会員 | 今村 昌<br>団野 皓文 | 近藤 正春 |
| 編集委員会 | 委員長：小林 慶規（産総研）<br>主任：工藤 久明 （東大院工）<br>中川 清子（都立産技研）<br>廣木 章博 （原子力機構・高崎）<br>近藤 孝文 （阪大産研） | 泉 佳伸 （福井大）<br>熊谷 純 （名大院工）<br>越水正典 （東北大院工）<br>松本 裕之 （岩崎電気）<br>藤井 健太郎 （原子力機構・東海） |
| 企画委員会 | 委員長：柴田 裕実 （京大院工）<br>小泉 均 （北大院工）<br>駒口 健治 （広大院工）<br>砂川 武義 （福井工大）<br>辻 正治 （九大先導研）<br>楊 金峰 （阪大産研） | 青木 康 （住友重機械）<br>越水 正典 （東北大院工）<br>佐藤 哲也 （山梨大）<br>田口 光正 （原子力機構・高崎）<br>室屋 裕佐 （東大院工） |
| 推薦委員会 | 田川 精一 （阪大産研）<br>立矢 正典 （産総研）<br>南波 秀樹 （原子力機構・東海） | 濱 義昌 （早大理工研）<br>平岡 賢三 （山梨大工） |

# 本 会 記 事

## 平成 22 年度会計中間報告（平成 23 年 2 月 28 日現在）

収入の部　　（単位：円）

| 項目 | 22 年度予算案 | 22 年度中間 | 内容等 |
|---|---|---|---|
| 賛助会員（17 社 71 口） | 700,000 | 680,000 | 10,000×68 口　未納　1 社 3 口 ×3 年 |
| 個人正会員　(230 名) | 971,000 | 704,000 | 4,000 × 159 名 = 636,000<br>過年度分（68,000）　未納 71 名 |
| 学生会員　（34 名) | | 13,500 | 1,500 × 8 名 = 12,000<br>過去年度分（1,500）未納 26 名 |
| 要旨集 CD 販売 | 0 | | |
| 雑収入（利息等） | 100,000 | 272<br>22,656 | 国際文献分（175），早稲田大学分（97）<br>著作権料 |
| 戻入金 | 0 | | |
| 補助金 | | 48,875 | 早大より国際文献への補助（20,000），理事会経費補助（28,875） |
| 積立基金からの繰り込み | 0 | 0 | |
| 前年度繰越金 | 2,544,539 | 2,544,539 | |
| 合計 | 4,315,539 | 4,013,842 | |

支出の部

| 項目 | 22 年度予算案 | 22 年度中間 | 内容等 |
|---|---|---|---|
| 通信連絡費 | 50,000 | 9,294 | 電報，送料等 |
| 振込手数料 | | 3,045 | 事務局移動, 編集,HP, 原稿料等 |
| 事務委託費<br>　年間業務費 | 700,000 | 542,572 | 7–8 月 (87,332)，9–12 月 (455,240)，1–6 月 (131,692)<br>振込手数料（210） |
| 会誌<br>　原稿料 | 300,000 | <br>21,000 | <br>振込手数料（1,050） |
| 会議費 | 100,000 | 28,875 | 理事会弁当代＋お茶代 |
| 放射線化学討論会援助 | 200,000 | | |
| 先端放射線化学シンポジウム援助 | 100,000 | | |
| 若手の会夏の学校援助 | 150,000 | | |
| 学会賞 | 100,000 | 93,324 | 振込手数料（420） |
| 企画委員会経費 | 75,000 | | |
| 将来構想委員会経費 | 75,000 | | |
| 編集委員会経費 | 200,000 | 150,000 | 振込手数料（420） |
| 日本放射線研究連合負担金 | 50,000 | | |
| ホームページ運営費 | 60,000 | | |
| 予備費 | 200,000 | 5,675 | WEB サーバー + ドメイン年間使用料　振込手数料（420） |
| 小計 | 2,360,000 | 853,785 | |
| 繰越金 | 1,955,539 | 3,160,057 | |
| 合計 | 4,315,539 | 4,013,842 | |

# 本 会 記 事

## 平成 22 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 |
|---|---|---|---|---|
| 学生会員 | 662 | 及川　敬太 | 北海道大学大学院工学研究員<br>量子理工学部門量子放射線科学研究室 | 住吉　孝 |
| 正会員 | 663 | 堀邊　英夫 | 金沢工業大学バイオ・化学部 応用化学科 | 新坂恭士 |

退会

| 会員種別 | 会員番号 | 会員名 | 所属機関名 | 退会日 |
|---|---|---|---|---|
| 正会員 | 65 | 大森　巍 | | 2011/2/14 |
| 正会員 | 103 | 川上　和市郎 | | 2010/9/9 |
| 正会員 | 118 | 熊倉　光孝 | 福井大学工学部物理工学科 | 2010/9/21 |
| 正会員 | 268 | 中西　博 | （株）ニデック | 2010/11/5 |
| 正会員 | 387 | 森下　憲雄 | 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 | 2010/10/4 |
| 正会員 | 479 | 長谷　陽子 | 大阪大学大学院基礎工学研究科 | 2010/9/2 |
| 賛助会員 | 606 | 株式会社<br>コーガアイソトープ | | 2010/9/14 |
| 学生会員 | 636 | 岩岡　和輝 | 放射線医学総合研究所　規制科学総合研究グループ | 2010/9/21 |

## 平成 22 年度 日本放射線化学会賛助会員

| | |
|---|---|
| （株）アイ・エレクトロンビーム | （株）NHV コーポレーション<br>http://www.nhv.jp |
| （株）イー・シーイー | （株）環境浄化研究所 |
| （独）日本原子力研究開発機構<br>http://www.jaea.go.jp | 四国電力（株） |
| ビームオペレーション（株） | 住友電気工業（株）<br>http://www.sei.co.jp |
| （財）放射線利用振興協会 | ラジエ工業（株）<br>http://www.radia-ind.co.jp |
| マイクロ電子（株） | レーベン館 株式会社 |
| DIC グラフィックス 株式会社 | 日立電線株式会社 |

放射線化学　第 92 号

平成 23 年 9 月 30 日　発　行
発 行 所　日 本 放 射 線 化 学 会
<hirade.tetsuya@jaea.go.jp>
〒319–1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2–4
平出哲也（日本原子力研究開発機構・東海）
TEL: 029–282–6552,　FAX: 029–282–6716

編集委員長　小 林　慶 規
編 集 委 員　工 藤　久 明
中 川　清 子　廣 木　章 博
熊　谷　　純　近 藤　孝 文
越 水　正 典　泉　　佳 伸
松 本　裕 之　藤 井 健太郎

郵便振替口座　長野 00540–9–34599
日本放射線化学会

発 行 人　中 川　和 道