令和元年 10 月発行

ISSN 2188-0115

放射線化学

RADIATION CHEMISTRY

2019 NO. 108

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

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

〈巻頭言〉
35 年前に入会した会員のつぶやき
〈展望・解説〉
放射線計測の最前線
〈とぴっくす〉
飛跡構造計算に基づく無機シンチレータ発光強度の予測
スーパーカミオカンデの紹介と施設への放射性ラドンガスの影響について
〈海外レポート〉
14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry 参加報告
Miller Conference 2019 参加報告
16th International Congress of Radiation Research（ICRR2019）参加報告
〈ニュース〉
第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会 参加報告
2019 年放射線化学若手の会「夏の学校」報告
The 19th International Conference on Solid State Dosimetry（SSD19）参加報告
第 62 回放射線化学討論会参加報告（1 日目）
第 62 回放射線化学討論会参加報告（2 日目）
第 62 回放射線化学討論会参加報告（3 日目）
〈お知らせ〉
第 62 回放射線化学討論会プログラム
〈本会記事〉
〈賛助会員名簿〉

Japanese Society of RADIATION CHEMISTRY

HOKAER(108)1–47(2019)

放射線化学

2019 No.108

〈巻頭言〉

35 年前に入会した会員のつぶやき ・・・

〈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)
(108)1–47(2019)

Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry
"Radiation Chemistry"
No.108, October 2019

Preface

Tweet from a member who joined JSRC 35 years ago · Tetsuya Hirade · · · 1

Reviews

Recent topics in radiation detectors and measurement · Kenichi Watanabe · · · 3

Topics

Prediction of scintillation light yield based on track-structure simulation

· Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato and Tetsuya Yamaki · · · 11

Introduction of Super-Kamiokande and affection of radon in experimental area

· Yuuki Nakano · · · 19

Overseas

Report of the 14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry (Tihany2019)

· Tamon Kusumoto · · · 27

Report of the Miller Conference 2019 · Yuta Kumagai · · · 28

Report of the 16th International Congress of Radiation Research (ICRR2019)

· Takuya Maeyama · · · 29

News

Report of the 56th Annual Meeting on Radioisotopes and Radiation Researches

· Hiroki Yamamoto · · · 31

Report of the Radiation Chemistry Summer School at 2019 · Hiroto Kawai · · · 32

Report of the 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19)

· Shin-ichiro Hayashi · · · 33

Report of the Annual Meeting of Radiation Chemistry (1st day) · · · · · · · · · · · · · · · · · Yusuke Kondoh · · · 34

Report of the Annual Meeting of Radiation Chemistry (2nd day) · · · · · · · · · · · · · · · · Ichiro Kawamura · · · 35

Report of the Annual Meeting of Radiation Chemistry (3rd day) · · · · · · · · · · · · · · · Hiroki Kawamoto · · · 36

Information

Program of the 62nd Radiation Chemistry Symposium · Yoshinobu Izumi · · · 37

Announcements

List of Support Members

巻　頭　言

35 年前に入会した会員のつぶやき

日本原子力研究開発機構
平出 哲也

「日本の放射線化学の研究も，いつの間にか，10 年をこえる年月を歩んだ.」と会誌第 2 号（昭和 41 年 10 月発刊）では篠原健一先生が「放射線化学の 10 年をかえりみて」という題の巻頭言で書かれておれらます．日本放射線化学会は，昭和 40 年に誕生してから，すでに 50 年以上が経過しました．そして，日本の放射線化学の研究は 60 年以上を経過したことになるわけです．その始まりは私の生まれる前のこととなります．それほど伝統のある学会であると言えます．放射線化学討論会に関して言えば，会誌第 2 号に第 9 回放射線化学討論会のプログラムが載っています．私が生まれた年には第 5 回の放射線化学討論会が開催されていたということになります．私自身は陽電子科学研究が中心であり，その中で陽電子を利用した放射線化学研究を行っています．会誌第 2 号の第 9 回放射線化学討論会プログラムによると「ポジトロニウム寿命測定による活性種の研究」という発表が東大によって行われております．放射線化学研究の中での陽電子利用研究を継続，発展させて行かなくてはいけないと感じます．過去の会誌が WEB で公開されており，閲覧することができます．私は現在，会長だけでなく編集委員長も兼任しており，皆様にもぜひ，過去の会誌を見て頂ければと思います．是非とも，過去の会誌を若い方々にもご活用頂きたいと思います．

会誌第 2 号では篠原健一先生は，さらに，「放射線化学の初めに研究のきっかけを作る大きな貢献をされた，倉敷レイヨンの常務取締役であられた，友成九十九氏を忘れることはできない.」と書かれておられます．「友成氏は，我々に，ポリビニルアルコールその他の高分子の放射線照射の研究を託してくると同時に，極めて精力的に，放射線高分子学の研究の気運を推進するために，各方面に働きかけられた.」と書かれています．その後，昭和 31 年に理研でコバルト 60 によるガンマ線照射ができるようになり，その後，瞬く間に多くの施設が作られ，その間の放射線化学研究の進展は目覚ましいと篠原先生は書かれておられます．また，学会発足 9 か月で会員数が 230 名を超していると記されており，発足当時の放射線化学会の状況が垣間見られます．このような時代に戻ることは困難かもしれませんが，学会をより良い方向に向かうためのヒントがあるのではないかと思います．私は，それは人だと思います．かつて，友成氏が行われたことを今誰かが行うのは難しいかもしれませんが，我々ひとりひとりがもっと人と繋がることを意識して少しだけ積極的に行動することが大事だと思います．そして，かつてのように，連携によって，新しい時代のきっかけを皆さんで作って行けたらと思います．「具体的に何をすればいいのか？」と考える前に，いつもこだわりを持って行動することで，何かが変わり始めます．私はそう信じています．年代を超えた繋がりも大事です．少なくとも，私が学会に加入した 35 年前には，若者がいろいろなところで声をあげていました．これからの放射線化学を作って行く，学生も含めた若い方々にも，何か行動して頂きたいと思います．そして誰よりも，本学会を現在支えておられる先生方にも，こだわりを持った行動を期待します．皆様のご協力によって，学会はより良い場所になっていくと信じております．皆様，すこしだけこだわりを持って行動しましょう．

Tweet from a member who joined JSRC 35 years ago
Tetsuya Hirade (*Japan Atomic Energy Agency*),
〒319–1195 茨城県那珂郡東海村白方 2–4
TEL: 029–282–6552, E-mail: t.hirade@kurenai.waseda.jp

展　望・解　説

放射線計測の最前線

名古屋大学　渡辺 賢一*

Recent developments in radiation detectors and instruments are briefly reviewed concerning gas detectors, scintillation and semiconductor detectors. Some topics are focused on novel detectors having been developed by Japanese research groups.

Keywords: radiation measurements, gas detector, compound semiconductor detector, scintillator

1　緒言

本報では，放射線計測分野の最近のトピックについて紹介する．放射線計測で用いられる放射線検出器は，電離放射線と物質の相互作用の結果生じる電離過程あるいは励起過程を電気信号に変換する装置である．多くの放射線計測のテキストでは，放射線検出器は，「ガス検出器」,「シンチレーション検出器」,「半導体検出器」に大別し説明がなされているが，本報もそれにならい，おのおのの検出器の最近のトピックス，特に日本の研究グループが牽引している検出器開発に関するトピックスについて概説する．

2　ガス検出器

ガス検出器は，その名の通り検出器媒体として気体を用いた放射線検出器で，電離放射線が気体と相互作用した結果生じる電子–イオン対を，高電圧を印可して収集することで電気信号に変換するものである．電離箱，比例計数管，ガイガーミュラー計数管などが知られており，近年は微細加工技術を活用した複雑な構造を有する検出器開発が進められている．ガス検出器の最も大きな特徴は，他の検出器媒体と比して，高い放射線耐性を有するという点で，放射線強度の高い場への適用を考えた際に利点を持つ．さらにガスであるため，検出器媒体を容易に循環・入れ替えることも可能である．放射線検出器には，生成された電子–イオン対等の動きを信号パルスとして捉え，パルスの数を計数するパルスモード計測と，これらの動きで生じる電流値の時間平均値を読み取る電流モード計測を行うものがある．パルスモード計測では，個々のパルスから個々の放射線量子のエネルギー等の情報を得ることも可能であるという利点がある．しかしながら，放射線強度の高い場では，個々の信号パルスを別々に計数することは困難になるため，電流モード計測が行われることが多い．特に，ガス検出器で信号形成に用いられている電子–イオン対は，一般的に他の様式の検出器の情報キャリアと比べ移動速度が小さく収集に時間がかかるため，信号パルスの時間幅が大きくなりがちであるため，パルスモード駆動のガス検出器は高い放射線強度の場での計測には向かないことが多い．上述の微細加工技術を用いた検出器では，サイズを小さくすることが可能で，結果として，信号電荷を収集する時間を短くすることができる．このように，最近のガス検出器開発のトレンドは，微細加工技術を活用したものにフォーカスされてきている．

微細加工技術を活用したガス検出器をマイクロパターンガス検出器といい，Micro Pixel Chamber（μ-PIC）[1] や Gas Electron Multiplier（GEM）[2] といったものが代表的なものである．

ここでは，GEM について少し詳しく紹介する．Fig. 1 に GEM の構造を示す．GEM は，無数の小さな孔の開いた厚さ数 10 μm–数 100 μm 程度の絶縁体の両面を薄い電極で被覆した構造を有しており，その両面の電極間に高電圧が印加されている．GEM はガスチェンバー内に設置され，電子増倍機構として用いられる．GEM の孔の中には高い電界が生じており，放射線により生成した電子が孔の中で加速され，ガス分子と衝突を繰り返し，雪崩的に電離を引き起こすいわゆる電子雪崩が起こり，電子が増幅される．信号のほぼすべての成分が，この限られた微小な空間で起こる

Recent topics in radiation detectors and measurement
Kenichi Watanabe* (*Nagoya University*),
〒464–8603 愛知県名古屋市千種区不老町
TEL: 052–789–4513, FAX: 052–789–3843,
E-mail: k-watanabe@energy.nagoya-u.ac.jp

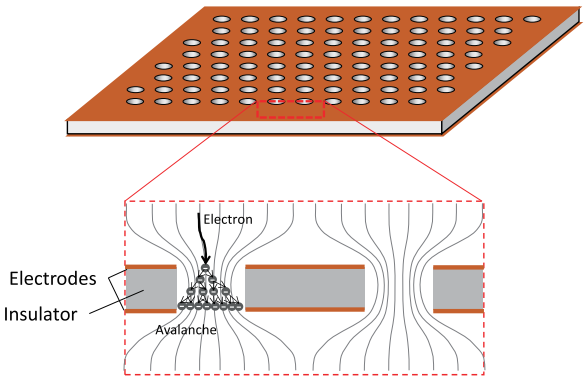


Figure 1.　Basic structure of GEM.

電子雪崩により誘起されるため，得られるパルス信号のパルス幅は比較的短くすることができる．GEM 検出器は，CERN のグループにより開発が進められ，主として高エネルギー物理の分野で用いられている[2]．また，^{10}B のような中性子を荷電粒子に変換するコンバータを用いて，中性子イメージング検出器として用いるアプリケーションもある[3]．

一般的な GEM 検出器の絶縁体にはカプトン箔が用いられている．GEM 検出器は構造上，高い電界が生じる箇所があるため，偶発的に生じる放電を避けることはなかなか困難である．絶縁体にカプトン箔を用いた場合，放電により絶縁体が損傷し，絶縁が破れると電極間が導通してしまうため，検出器としては使用不能になってしまう．こういった従来の GEM の欠点を補うものとして，近年，東大・産総研のグループにより glass GEM の開発が進められている[4-6]．これは，その名の通り絶縁体にガラスが用いられており，仮に放電が起こったとしても絶縁が破れるほどの損傷が生じる可能性はほどんどなく，比較的放射線強度の高い場の測定も可能となっている．もちろん，放射線強度が高くなると，いくら応答が比較的速い GEM とはいえ，パルスモード計測は困難となる．しかしながら，電子増倍用に充填しているガスを選択することで，電子雪崩発生時にガスが発光を示すことが知られており，この発光を光検出器で検出するという動作モードでも利用可能である．このことを利用すると，放射線強度の高い場では，光学カメラ等を利用することで積分モードの計測を比較的容易に実現することができる．発光計測モード動作の glass GEM の適用例としては，低エネルギー X 線イメージング，中性子イメージング，重粒子線治療で用いられる高エネルギー炭素イオンビームのイメージング等がある[7]．発光計測モード動作の glass GEM は，特に，高エネルギー炭素イオンビームのイメージングでは，他の検出器と比していくつかの利点を有する．ひとつは高い耐放射線性で，治療レベルのビームを当てても，検出器の劣化はほとんどみられない．また，高エネルギー炭素イオンビームは高い線エネルギー付与（Linear Energy Transfer: LET）を有しており，シンチレータのような放射線のエネルギーで物質を直接励起子発光している媒体では，励起密度が高いことに起因して，消光現象と呼ばれる現象が起こり，発光量は物質内に付与したエネルギーを必ずしも示さなくなる．しかしながら，発光計測モード動作の glass GEM では，炭素イオンビームが直接ガスの発光を引き起こしているわけではなく，あくまでガスの電離によってそのエネルギーが消費されているため，固体のシンチレータでみられるような消光現象はみられない．このことは，治療場における線量評価というアプリケーションでは，他の検出器に比べ大きなアドバンテージになると期待される．

3　シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は，放射線により引き起こされる電離作用と競合して起こる励起作用を用いており，これらが脱励起する際に発するシンチレーション光を光検出器によって検出するものである．電離作用によって生じる電荷を直接収集するタイプの検出器であるガス検出器・半導体検出器との対比で，間接変換型検出器のひとつに分類される．最も代表的なシンチレーション検出器は，NaI(Tl) シンチレータを用いたものであるが，近年，$LaBr_3$(Ce) シンチレータのように高い発光量を示すシンチレータもみいだされ，^{137}Cs の 662 keV の γ 線に対して 3 % という高いエネルギー分解能を示すものも出てきている[8]．さらに SrI(Eu)[9]，GAGG($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$:Ce)[10] などの高い発光量のシンチレータがいくつか出てきている．

これらは主としてガンマ線スペクトロスコピー用に開発されたものであるが，一方で，中性子の検出を目的とした新しいタイプのシンチレータの開発も進められている．ここでは，筆者らも加わっている国内のグループにより開発された中性子シンチレータについて紹介する．Gektin らによってみいだされた Ce:$LiCaAlF_6$[11] は，当初，紫外線発光レーザーの素子として開発が進められたが，その後，東北大・トクヤマ社のグループにより，これと添加剤を Ce から Eu に替えた Eu:$LiCaAlF_6$ が中性子用シンチレータとして精力的に開発が進められた[12]．これらのシンチレータ

に含まれる ^{6}Li は熱中性子と 940 barns という高い反応断面積で ^{6}Li(n,t)α 反応を起こす．この反応を介し中性子は高エネルギーのトリトン粒子，α 粒子に変換され，これらがシンチレータを励起しシンチレーション発光を誘起する．^{6}Li の天然同位体比が 7.5 % と決して高くないため，これを同位体濃縮し中性子に対する感度を上げたものもある．中性子シンチレータに求められる仕様としては，他のシンチレータ同様，高い発光量，短い発光減衰時定数の他に，γ 線–中性子イベント間の高い弁別性が挙げられる．中性子に対する検出感度を高めるために，シンチレータの体積を大きくすると γ 線にも感度を持つようになってしまう．また，中性子の存在するほとんどの場で γ 線が混在して，両者を弁別して検出できる能力が求められる．上述の ^{6}Li(n,t)α 反応の Q 値は 4.8 MeV と比較的高いため，理屈の上では，これより低いエネルギーを有するガンマ線とは，1 イベントにおけるシンチレーション発光量，つまり信号波高値により両者を弁別することが可能である．しかし，多くのシンチレータと同様，このシンチレータは ^{6}Li(n,t) α 反応で生成されるトリトン粒子，α 粒子といった高 LET 粒子に対しては消光現象が起こり，同じエネルギーの電子より発光量が低下する．そのため，物質との相互作用により高速電子を生成する γ 線イベントとの弁別がより困難となる．消光現象は，Eu:LiCaAlF$_6$ のほうが Ce:LiCaAlF$_6$ より顕著であるので，大きなバルクの結晶を用いた中性子検出器で波高弁別のみで中性子–γ 線弁別を行う際には，Ce:LiCaAlF$_6$ のほうが弁別性能は高い．加えて，Ce:LiCaAlF$_6$ では，エネルギーの高い γ 線イベントでは，中性子イベントと比べ非常に高速なチェレンコフ発光が観測される．これに加え，シンチレーション発光過程の立ち上がり時間が比較的遅いため，チェレンコフ発光に起因する高速発光成分を認識しやすく，波形弁別法を活用することで中性子–γ 線の弁別能を改善することができる[13)14)]．

一方，Eu:LiCaAlF$_6$ は非常に高い発光量を示すのが特徴である[15,16)]．上述のように，消光現象は，Ce:LiCaAlF$_6$ と比べ顕著ではあるが，この高い発光量を利用することで，さまざまな応用が可能である．その一つの例が，Eu:LiCaAlF$_6$ シンチレータを小片状にし，光ファイバ先端に配した光ファイバ型中性子検出器である[17)]．シンチレータのサイズを光ファイバのコア径より小さくすることで，シンチレータから光ファイバコアへの集光効率を比較的高くすることができる．これに加え，Li ベースの中性子シンチレータのサイズを小さくすることには，γ 線イベントの抑制効果が改善できるという利点もある．Fig. 2 に γ 線イベントの抑制効果の概念図を示す．

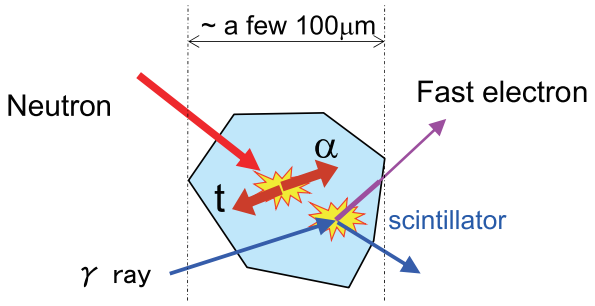


Figure 2. Suppression of γ ray events in a small piece of Eu:LiCaAlF$_6$ scintillator.

^{6}Li(n,t) α 反応で生成されるトリトン粒子，α 粒子の Eu:LiCaAlF$_6$ 内での飛程は数 10 μm 程度であり，シンチレータサイズがこれより大きければ，これら荷電粒子の持つエネルギーは，ほぼすべてシンチレータ内に付与され，シンチレーション光に変換される．一方，γ 線は非荷電粒子であるためシンチレータを直接励起することはできない．物質との相互作用により高エネルギー電子が生成され，この高エネルギー電子がシンチレータを励起，シンチレーション発光を誘起する．波高弁別のみの場合，1 MeV 程度の γ 線イベントが中性子イベントとほぼ同等の波高値の信号を生成するため，数 100 keV 以上の γ 線イベントが中性子イベントに干渉する可能性がある．中性子イベントに干渉の可能性のある 1 MeV 程度の γ 線から生成される可能性のある 1 MeV の高エネルギー電子の Eu:LiCaAlF$_6$ 内での飛程は 1 mm 程度であり，シンチレータのサイズをこれより小さくすると，高エネルギー電子はすべてのエネルギーを付与する前にシンチレータ外に出ていく．結果として，シンチレータ内に付与されるエネルギーは 1 MeV よりは小さくなり，生じるシンチレーション発光量も中性子イベントのものより小さくなるため，発光量，つまり信号波高により中性子と γ 線のイベントを弁別することが可能となる．Figure 3 に比較的大サイズの Eu:LiCaAlF$_6$ シンチレータと小片シンチレータで得られた信号波高分布の結果を示す．

γ 線としては，^{60}Co 線源から放出されるエネルギー 1.17 MeV，1.33 MeV の γ 線を照射した際の結果である．中性子線は ^{252}Cf 線源から放出されたものをポリエチレン減速材で熱中性子化したものを照射している．中性子照射をした際には，どちらのシンチレータもピークを示している．このピークは ^{6}Li(n,t)α 反応で

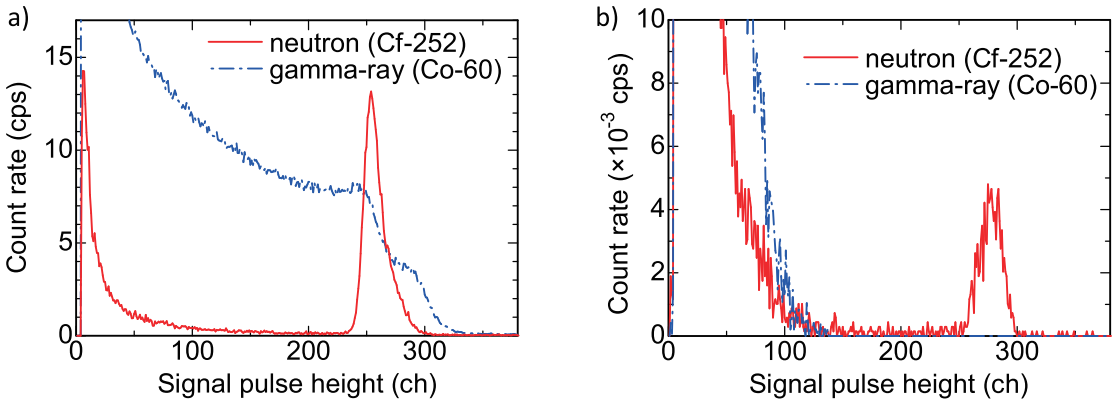


Figure 3.　Signal pulse height spectrum obtained from a) bulk and b) small piece scintillators.

放出されたトリトン粒子，α 粒子の持つ合計 4.8 MeV のエネルギーすべてがシンチレータ内に付与されたイベントに相当する．こういったピーク構造は，シンチレータ内のどの場所で反応が起こっても一様に光を収集できる透明なシンチレータでのみ出現するものである．一方，γ 線を照射した際の波高分布をみると，大きなサイズのシンチレータでは，1.17 MeV，1.33 MeV の γ 線のコンプトン端に相当する肩構造がみられ，これらが中性子ピークに干渉することがわかる．小片シンチレータの場合は，これらの構造は確認できず，イベントの多くは低波高信号を示しており，中性子ピークとの干渉はない．このようにシンチレータサイズをコントロールすることで，γ 線起因の信号波高を抑制し，γ 線イベントとの弁別が可能となる．このような小片シンチレータを光ファイバ先端に配した光ファイバ型中性子検出器は，非常に高強度の中性子場のモニタリングに適しており，中性子を用いたがん治療法のひとつであるホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy: BNCT）用の中性子モニタ等への利用が検討されている[17]．

小片状 Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータは，高い γ 線抑制能力を有する一方で，当然のことながら，その感度が非常に低いため，適用範囲が限られてしまう．この欠点を解決する方法としては，小片のシンチレータを多数配置して計測するということが考えられるが，多数の小片シンチレータから一様な集光効率で光を集めることを非常に困難である．集光を困難にしている一つの要因は，シンチレータ領域から空気層へ出る際の屈折である．これにより光が界面を通過する度に光が曲げられてしまう．特に多数の小片シンチレータを配置し，そこから光を集める場合，光がシンチレータ領域から光検出器まで到達するまでに無数の界面を通過していく必要があり，光検出器に到達するまでに飛行する距離が非常に長くかつ不均一になってしまう．結果として，光検出器まで到達する確率は低くなると共に効率が均一にならないため，中性子イベントに起因するピーク構造を形成できなくなってしまう．こういった問題を解決する一つの方式が，筆者らによって提案された透明樹脂（Transparent RUbber SheeT：TRUST）型の中性子シンチレータである．これは，小片状にした Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータを子のシンチレータに近い屈折率を持つ透明樹脂の中に分散させたものである．屈折率比が大きな界面では，大きな角度で屈折する．一方，異なる物質間の界面であっても，両者の屈折率比がほぼ 1 に近い場合は，ほとんど屈折せず，あたかも界面が無いかのように光はまっすぐ進むことができる．このように屈折率がほぼ同じ透明樹脂中にシンチレータを分散させることで，シンチレータから発せられた光は，多数の界面があったとしても，ほぼまっすぐ進むことができ，ほぼ均一な効率でシンチレーション光を集光することができる．このように透明樹脂中に Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータを分散したものを TRUST Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータと呼んでいる[18]．TRUST 化することで γ 線抑制以外にもさまざまな利点がある．ひとつは，透明樹脂は型枠成形で成形するため，シンチレータ形状の自由度は高く，また大型化も単結晶シンチレータと比べると容易である．また，単結晶シンチレータでは，大型化する際にはクラックの無い大型結晶の育成が必要になるが，透明樹脂型に分散されている結晶はおのおの小片結晶であるため，結晶育成に対する要求仕様が緩和され，結晶育成にかかるコストを抑制することが可能である点

もメリットとなる．TRUST Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータは大型化が容易かつ形状の自由度が高い反面，透明とはいえ単結晶シンチレータと比べると光の透過率は高くないため，如何にしてシンチレーション光を集めるかが問題となる．こういった大型あるいは複雑な形状の TRUST Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータからの集光には，高エネルギー物理の分野で利用されている波長シフトファイバ光学系が利用できる[19]．波長シフトファイバは，光ファイバ側面から入射する光子をコア内で吸収，波長シフトして再放出する．この再放出された光子は，光ファイバコア内を伝送可能であるため，波長シフトファイバは側面から集光可能な光学系として利用でき，大型あるいは複雑形状のシンチレータからの集光に適している．波長シフトファイバ集光光学系と TRUST Eu:$LiCaAlF_6$ シンチレータを組み合わせ，さまざまな複雑形状の中性子検出器が提案，開発されている．

4　化合物半導体検出器

半導体検出器は，検出媒体が半導体物質から成り，放射線が半導体と相互作用した際に生成される電子–正孔対を，高電圧を印可して収集することで電気信号に変換するものである．放射線計測に用いられる代表的な半導体物質を Table 1 に示す．

最も一般的に用いられている半導体検出器媒体は Si および Ge である．通常の純度の Si 検出器では，有感層となる空乏層をそれほど厚くできないため，その利用は低エネルギー X 線，荷電粒子の計測に限られる．一方，高純度 Ge（High Purity Germanium：HPGe）検出器は，その高い純度により空乏層を厚くすることが可能で，γ 線スペクトロスコピーに用いられる．これらの半導体中での，電荷キャリア，つまり電子・正孔の移動度は非常に高く，生成された電子–正孔対の収集効率はほぼ 100 % で，非常に高いエネルギー分解能が得られる．

HPGe 半導体検出器は高いエネルギー分解能を示す γ 線検出器であるが，その狭いバンドギャップのため，室温では熱励起によるノイズが大きくなってしまい検出器として動作させることができない．このため，通常液体窒素温度まで冷却して使用される．このことが，HPGe 半導体検出器を利用する上での欠点となるが，これらに代わり室温動作可能な半導体検出器がいくつか出てきている．CdTe およびこれに Zn を添加した CZT と呼ばれる化合物半導体が代表的なものである．これらは，エネルギー分解能こそ HPGe 検出器には及ばないものの，室温動作可能で，Ge と比して大きい原子番号，密度を有しているため，γ 線に対する線減弱係数が高く高効率で γ 線を検出可能という利点がある．しかしながら，大きな粒界の無い単結晶を育成することが難しいこと，電荷キャリアの移動度が HPGe に比べると小さいことに起因して，その検出器サイズは最大で 1 cm 程度となっている．

近年，さらに新たな化合物半導体検出器として TlBr の開発が，東北大・東北工大のグループにより精力的に進められている[21–23]．TlBr は，広いバンドギャップを有し室温動作可能で，その大きい原子番号および密度により非常に高い γ 線検出効率を示すことが期待されていた．しかしながら開発当初，電荷キャリアの移動度が低く，放射線検出器として動作に至らない状況が続いたが，帯域精製法といった純化技術が確立したことにより電荷輸送特性が改善され，HPGe には及ばないものの CdTe や CZT と同等の電荷移動特性が得られるようになった[24]．また，TlBr では，CdTe 等と同様に長時間使用し続けた際にエネルギー分解能等の検出器性能が劣化するポーラリゼーションと呼ばれる現象が起こる問題があった．ポーラリゼーションのメカニズムは CdTe 等とは異なり，イオン電導により Tl^+ あるいは Br^- が移動し偏ってしまうというモデルが提

Table 1.　Properties of semiconductor detector materials [20].

Material	Atomic number	Density (g/cm^3)	Bandgap (eV)
Si	14	2.33	1.16
Ge	32	5.33	0.72
CdTe	48/52	6.06	1.52
$Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ (CZT)	48/30/52	6.0	1.64
TlBr	81/35	7.56	2.68

唱され，電極に Tl 金属を用いることでポーラリゼーションが抑制されることが示された[25,26]．また，CdTe 同様，正孔の移動度は電子より 1 桁以上遅く，正孔を 100 % の効率で収集するためには電極間の距離，つまり検出器厚さを薄くする必要がある．この問題を改善する方法としては，単極性電荷有感型の検出器構造とすることが挙げられる．これは，電極に誘起される信号が，主として電子によって誘起されるようにした電極構造である．単極性電荷有感型の検出器構造としては，Capacitive Frisch Grid 型のもの，Small pixel 効果を利用した多 pixel 化されたものが挙げられる．特に陽極で二次元に多 pixel 化されたもので，陽極と陰極に誘起される信号波高値の比を取ると，どの深さで電荷キャリアが形成されたか，つまり相互作用したかの情報が得られるため，三次元的な相互作用位置を限定できることが示されている．検出器厚さを増加させると，移動度の大きな電子であっても 100 % の効率で収集することは難しくなってくるため，深さ方向の相互作用位置がわかると，これにより電荷収集効率を補正することも可能となる．Pixel 型の検出器で深さ補正を施すことで，^{137}Cs からの 662 keV の γ 線に対して 1 % にせまる非常に高い分解能が得られることが示されている[27]．

5　結言

本報では，放射線検出器の三分類であるガス検出器，シンチレーション検出器，半導体検出器について，主として日本の研究グループが牽引しているものを紹介した．もちろん，ここに取り上げていない検出器も数多開発が進められており，優れた成果が示されているが，誌面の関係上，本報で取り上げられなかった点はご容赦いただきたい．

〈参 考 文 献〉

1) A. Ochi, T. Nagayoshi, S. Koishi, T. Tanimori, T. Nagae, M. Nakamura, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A, 471 (2001) 264.
2) F. Sauli, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 386 (1997) 531.
3) S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, K. Miyama, M. Shoji, E. Nakano, T. Koike, K. Morita, H. Satoh, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi, Phys. Procedia, 26 (2012) 142.
4) H. Takahashi, Y. Mitsuya, T. Fujiwara, T. Fushie, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 724 (2013) 1.
5) T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, T. Fushie, S. Kishimito, B. Guerard, M. Uesaka, J. Inst. 9 (2014) P11007.
6) T. Fujiwara, Y. Mitsuya, T. Yanagida, T. Saito, H. Toyokawa, H. Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 106401.
7) T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 878 (2018) 40.
8) E. V. D. van Loef, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, K. W. Krämer, H. U. Güdel, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 486 (2002) 254.
9) N. J. Cherepy, G. Hull, A. D. Drobshoff, S. A. Payne, E. Van Loef, C. M. Wilson, K. S. Shah, U. N. Roy, A. Burger, L. A. Boatner, W. S. Choong, W. W. Moses, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 083508.
10) K. Kamada, T. Endo, K. Tsutumi, T. Yanagida, Y. Fujimoto, A. Fukabori, A. Yoshikawa, J. Pejchal, M. Nikl, Cryst. Growth Des., 11 (2011) 4484.
11) A. V. Getkin, N. V. Shiran, S. V. Neicheva, M. J. Weber, S. E. Derenzo, W. W. Moses, J. Luminescence, 102–103 (2003) 460.
12) A. Yoshikawa, T. Yanagida, Y. Yokota, N. Kawaguchi, S. Ishizu, K. Fukuda, T. Suyama, K. J. Kim, J. Pejchal, M. Nikl, M. Miyake, M. Baba, IEEE. Nucl. Trans. Sci. 56 (2009) 3796.
13) A. Yamazaki, K. Watanabe, A. Uritani, T. Iguchi, N. Kawaguchi, T. Yanagida, Y. Fujimoto, Y. Yokota, K. Kamada, K. Fukuda, T. Suyama, A. Yoshikawa , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 652 (2011) 435.
14) K. Watanabe, Y. Kondo, A. Yamazaki, A. Uritani, T. Iguchi, N. Kawaguchi, K. Fukuda, S. Ishizu, T. Yanagida, Y. Fujimoto, A. Yoshikawa , Radiat. Meas. 71 (2014) 158.
15) T. Yanagida, N. Kawaguchi, Y. Fujimoto, K. Fukuda, Y. Yokota, A. Yamazaki, K. Watanabe, J. Pejchal, A. Uritani, T. Iguchi, A. Yoshikawa, Opt. Mater. 33 (2011) 1243.
16) T. Yanagida, A. Yamaji, N. Kawaguchi, Y. Fujimoto, K. Fukuda, S. Kurosawa, A. Yamazaki, K. Watanabe, Y. Futami, Y. Yokota, A. Uritani, T. Iguchi, A. Yoshikawa, M. Nikl, Appl. Phys. Express, 4 (2011)

106401.
17) K. Watanabe, Y. Kawabata, A. Yamazaki, A. Uritani, T. Iguchi, K. Fukuda, T. Yanagida, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 802 (2015) 1.
18) D. Sugimoto, K. Watanabe, K. Hirota, A. Yamazaki, A. Uritani, T. Iguchi, K. Fukuda, S. Ishidu, N. Kawaguchi, T. Yanagida, Y. Fujimoto, A. Yoshikawa, H. Hasemi, K. Kino, Y. Kiyanagi , Phys. Procedia , 60 (2014) 349.
19) K. Watanabe, T. Yamazaki, D. Sugimoto, A. Yamazaki, A. Uritani, T. Iguchi, K. Fukuda, S. Ishidu, T. Yanagida, Y. Fujimoto , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 784 (2015) 260.
20) G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, fourth ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2010, pp. 485-499.
21) K. Hitomi, T. Murayama, T. Shoji, T. Suehiro, Y. Hiratate, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 428 (1999) 372.
22) K. Hitomi, T. Tada, S. Kim, Y. Wu, T. Tanaka, T. Shoji, H. Yamazaki, K. Ishii, IEEE Trans. Nucl. Sci. 58 (2011) 1987.
23) K. Hitomi, T. Shoji, K. Ishii, J. Cryst. Growth, 379 (2013) 93.
24) K. Hitomi, T. Onodera, T. Shoji, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 579 (2007) 153.
25) K. Hitomi, T. Shoji, Y. Niizeki, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 585 (2008) 102.
26) K. Hitomi, Y. Kikuchi, T. Shoji, K. Ishii, IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 1859.
27) K. Hitomi, T. Onodera, S.-Y. Kim, T. Shoji, K. Ishii, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 747 (2014) 7.

〈著 者 略 歴〉

渡辺 賢一： 2000 年 6 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程原子核工学専攻 中退．2000 年 7 月名古屋大学核燃料管理室 助手．2007 年 4 月名古屋大学大学院工学研究科 准教授．

とぴっくす

飛跡構造計算に基づく無機シンチレータ発光強度の予測

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　小川 達彦*, 佐藤 達彦
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構　八巻 徹也

A method to predict the response of inorganic scintillators exposed to various particles with consideration for quenching effect is developed. The light yield of inorganic scintillators is proportional to the deposited energy in the first order approximation, but in case of radiation with high energy deposition density, the light yield is suppressed owing to the quenching effect. In this study, the light yield was predicted by a combination of following three processes, (1) topological arrangement of energy deposition calculated by a track-structure calculation code, (2) energy transfer between the excited molecules based on dipole interaction, (3) non-radiative de-excitation of the molecules at highly excited states. The accuracy of the developed model was well verified by the earlier experimental data.

Keywords: inorganic scintillators, quenching, track-structure

1　はじめに

シンチレータは放射線によって付与されたエネルギーを光として放出する物質であり，サーベイメーターや実験用測定器などとして広く普及している．シンチレータは結晶自身やそこに添加された蛍光物質の電子が放射線により励起され，これが脱励起するときに数 100 nm の波長をもつ光を放出する．シンチレータの中でも NaI(Tl)，CsI(Tl)，BGO などの無機シンチレータは，高い原子番号と密度により，高い放射線阻止能を持つため，高エネルギーの放射線を完全に停止するような測定に有効である．

シンチレータに入射した放射線のエネルギーを知るためには，発光量とエネルギー付与量の関係をあらかじめ調べておき，計測で得られたシンレータの発光量をそれに基づいて変換する方法が一般的である．シンチレータの発光は，入射した放射線によって励起された電子の脱励起によるため，発光量は第一義的には励起された電子の数に比例するとみなせる．ただし，エネルギー付与が高密度になると，付与されたエネルギーに対する発光量が少なくなることも知られており，これをクエンチング効果と呼ぶ．クエンチング効果を考慮したエネルギー付与量と発光量の関係式は，Birks の式[1] が最もよく知られており，以下の式であらわされる．

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}x} = S\frac{\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}}{1 + kB\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}}, \tag{1}$$

ここで，$\mathrm{d}L/\mathrm{d}x$ は単位長さの粒子飛跡当たり生じる発光量，S は自己クエンチングなどで決まる規格化係数，k は粒子が失ったエネルギーを電子がどれくらい受け取るかを決める伝達係数，B はエネルギー付与当たりにクエンチングに寄与する因子が生成する量を決める比例係数，$\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$ は線エネルギー付与（LET）である．なお Birks の理論は有機シンチレータへの適用を前提としており，クエンチングに寄与する因子の候補として，放射線による損傷で非放射的に脱励起するようになった蛍光体分子を挙げている．この式の特徴は，規格化定数を除いて実質的に一つのパラメータ（kB）しかないことと，LET の一価関数として発光量が表されているということである．この kB はシンチレータの種類によって異なるが，粒子種やエネルギーによらず一定であるため，LET が異なる複数の粒子線に対して発光量を測定すれば kB が決定でき，普遍的に発光量を予測できる．この式は，陽子線や高エネルギー重イオンなどによる発光応答をよく再現できるため，広く

Prediction of scintillation light yield based on track-structure simulation
Tatsuhiko Ogawa* and Tatsuhiko Sato (*Japan Atomic Energy Agency*),　Tetsuya Yamaki (*National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology*),
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2–4
TEL: 029–282–5195, E-mail: ogawa.tatsuhiko@jaea.go.jp

使われている．しかし，光子のように LET が定義できない粒子にはそもそも式を適用できないうえ，陽子や重イオンは同じ LET であれば，粒子種や運動エネルギーが異なっても同じ発光量が得られなければならない．クエンチングはエネルギー付与の空間的分布によって発生しているが，LET は動径方向のエネルギー付与分布密度を考慮できないことから，適用性には問題があることが予測される．実際に高 LET の重イオン向けに改良版の式も提案されているが[2,3] これらも LET の一価関数なので，同じ LET で異なる発光量が得られたという実験結果[4] を説明できない．

そこで著者らは以前の研究で[5]，有機シンチレータに関して飛跡構造解析計算コード RITRACKS[6] に基づく励起電子の空間的配置の予測，さらにその励起電子間に働く相互作用を Förster 効果[7] として計算し，さらに Kasha 則[8] に基づいて励起エネルギーが発光に寄与することなく散逸する過程をモデリングした．この計算を最も実験データが充実しているシンチレータの NE-102（EJ-212）有機シンチレータに対して実施し，先行研究の実験結果と比較した．その結果，発光量の実験値の再現に成功し，特に Birks の式では再現できなかった同 LET で発光量が異なる場合も，その差異を再現することに成功した．

本論ではその方法論を発展させ，無機シンチレータの NaI(Tl) や CsI(Tl)，BGO 等に適用し，従来得られている実験データの再現を行った．その結果，数 MeV から数 GeV の陽子やイオン，1 MeV 前後のガンマ線など広い範囲で発光量を再現することに成功した．

2　計算方法

本研究で対象とする無機シンチレータは，さまざまな粒子による発光量の測定値が報告されている CsI(Tl)，NaI(Tl)，BGO の三種類とした．本研究では以下の過程を考慮することにより発光量を計算する．まず，γ 線や荷電粒子の照射を受けたこれらのシンチレータ内部では，光電子や δ 線として電子線が発生し，その電子はシンチレータ中の電子と散乱を繰り返して，二次電子を生じながら熱化していく．この熱化した電子が，NaI(Tl) や CsI(Tl) においては Tl の作る蛍光準位に到達し，BGO では正孔と束縛し自己束縛励起子を生じ，その電子が脱励起することで発光を生じる．こうした発光準位にある電子同士が，物質内の遮蔽が無視できるほど近くにあった場合，有機シンチレータにおける Förster Resonance Energy Transfer のような双極子相互作用により，エネルギーが受け渡されると考える．この時，エネルギーを渡した方は励起エネルギーを失って基底状態に遷移し，エネルギーを受けとった側は，より高位の状態に遷移する．しかし，Kasha の法則によれば，高位の励起状態は非放射的に第一励起状態に遷移しやすく，仮にこの遷移により光子を発しても，シンチレータの信号検知系と波長が整合しない限り信号には寄与しないため，無視できる．こうして起こる非放射性遷移によるエネルギーの熱的散逸がクエンチングであると仮定した．

電子間の相互作用は NaI(Tl) と CsI(Tl) の場合，蛍光準位に達する前に起こっていると考えられる．それは，電子間の相互作用距離が後述の分析によると 2 nm 前後であり，蛍光準位を担う Tl の原子間距離と同等かそれ以上に長いためである．蛍光準位に達してからではお互い遠すぎて，相互作用しなかったはずである．一方 BGO においては，電子の相互作用と自己束縛励起子形成の順序は明確でないが，Itoh らの研究[9] によるとエネルギーの付与密度によって自己束縛励起子が相互作用し変化することから，相互作用は自己束縛励起子を形成してから起こっていることが示唆される．更に，蛍光準位や励起子の寿命は発光の立下り（数 100ns 程度）程度なので，消光がそれより速ければエネルギー付与密度に依存した消光の時間挙動が，発光の減衰波形に現れると期待され，そうした計算にも本手法は活用できる可能性がある．

このエネルギーの散逸は電子間のエネルギー移行以外が担っている可能性も否定できないが，本研究で扱うシンチレータにおけるクエンチングは多くの実験で確かめられているので，格子欠陥のような大きな個体差を伴うものとは考えにくい．また，発光を阻害する特定の分子状態（損傷など）が特定されているわけではないこと，以降の解析では nm スケール内に複数存在しないとクエンチングの実験値は再現できないことから，このように仮定した．一方，近距離の電子間のエネルギー移行だとすると，双極子相互作用以外に交換相互作用のような，より短距離の相互作用の影響も考えられる[9,10]．この場合相互作用の距離依存性は，双極子相互作用が距離の 6 乗の関数で表されたのに対し，交換相互作用は距離の指数関数に従って減衰する．近距離ほど相互作用が強くなる本計算の趣旨は変わらないため，ここでは双極子相互作用を仮定して計算するが，交換相互作用が支配的だった場合，この距離依存性は将来的に修正の必要があるかもしれない．

上記の過程を計算するためには，電子の熱化までを追跡する輸送計算により，ナノメートル単位での電子の空間的配置を知る必要がある．放射線輸送計算コー

ドの多く（MCNP[11]，EGS[12] 等）は 1 keV まで輸送できるが，1 keV の電子は水中でも 40 nm 程度運動するため[13]，ナノメートル単位の電子の配置を計算するには数 eV まで電子を追跡できる別の計算コードが必要である．また，PHITS[14] のような電子の熱化が計算できる放射線輸送計算コードでも，陽子や重イオンが物質中で二次電子を散乱する初めの過程が汎用的に計算できないものは，ここでは使用できない．そこで本研究では，ヘリウムから金までの重イオンや，電子，陽子などさまざまな入射粒子を扱うことができる RITRACKS[6] コードを使用した．この飛跡構造解析コードは，δ 線や二次粒子として生じる電子が媒質中の電子と散乱を繰り返しながら，数 eV に達するまでの過程を明示的に二体衝突の繰り返しとして再現する．

電子の熱化を計算したら，次は電子間のエネルギーの移動が問題である．双極子相互作用によりエネルギー移動が起こる確率は，相互作用する電子間の距離に依存し，式 (2) で表される

$$p(r) = \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{R_\mathrm{i}}\right)^6}, \tag{2}$$

ここで r は相互作用する電子間の距離であり，R_i は相互作用の強さを示す物質固有の定数である．電子間の距離が R_i と等しいときに，相互作用確率が 50 % になる．有機シンチレータの場合[5] は R_i を Förster 半径としたが，その場合は一般に式 (3)

$$R_\mathrm{i} = \frac{9Q_0 Ln(10)}{128\pi^5 n^4 N_A}\kappa^2 J, \tag{3}$$

で計算され，実測値は多くの物質で 2 nm–6 nm である[15]．ここで，Q_0 は分子の蛍光量子収量，n は媒体の屈折率，N_A はアボガドロ数，κ は相互分子配向，J は蛍光分子の発光スペクトルとそれを吸収する分子の吸光係数の積である．本研究で扱うシンチレータの場合は，この距離の測定値や理論値が存在しないため，複数の値を試した．

具体的な計算手順は以下の通りである．まず飛跡構造解析コード RITRACKS[6] により，エネルギー付与点の xyz 座標，その点に落ちたエネルギーを計算する．統計誤差を下げるため，入射粒子 5000 個に対して Monte-Carlo 計算の乱数を変えて計算を行った．入射粒子の種類やエネルギーは実験値に合わせるが，RITRACKS は入射粒子が荷電粒子の場合，媒質中での連続的なエネルギー低下を考慮できないので，入射時より低いエネルギーでも計算し，厚みで重みをつけて異なるエネルギーでの結果を足し合わせる．公式リリースである RITRACKS Ver. 3.06 は，原子番号が 28（Ni）以下のイオンしか輸送できないため，原子番号 84（Rn）まで輸送できる RITRACKS Ver. 3.1[16] を使用した．ただし，RITRACKS は放射線生物学用のコードであるため，水中の粒子輸送計算を前提とする．無機シンチレータに適用するため以下の換算を行った．シンチレータの構成原子と密度から計算される電子密度を d とし，水の電子密度を d_w とすると，電子の衝突頻度は d/d_w 倍になる．そのため，RITRACKS の計算結果として得られる座標間隔をすべて d_w/d 倍する．また，エネルギーの最終的な付与は水のさまざまな電離モードとして記録されるので，無機シンチレータに適用するため計算結果を以下のように解釈した．本研究で対象とするシンチレータの発光スペクトル中心は 415 nm–565 nm であり，それに対応するエネルギーは 2.19 eV–2.98eV である．したがって，水における $1b^1$（8.76 eV），$3a^1$（12.1 eV），$1b^2$（16.8 eV），$2a^1$（32.2 eV），$1a^1$（40.0 eV），DEA(解離性電子付着，7 eV–14 eV 程度）の電離は，シンチレータにおいてもすべて発光に寄与するとして同等に扱う．一方で回転や振動モードは，電離に寄与しないと考えられるため，ここでは無視した．

上記の計算を行って得られる蛍光準位の電子数と蛍光収率から，発生する光子の絶対量を得ることができる．また 1MeV の光子に対する発光量に対して規格化することで，一般的な発光量の単位（photons/MeV）に換算することもできる．ただし以下で比較対象とする実験値の発光量は，光電子増倍管などにより実験ごとに増幅された電気信号の強さなので，発光量を入射粒子の種類やエネルギーに対して計算し，相対値として比較した．

3　実験結果との比較

発光量を計算するにあたり，唯一不明なパラメータは式 (2) の相互作用距離 R_i である．上述の通りこの値は測定値がないため，いくつかの値を仮定して発光量を計算し，実験値と比較を行った．この結果，実験値を最もよく再現した値を，そのシンチレータの R_i とする．CsI(Tl) の発光量を例に，R_i に対する発光量の応答を調べた結果を示す．Figures 1–3 は，R_i = 1.5 nm, 2.0 nm，3.8 nm の 3 パターンで発光量を計算し，実験値[17] と比較した結果である．

有機シンチレータにおける最低値が 2.0 nm であったことを参考にして，2.0 nm を試した場合が Fig. 2 で

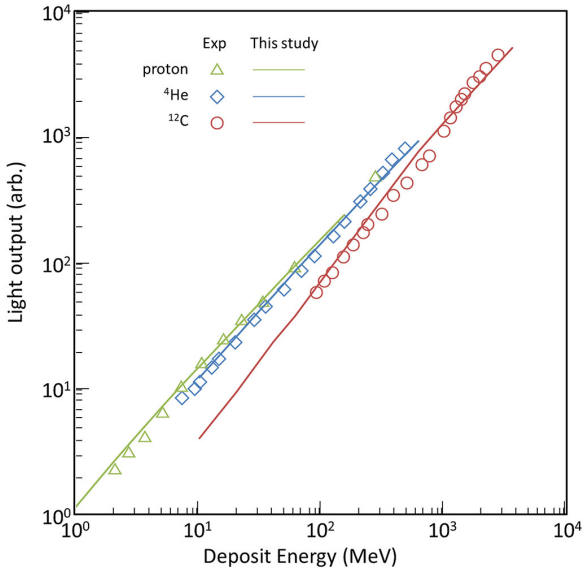


Figure 1. Comparison of calculated and measured light yield of CsI(Tl). R_i = 1.5 nm.

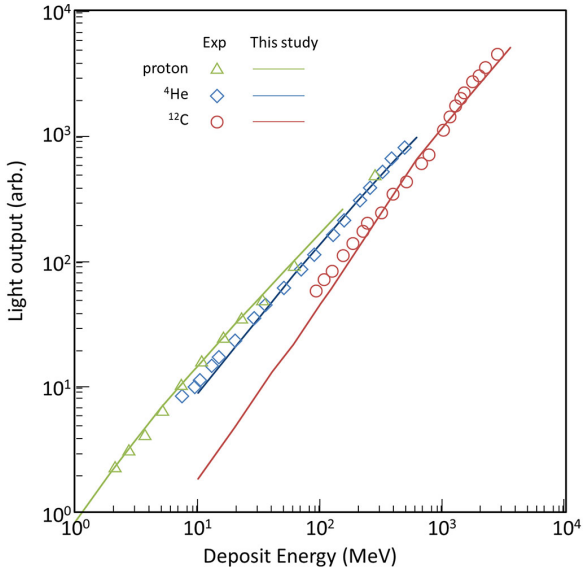


Figure 2. Comparison of calculated and measured light yield of CsI(Tl). R_i = 2.0 nm.

ある．陽子，^{4}He に対する再現性は良い一方，^{12}C の 100 MeV 以下での再現性が悪い．そこで，R_i を 1.5 nm に下げて計算したところ Fig. 1 のようになり，この結果が最適であった．逆に Fig. 3 のように R_i が大きいと，^{12}C だけでなく ^{4}He でも低エネルギーで再現性が悪化する．

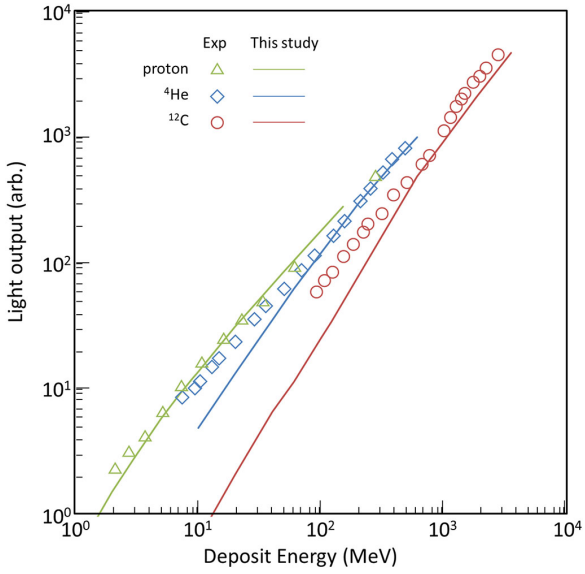


Figure 3. Comparison of calculated and measured light yield of CsI(Tl). R_i = 3.8 nm.

陽子はエネルギー付与密度が低いため，発光に寄与する電子間の距離が遠く，上記の範囲で R_i を変えても電子間の相互作用はほとんど起こらない．一方炭素等の重いイオンはエネルギー付与密度が大きく，特にこのエネルギー領域ではエネルギーが低いほど高密度にエネルギーが付与される．そのため R_i が大きいと電子間のエネルギー移行が起こりやすくなり，クエンチングの原因となるエネルギーの非放射的な放出が増える．結果として，R_i が高いほど，低エネルギーでの発光量が強く抑制される．このように，低速で重いイオンほど R_i が発光に影響しやすいことから，これ以降の条件では最も重いイオンで結果を再現するよう R_i を選択した．

Figures 4, 5 は NaI(Tl) に光子と重イオンをエネルギーを変えて照射した結果[17,18] の比較である．γ 線は LET が定義できないため，Birks の式が適用できないが，このグラフに示すように本研究の手法では発光量を計算することができ，エネルギーに対する発光量の応答を良く再現している．γ 線の場合は，光電効果や Compton 効果で反跳される電子によってエネルギーが付与されるため電離の密度は低く，発光量はほぼエネルギーに比例する．しかし Fig. 6 のように詳細に比較すると，エネルギーが低いほど付与エネルギー当たりの発光量が低下する．Moszynski ら[19] や，越水ら[20] も指摘するこの非線形性は，本手法でも再現できることが示唆された．

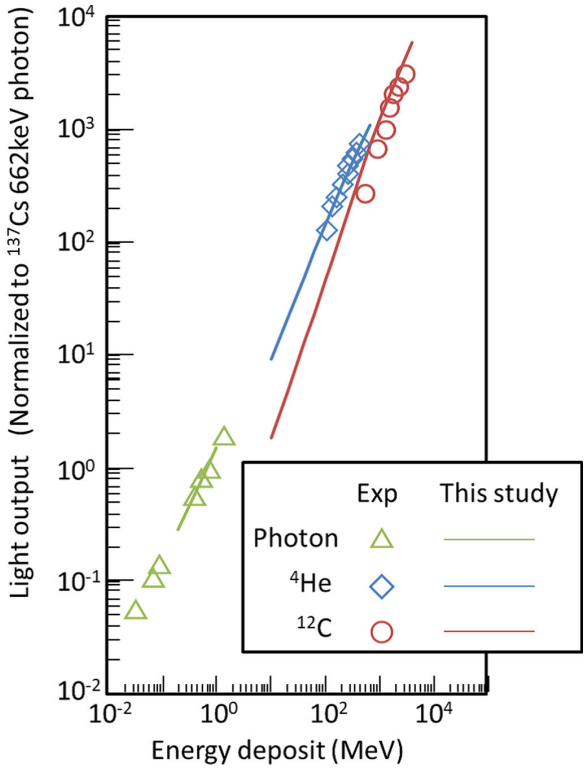


Figure 4. Comparison of calculated and measured light yield of NaI(Tl) exposed to photons and ions. R_i = 3.8 nm.

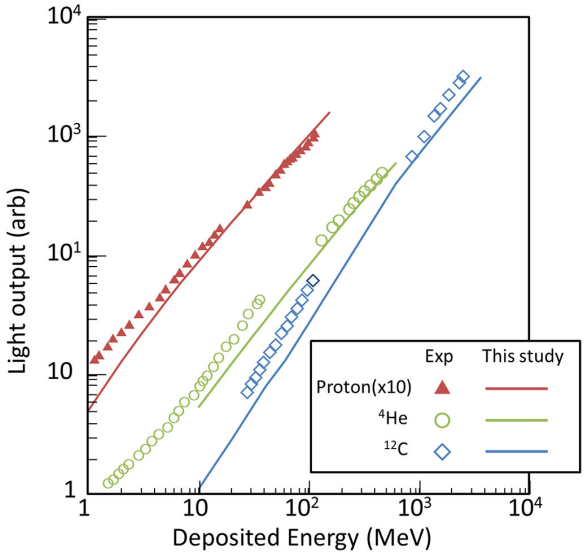


Figure 5. Comparison of calculated and measured light yield of NaI(Tl) exposed to protons and ions. R_i = 3.8 nm.

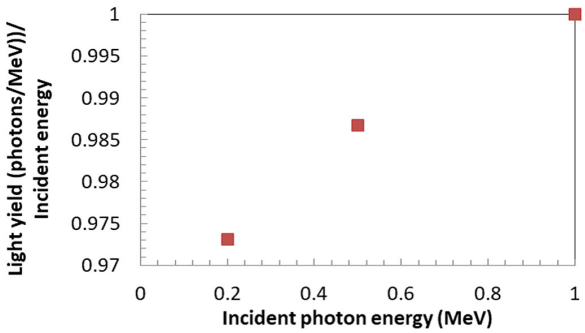


Figure 6. Calculated light yield of NaI(Tl) exposed to photons normalized to incident (deposited) energy. R_i = 3.8 nm.

Figures 4, 5 で R_i は 3.8 nm が最適であった．エネルギー付与密度が大きく異なる重イオンと光子で，同じ R_i 値を使えたことは，本手法の妥当性を支持する結果である．

Figures 7, 8 は BGO に重イオンを照射した際の発光量を実験[21,22] と計算で比較したものである．この場合実験値を再現する R_i は 2.5 nm で，ここでも Fig. 7，8 がどちらも同じ手法とパラメータで再現できたことは重要である．というのは，前者は数 10 MeV–100 MeV の重イオンに対するデータ，後者は GeV 前後の重イオンに対するデータであり，エネルギー付与密度が大きく異なるからである．このことは，本手法がイオン種に対する普遍性はもちろん，エネルギーにもよらず，普遍的に適用できることを示している．これ以上のエネルギーでも，エネルギー付与密度はさらに低下することからクエンチングは弱くなり，高い再現性は維持されると見込まれる．一方，これより低いエネルギーではシンチレータの有感領域に達するまでに放射線は止まってしまうため，実用上の意味は乏しい．したがって上記の比較から得られる結論は普遍的なものと見込まれる．

4 結論

無機シンチレータの γ 線や重イオン照射に対する発光量を，飛跡構造計算と双極子相互作用によるエネルギー輸送，そして Kasha 則に基づく非放射的脱励起を考慮することで，再現することに成功した．特にエネルギーの低い重イオンはエネルギー付与密度が高く，付与されたエネルギーに対して発光量が抑制されるが，そのような発光量を広範な条件で本手法は再現す

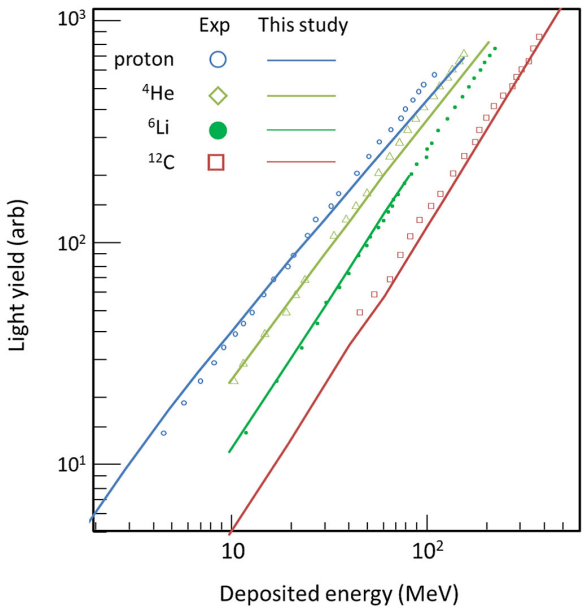


Figure 7. Comparison of calculated and measured light yield of BGO exposed to protons and ions of a few MeV. R_i = 2.5 nm.

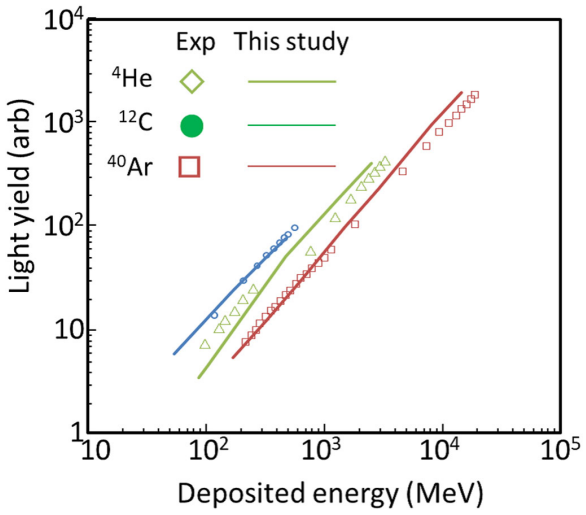


Figure 8. Comparison of calculated and measured light yield of BGO exposed to ions of a few GeV. R_i = 2.5 nm.

ることができる．本手法は LET の関数として発光量を計算する Birks の式のような手法とは異なり，LET の定義できない光子にも適用可能な上，LET が同じでも発光量が異なる粒子の場合，その違いをエネルギー付与分布に基づいて考慮できる．

電子間の相互作用距離に関するパラメータ R_i は入射粒子によらない物質固有の定数と考えられるが，有機シンチレータの Förster 半径のように測られている場合は限られるため，本研究で取り上げた無機シンチレータでは実験結果からフィッティングにより決定した．しかしその結果，各シンチレータ種に対して単一の値で異なる粒子種とエネルギー領域に対する実験値を再現することができ，本手法の妥当性を支持する結果が得られた．

本研究を応用すれば，シンチレータ検出器の応答予測ができるだけでなく，蛍光準位の電子が強く相互作用する蛍光体を使うことで，粒子種やエネルギーによって応答が大きく変わるシンチレータを開発するなど，検出器開発にも役立てることが可能である．

〈参 考 文 献〉

1) J. B. Birks, Proceedings of the Physical Society Section A, 64 (1951) 874.
2) C. N. Chou, Phys. Rev., 87 (1952) 904.
3) R. L. Craun, D. L. Smith, Nucl. Instrum. Meth., 80 (1970) 239.
4) F. D. Becchetti, C. E. Thorn, M. J. Levine, Nucl. Instrum. Meth., 138 (1976) 93.
5) T. Ogawa et al., PLoS One, 13 (2018) e0202011.
6) I. Plante, F. A. Cucinotta, Monte-Carlo Simulation of Ionizing Radiation Tracks, in: C. J. Mode (Eds.), Applications of Monte Carlo Methods in Biology in Medicine and Other Fields of Science, InTechOpen Limited, London, 2011, pp. 315
7) T. Förster, Annalen der Physik, 437 (1948) 55.
8) M. Kasha, Discussions of the Faraday Society, 9 (1950) 14.
9) M. Itoh, T. Katagiri, J. Phys. Soc. Jpn., 79 (2010) 074717.
10) K. Kimura et al., Phys. Rev. B, 58 (1998) 6081.
11) C. J. Werner et al., “MCNP 6.2 Release Note”, Los Alamos National Laboratory, report LA-UR, 18 (2018) 20808.
12) H. Hirayama et al., SLAC Report, 730 (2005) 160113.
13) T. Kai et al., Radiat. Phys. Chem., 115 (2015) 1.
14) T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Tech., 55 (2018) 684.
15) D. L. Horrocks, CHAPTER II - BASIC PROCESSES. in: HORROCKS DL, (Ed). Applications of Liquid Scintillation Counting. Academic Press, Cambridge

(1974) pp 12.
16) I. Plante, RITRACKS Ver. 3.1, private communication.
17) Y. Koba et al., J. Nucl. Sci. Tech. Supplement, 5 (2008) 470.
18) Y. Koba et al., Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 1 (2011) 218.
19) M. Moszynski et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 805 (2016) 25.
20) 越水 正典ら, Radioisotopes, 66 (2017) 519.
21) V. Avdeichikov et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 484 (2002) 251.
22) N. Matsufuji et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 430 (1999) 60.

〈著 者 略 歴〉

小川 達彦：国立研究開発法人原子力研究開発機構研究員．執筆時点では仏国原子力代替エネルギー庁（CEA-Saclay）留学中．専門は核反応物理，放射線化学シミュレーション．

佐藤 達彦： 国立研究開発法人原子力研究開発機構研究主幹，大阪大学核物理研究センター特任教授（クロスアポイントメント）．国際放射線防護委員会第 2 専門委員会委員．研究テーマは，PHITS の開発とその生物および宇宙線研究への応用．

八巻 徹也： 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構上席研究員．専門は量子ビーム材料科学．

とぴっくす

スーパーカミオカンデの紹介と施設への放射性ラドンガスの影響について

神戸大学大学院 理学研究科 物理学専攻 粒子物理学研究室　中野 佑樹*

Super-Kamiokande has contributed to explore the field of neutrino physics since 1996. The next step of its solar neutrino measurement is to search for the matter effect on solar neutrino oscillation. But, the sensitivity for this search is limited by radioactive isotopes remaining in purified water. Especially, radon is one of the major background among underground experiments and its progeny (^{214}Bi) produces background events in MeV region. Therefore, monitoring Rn in the experimental site is important to evaluate such backgrounds in the physics analysis. For this purpose, we have developed a high sensitivity Rn detector for gas. In this article, we reviewed the development of this Rn detector and their applications in Super-Kamiokande.

Keywords: Super-Kamiokande, solar neutrino, radon gas, purified water

1　はじめに

ニュートリノは素粒子の一種と考えられ，電荷を持たず，弱い相互作用（と重力相互作用）でしか反応しない．このような特性を持つため，ニュートリノは検出が難しく，未だにその性質の理解が不十分である．現在までにニュートリノは 3 種類のフレーバーを持つことが知られ，それぞれ電子ニュートリノ（ν_e），ミューニュートリノ（ν_μ），タウニュートリノ（ν_τ）として知られている．ニュートリノ振動は現在の素粒子標準模型を超えた物理の存在を示唆する現象であり，その理解は新物理への糸口となることが期待される．ここでニュートリノ振動とは，ニュートリノが伝搬中に生成時のフレーバーから別のフレーバーに変化する現象である．

本記事では，スーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノ観測と放射性ラドンガス測定の技術開発に関して紹介する．

2　太陽ニュートリノ

2.1　簡単な歴史

太陽ニュートリノは，太陽中心の核融合反応（$4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e$）によって生成される電子ニュートリノのことである．生成される電子ニュートリノは原子核反応によって，keV 領域から MeV 領域までのエネルギーを持つ．

1960 年代，Homestake 実験は太陽ニュートリノ観測を行い，太陽ニュートリノ（電子ニュートリノ）強度が太陽標準模型で予言される強度よりも小さいことを報告した[2]．これは太陽ニュートリノ問題として認知され，その後の太陽ニュートリノ実験でも同様の観測結果が確認された．

2001 年に日本のスーパーカミオカンデ実験による弾性散乱反応とカナダの SNO 実験（Sudbury Neutrino Observatory）による荷電カレント反応の太陽ニュートリノ観測結果を比較することにより，太陽ニュートリノに電子ニュートリノとは異なる成分（ν_μ/ν_τ）が含まれることがわかった[3,4]．その後，SNO 実験の中性カレント反応の測定により，地球に飛来する太陽ニュートリノの総量が決定され，太陽標準模型による予言と一致することが確認された[5]．この観測事実はニュートリノが伝搬中に生成時のフレーバーから別のフレーバーに変化するニュートリノ振動現象を示している．

2.2　太陽ニュートリノ観測の今後

現在の太陽ニュートリノ観測はニュートリノ振動の物質効果を探索することが主要な目的となっている．物質効果とはニュートリノが物質中を透過する際に，真空中を透過する場合とは異なる振る舞いのニュート

Introduction of Super-Kamiokande and affection of radon in experimental area
Yuuki Nakano* (*Department of Physics, Kobe University*),
〒657–8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1–1
TEL: 078–803–5640, FAX: 078–803–5662,
E-mail: ynakano@phys.sci.kobe-u.ac.jp

リノ振動を引き起こす効果である．

太陽ニュートリノの場合，太陽内部の超高密度空間を透過する最中に，電子ニュートリノがミューニュートリノに変化しやすくなる．特に太陽核領域ではこの物質効果が顕著で，共鳴的にほぼすべての電子ニュートリノがミューニュートリノに変化する[6,7]（太陽内部での物質効果は，理論の提唱者である Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein の頭文字をとって MSW 効果と呼ばれる）．

現在，他の太陽ニュートリノ実験も含めた観測結果は部分的にはこの物質効果を支持する結果を得ているが，統計的には十分といえない状況である．この物質効果によるニュートリノ振動の変化は 1 MeV から 6 MeV 程度の領域で顕著であるため，このエネルギー領域における高精度の太陽ニュートリノ観測が必須である．

3　スーパーカミオカンデ検出器

3.1　検出器の概要

スーパーカミオカンデ（Super-Kamiokande）は陽子崩壊探索，ニュートリノ観測などを行う多目的な素粒子実験で，1996 年 4 月に運転が開始された[1]．Figure 1 にスーパーカミオカンデ検出器とその周辺の概略図を示す．なお，検出器の写真は東京大学宇宙線研究所や神岡宇宙素粒子研究施設のホームページにて公開されているため，そちらの写真を参照していただきたい．

スーパーカミオカンデ検出器は宇宙線ミューオンによる影響を抑えるために，地下 1000 m に設置されている．検出器は 5 万トンの超純水を素粒子原子核反応のターゲットとし，その周辺を光電子増倍管（PMT）で囲っている．物理観測に利用されるのは，主に内水槽と呼ばれる水槽の内側の 3.2 万トンの超純水で，内側に向かって 11129 本の 20-inch の PMT が設置されている．内水槽の外側には主に宇宙線ミューオンを検出するために外水槽が設置されていて，外向きに 1885 本の 8-inch PMT が配置されている．

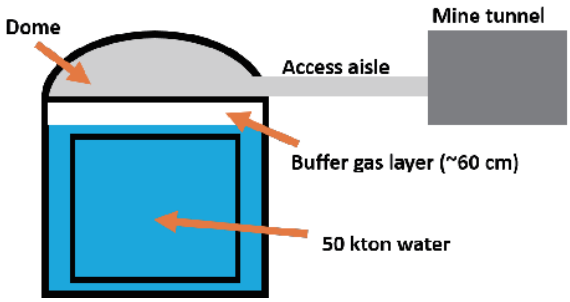


Figure 1. Schematic view of Super-Kamiokande as well as its surrounding area.

水槽の上には研究者が作業を行うドームが設置され，ドームから 40 m ほどのアクセス用の通路，そして鉱山の洞窟とつながっている．このような地下の環境では，洞窟の壁面からラドンガスが常に放出されており，検出器にラドンガスが混入する可能性がある．

3.2　検出手法

荷電粒子が光速に近い速度で超純水中を透過する際に，円錐形のチェレンコフ光が放出される．スーパーカミオカンデでは，チェレンコフ光を PMT で検出することにより，リングのパターンから到来方向，光量からエネルギーを再構成し，ニュートリノ反応を観測している．

太陽ニュートリノのうち ^{8}B 電子ニュートリノは最大で 15 MeV（平均 7 MeV）という比較的大きいエネルギーを持つ．この太陽ニュートリノは超純水中の電子と弾性散乱反応（$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$）を起こし，電子は数 MeV のエネルギーを持って反跳する．この反跳電子が放出するチェレンコフ光を PMT で観測することにより，太陽ニュートリノ観測を行っている．

3.3　物質効果の探索

スーパーカミオカンデ実験では，反跳電子のエネルギースペクトルを測定することにより太陽ニュートリノ振動における物質効果の探索を行っている．具体的には，まず太陽核領域で生成される ^{8}B 太陽ニュートリノのエネルギー分布を用いて，弾性散乱によって予想される反跳電子のエネルギー分布を求める．その後，実際に得られた観測データと予想される反跳電子のエネルギー分布を比べることで，どの程度の電子ニュートリノがスーパーカミオカンデ検出器で観測されているかを評価する．この時，真空中を透過する場合のニュートリノ振動では，太陽ニュートリノのエネルギーに関係なくほぼ 60 % 程度の観測数が期待される．一方で，物質効果がある場合は太陽ニュートリノのエネルギーが高くなるにつれて電子ニュートリノの観測数が少なくなり，6 MeV 以上では観測数が 35 % 程度まで減少する．

このようなエネルギーの増加にともなって，観測数が減少するような物理現象を捉えるため，反跳電子のエネルギー分布を広く測定することが重要になってく

る．スーパーカミオカンデ実験の場合，物理解析に用いるエネルギー閾値を低減することで，低エネルギー側に測定できる範囲を拡大し，物質効果に対する物理感度を向上させる努力が必要となる．

4　ラドンガスの施設への影響

物質効果の探索のために数 MeV 程度の反跳電子を観測する必要があるが，その一方で超純水中に含まれる放射性不純物がこのエネルギー領域の主要な背景事象となる．特に，ラドン（^{222}Rn）は半減期が 3.82 日と長いため，一度混入すると検出器の内部で拡散してしまう．拡散後，ラドン子孫核種である ^{214}Bi は 3.27 MeV の Q 値を持つため，β 崩壊によって放出される電子のエネルギーは太陽ニュートリノのエネルギー領域と一部重なり合ってしまう．この背景事象はスーパーカミオカンデのエネルギー分解能を考慮すると，太陽ニュートリノ事象と区別が付かないため観測データに混入してしまう．この背景事象により，太陽ニュートリノ観測におけるエネルギー閾値は制限されており，現在のエネルギー閾値は反跳電子の運動エネルギーで 3.5 MeV 程度になっている．背景事象を低減することにより，エネルギー閾値をさらに下げる事が可能となれば，物質効果探索のさらなる感度向上が見込める．したがって，超純水中のラドン濃度を測定することで，太陽ニュートリノ観測の背景事象を定量的に評価する必要がある．

しかし，スーパーカミオカンデにおける超純水のラドン濃度は mBq/m^3 程度である．たとえば，温泉水中のラドン濃度測定（10^4 Bq/m^3–10^5 Bq/m^3）に用いられるような標準的な液体シンチレーター法では，このような超低ラドン濃度を測定することは困難であり，独自の技術開発が必要である．そのため，我々はまず検出器の体積が 80 L 程度のガス用の高感度ラドン検出器の開発を行った[8,9]．その後，この高感度ラドン検出器を応用して，超純水中のラドン濃度測定システムを開発した．

5　ラドン検出器の開発とその応用

5.1　80 L ラドン検出器の開発

ラドンの子孫核種は約 90 % が正に帯電することが化学的に知られている．この化学的な特性から，電場を用いてラドン子孫核種を捕集することにより，気体中のラドン濃度を測定することができる[10]．我々が開発した高感度ラドン検出器の概形を Fig. 2 に示す．

このラドン検出器は ICF 銅ガスケットを利用した高圧高真空対応のステンレス容器で，周辺外気に含まれるラドンガスが検出器内部に混入しないように配慮している．検出器上部には，ラドン子孫核種の α 線のエネルギーを測定するために PIN photodiode を設置している．この PIN photodiode はフィードスルーで検出器外部の電気回路とつながっている．検出器内部に高電

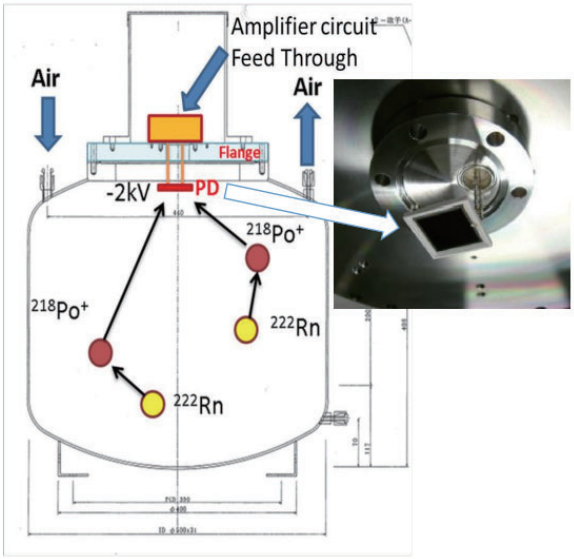


Figure 2.　The structure of the high sensitivity 80 L Rn detector. The PIN photodiode is connected to a ceramic feedthrough mounted on the top flange of the vessel.

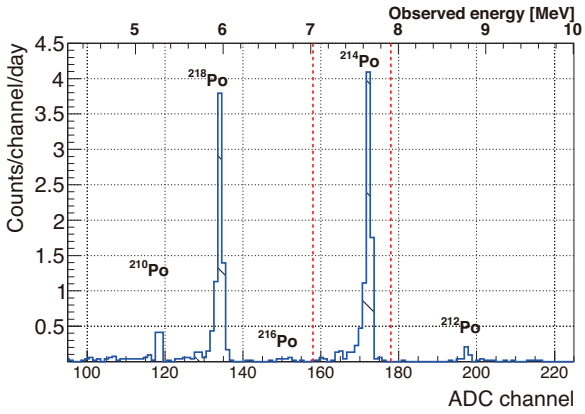


Figure 3.　Typical distribution of observed α-rays from Radon daughters. ^{214}Po signal is used for calculating the Rn concentration.

圧を印加することで電場を形成し，正に帯電したラドン子孫核種を PIN photodiode の表面に捕集する．捕集されたラドン子孫核種が崩壊した際に放出される α 線を計測し，同時にエネルギーを測定することで粒子識別を行う．実際の α 線のエネルギー分布の例を Fig. 3 に示す．

PIN photodiode の高いエネルギー分解能により，ラドン子孫核種の識別が高い精度でできていることがわかる．このうち，周辺に別の核種が少なく，エネルギーの高い ^{214}Po の α 線（7.69 MeV）をラドン濃度算出用の核種として利用することにした．なお，^{214}Po 由来の α 線の計測数をラドン濃度に変換する必要があるが，この部分は原著論文を参照していただきたい[8,9]．

5.2　空気層中のラドン濃度測定

スーパーカミオカンデ検出器では近隣で地震が起こった際に，水面が揺れることがある．このような場合，検出器は水面の振動との共振により壊れてしまうことが想定される．このような事態を防ぐため，超純水の水面と検出器上部の構造体との間に約 60 cm の空気層（Fig. 1 の Buffer gas layer）を設置している．この空気層には，常にラドンを極力除去した Buffer 用空気を送り込んでいる．ここで，Buffer 用空気は，まず神岡鉱山の入り口付近の外気を洞窟内の実験施設へ送り込み，次にいくつかのフィルターを用いて外気中の埃を取り除き，最後に冷却活性炭に通しラドンを取り除くことで製造されている．

この Buffer 用空気中にラドンが含まれると，接している超純水にラドンが溶け込む可能性がある．したがって，空気層に送られる Buffer 用空気中のラドン濃度測定を行った．この測定では，空気層に送り込む直前の Buffer 用空気（Input air）と，空気層からサンプリングされた空気（Output air）の 2 種類の空気をモニターすることで，Buffer 用空気がスーパーカミオカンデ検出器のラドン混入源であるかを評価した．これらの測定結果を Fig. 4 に示す．なお，Fig. 4 で示される測定期間では，何度かスーパーカミオカンデにトラブ

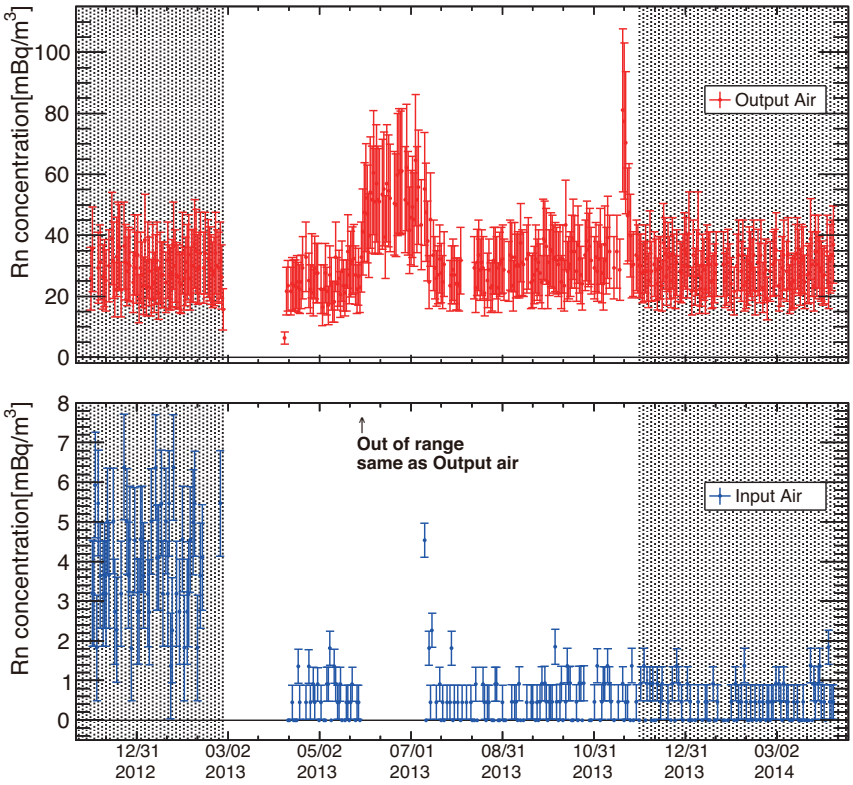


Figure 4.　Measurement result of the Rn concentrations (mBq/m^3) as a function of time.　The top (bottom) panel shows the result of Output (Input) air. Data during the period drawn in gray is used for Table 1.

Table 1. Summary of measurement results of the Rn concentration in Input/Output air for the buffer gas layer in Super-K before and after the improvement of activated charcoal Rn trap system on March 2013.

Period	Input air (mBq/m^3)	Output air (mBq/m^3)
Before improvement	3.5 ± 0.3	28.9 ± 1.7
After improvement	0.08 ± 0.07	28.8 ± 1.7

Table 2. Summary of the measurement results of Rn concentration in purified water in Super-Kamiokande.

Type	Result (mBq/m^3)
Supply water	1.62 ± 0.15
Center water	<0.14 (95 %C.L.)
Return water	9.06 ± 0.63

ル（台風による停電や操作ミス）が生じ，安定して測定データを取得できない時期があった．そのため，安定している期間（灰色の期間）に得られた数値を測定結果として採用した．

空気層中のラドン濃度測定は 2012 年 12 月に開始した．その後，2013 年 3 月に Buffer 用空気からさらにラドンを除去するために，冷却活性炭トラップの改修作業を行った．改修作業前後でのラドン濃度の変化を Table 1 に示す．冷却活性炭トラップの改修によって，Table 1 のように Input air のラドン濃度を低減することに成功した．一方で，改修作業の前後で Output air のラドン濃度に変化はなかった．したがって，空気層中のラドンは，送り込んでいる Buffer 用空気中のラドンを起源とせず，検出器内部の構造体にラドンの放出源があると結論される．

5.3 超純水中のラドン濃度測定

スーパーカミオカンデの超純水は各種フィルター，真空脱気，イオン交換樹脂，膜脱気装置，逆浸透膜などを通して不純物を取り除きながら製造される．限りなく不純物が取り除かれているため，超純水の化学的な抵抗値である 18.24 MΩ·cm をほぼ達成している[11]．

先述の高感度のラドン検出器は気体中のラドン濃度を測定するため，液体中のラドン濃度を直接測定することはできない．そのため，以下のような手法を組み合わせることで，超純水中のラドン濃度を測定することにした．

- 手順 1（脱気）: 超純水中に溶け込んだラドンを気液混合ミキサーを利用して脱気し，パージガスにラドンガスを取り出す．
- 手順 2（濃縮）: 取り出したラドンガスを冷却活性炭に付着させて濃縮する．
- 手順 3（回収）: 活性炭をヒーターで加熱することで濃縮したラドンを回収する．
- 手順 4（測定）: 回収したラドンをラドン検出器に封入し，ラドン濃度を測定する．

これらの手法を組み合わせた測定を行うために，Fig. 5 のような超純水中ラドン濃度測定セットアップを構築した．主要な構成要素は，パージガス用の純空気，脱気用の気液混合ミキサー，ラドン濃縮とラドン回収用の活性炭トラップ，およびラドン検出器である．

気液混合ミキサーは長さ約 720 mm，直径 41.6 mm の円筒形のステンレスであり，内部に超純水を霧状にする簡易的な羽が 4 × 12 個溶接してある．霧状の超純水はパージガスと混合され，超純水に溶け込んでいたラドンがパージガスへと移動する（手順 1）．その後，ラドンを含んだパージガスを活性炭に通すことでラドンの濃縮を行う（手順 2）．数時間（典型的に 3 時間，最長で 18 時間）の濃縮を行った後，活性炭を加熱してラドンを回収し，ラドン検出器に送り込む（手順 3）．最後に，ラドン検出器で 20 日程度の測定を行い，ラドンの崩壊曲線を得ることで，手順 3 直後のラドン濃度を計算する（手順 4）．最終的に超純水のラドン濃度は以下のように算出される;

$$C_{\text{手順 3 の直後}} \times \frac{V_{\text{検出器}}}{V_{\text{パージ}}} \times \frac{1}{\varepsilon_{\text{気液混合}}} \times \frac{1}{\varepsilon_{\text{濃縮}}\varepsilon_{\text{回収}}}, \qquad (1)$$

ここで $C_{\text{手順 3 の直後}}$, $V_{\text{検出器}}$, $V_{\text{パージ}}$, $\varepsilon_{\text{気液混合}}$, $\varepsilon_{\text{濃縮}}$, $\varepsilon_{\text{回収}}$ はそれぞれ，手順 3 直後のラドン濃度，ラドン検出器の体積，使用したパージガスの総量，気液混合ミキサーのラドン脱気効率，活性炭による濃縮効率，活性炭の回収効率である．

本研究では，表 2 に示すように 3 種類の超純水の測定を行った．具体的には，スーパーカミオカンデに送

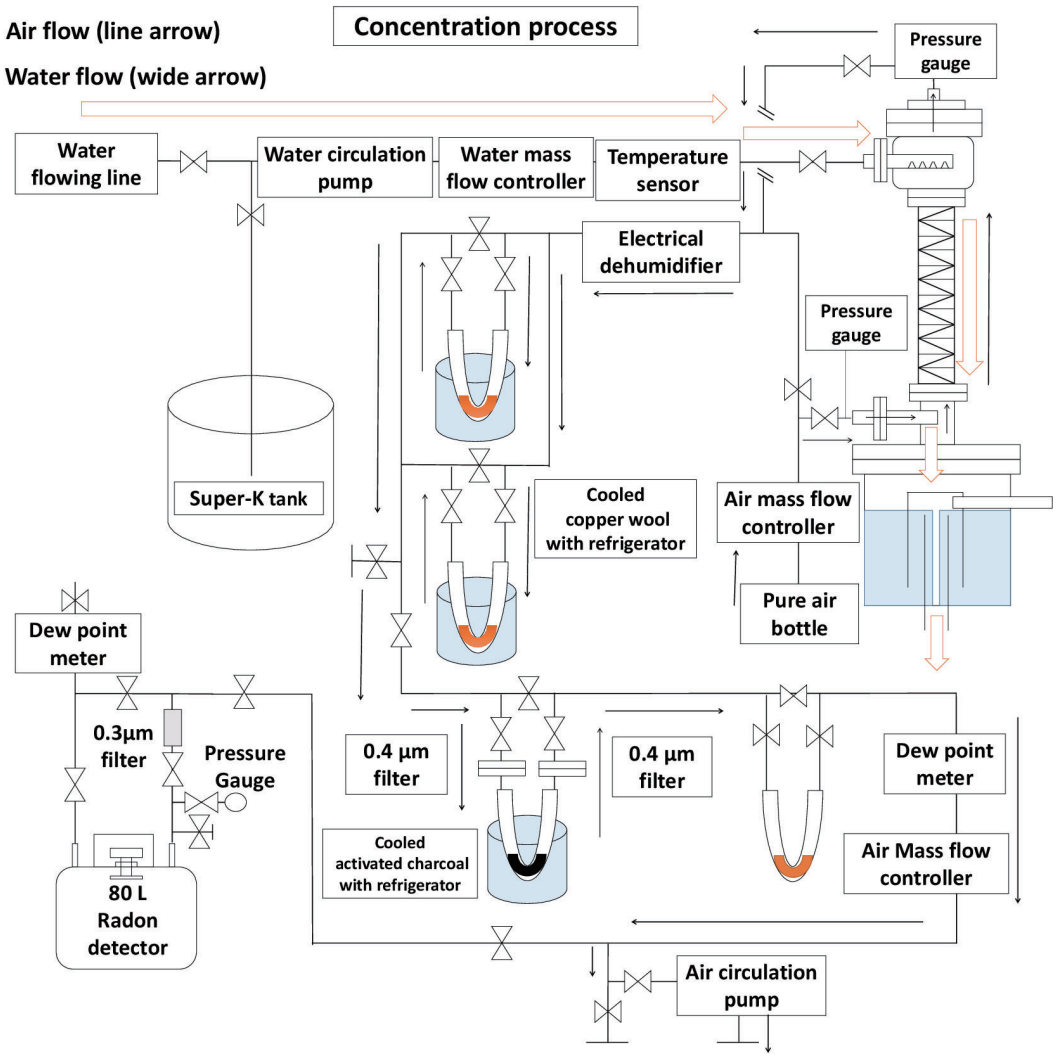


Figure 5. Schematic view of the Rn measurement system for Super-Kamiokande's purified water. The main components are the Rn extraction mixer (right top), cooled activated charcoal (middle) and the high sensitivity 80 L Rn detector (left bottom).

り込む超純水（送水，Supply water），内水槽の中心部からサンプリングした超純水（Center water），および水槽から回収される超純水（返水，Return water）の 3 種類のラドン濃度を測定した．

2014 年から 2015 年にかけて測定を行い，この時期のスーパーカミオカンデの送水は $(1.62\pm0.15)\,\mathrm{mBq/m^3}$ であることがわかった．また内水槽の中心のラドン濃度は $<0.14\,\mathrm{mBq/m^3}$ という上限値を得た．一方で，水槽から回収される返水中のラドン濃度は，送水よりも高いことがわかった．これらの結果は，ニュートリノ観測に利用される水槽中心領域は低ラドン濃度であるが，一方で水槽内にラドン放出源があることを意味している．これらの技術開発と測定結果の詳細に関しては pre-print が公開されているので，そちらを参照していただきたい[12]．

6 最後に

日本のスーパーカミオカンデ実験はニュートリノ観測において多大な貢献をし，現在も最前線で活躍している．太陽ニュートリノの物質効果探索のため，数 MeV 程度のエネルギー領域における背景事象の理解が必要である．特に，超純水中に溶け込んでいる放

射性ラドンガス由来の背景事象を評価するために，検出器周辺でのラドン濃度モニタリングに関する技術開発が進んでいる．

本記事では，スーパーカミオカンデ実験の概略と太陽ニュートリノに関して紹介した．その後，ラドンガスがスーパーカミオカンデ検出器に与える影響に関して議論を行った．そして，高感度のラドン検出器開発とその応用に関して紹介した．

今後，本研究で得られた超純水中のラドン濃度と，太陽ニュートリノ観測データにおける背景事象との相関を評価する必要がある．特に，ラドン子孫核種由来の背景事象に対して，スーパーカミオカンデ検出器がどのように応答するかを精密に評価する必要がある．

最後に，今回紹介したラドン検出器の他に，数 Bq/m^3 程度の環境ラドン濃度を測定するための小型で安価な 1 L ラドン検出器を開発も行われている[13]．この小型のラドン検出器は，研究者が作業を行うドーム周辺や洞窟内の空気のラドン濃度モニターに利用されている．興味のある方はそちらも参照していただきたい．

〈参 考 文 献〉

1) S. Fukuda, Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichikawa, M. Ishitsuka, Y. Itow, T. Kajita, J. Kameda, K. Kaneyuki, S. Kasuga et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 501 (2003) 418.
2) R. Davis Jr., D. S. Harmer, K. C. Hoffman, Phys. Rev. Lett., 20 (1968) 1205.
3) S. Fukuda, Y. Fukuda, M. Ishihara, Y. Itow, T. Kajita, J. Kameda, K. Kaneyuki, K. Kobayashi, Y. Koshio, M. Miura et al., Phys. Rev. Lett., 86 (2001) 5651.
4) Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen, J. D. Anglin, G. Bühler, J. C. Barton, E. W. Beier, M. Bercovitch, J. Bigu, S. Biller et al., Phys. Rev. Lett., 87 (2001) 071301.
5) Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen, J. D. Anglin, J. C. Barton, E. W. Beier, M. Bercovitch, J. Bigu, S. D. Biller, R. A. Black et al., Phys. Rev. Lett., 89 (2002) 011301.
6) S. Mikheyev, A. Smirnov, Sov. Jour. Nucl. Phys., 42 (1985) 913.
7) L. Wolfenstein, Phys. Rev. D. 17 (1987) 2369.
8) K. Hosokawa, A. Murata, Y. Nakano, Y. Onishi, H. Sekiya, Y. Takeuchi, S. Tasaka, Prog. Theor. Exp. Phys., (2015) 033H01.
9) Y. Nakano, H. Sekiya, S. Tasaka, Y. Takeuchi, R. A. Wendell, M. Matsubara, M. Nakahata, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 867 (2017) 108.
10) P. Kotrappa, S. K. Dua, P. C. Gupta, Y. S. Mayya, Health Phys., 41 (1981) 35.
11) Y. Takeuchi, K. Okumura, T. Kajita, S. Tasaka, M. Nemoto, Y. Fukuda, H. Okazawa,T. Hayakawa, K. Ishihara, H. Ishino et al., Phys. Lett. B, 452 (1999) 418.
12) Y. Nakano, T. Hokama, M. Matsubara, M. Nakahata, T. Nakamura, H. Sekiya, Y. Takeuchi, S. Tasaka, R. A. Wendell, arXiv:1910.03823.
13) G. Pronost, M. Ikeda, T. Nakamura, H. Sekiya, S. Tasaka, Prog. Theor. Exp. Phys., (2018) 093H01.

〈著 者 略 歴〉

中野 佑樹：平成 28 年東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 博士課程修了 博士（理学）．平成 28 年神戸大学 理学研究科 粒子物理学研究室 学術研究員，平成 29 年東京大学 宇宙線研究所 研究所研究員, 平成 31 年神戸大学 理学研究科 粒子物理学研究室 特命助教（現在に至る）．専門はニュートリノ天文学（太陽ニュートリノや Multi-Messenger ニュートリノ観測），極低放射線計測など．趣味は読書，スポーツ観戦，twitter など．

14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry 参加報告

1　はじめに

2019 年 5 月 25–30 日の会期で，Sióhok（洪（Hungary））にて開催された Tihany symposium に参加した．Tihany というのは，Balaton 湖に突き出した半島の事である．せっかくだから，Tihany まで行こうと思ったのに，あいにくの雨・・・．ついてない．ちなみに，会議の行われた Sióhok までは Hungary の首都である Budapest の市街地から 2 時間弱．会議の運営者らが用意して下さったバスで移動したが，電車での移動も可能．通貨は Forint．1 Forint が大体 0.4 円で日本よりも少し物価が低いような感じ．Sióhok でお土産を買う際は現金のみしか使えないが，レストランやホテル，Budapest の観光地では基本的にクレジットカードが使える．Visa か Master 推奨．ちなみに Budapest では豚肉を使った料理が有名．

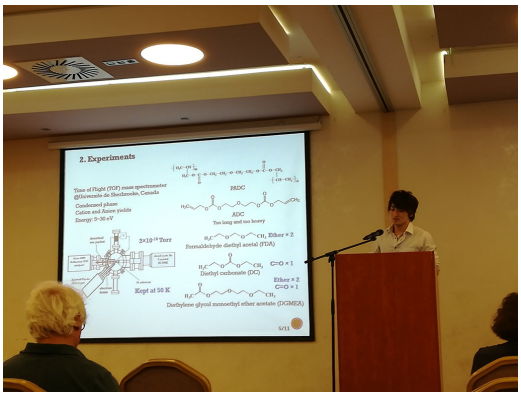
写真．ホテルから見た Balaton 湖．対岸には Tihany 半島が見える．

2　会議の様子

Tihany symposium とは，4 年に 1 度開催されている放射線化学の専門家らが一堂に会する国際学会である．14 回目となる今回の参加者は約 150 名で，口頭（招待講演含む），ポスター共に 62 件ずつの発表があり，活発な議論が行われた．日本人の参加者は 6 名で，量子科学技術研究開発機構から 3 名，大阪大学産業科学技術研究所から 1 名，大阪市立大学から 1 名，金沢大学から 1 名であった．会議は，Hotel Azúr で行われた．参加費には宿泊費と食事代が含まれている．著者は 1 日だけ Sióhok の街に出て，フランス人の共同研究者らと食事をした．夏休みの期間らしく，閑散としていたが，レストランで食べた物凄く塩味の濃いベーコンの味が忘れられない（決しておいしいわけではないのだが・・・）．ホテル内には，ジムやプールが併設されており，リフレッシュも可能．著者がジムでトレーニングしていると，プールに向かう参加者らと会うこともしばしば．加えて，Balaton 湖でのセーリングに参加することもできる（無料）．他の参加者らと共に，雄大な景色を見ながらシャンパンを楽しんだ（雨やったけど）．会議中のセッション以外の時間も，参加者が退屈することなく楽しめるように配慮をして下さった組織委員会の皆様に参加者の 1 人として感謝がつきません．

写真．晩餐会．フランス，メキシコの研究者らと．

Excursion はワイン蔵でテイスティングと馬のショーを見物．4 種類（Riesling, Rose, Red, and Muscadet）のワインを楽しむことができた．Hungary は，ワインが有名らしい．小学生が水のようにワインを飲んでいたのは衝撃的であった．Excursion の後は晩餐会．食後にはダンスパーティーが開催され，参加者らとの交流を深めることができた．著者に関していえば，知っている曲が少なく，一緒に楽しむのが難しい・・・．海外の参加者の持っているリズム感を非常に羨ましく感じる瞬間であった（ダンス習おうかな？）．



写真．講演の様子．若手セッションでの発表．

会議の講演に目を移すと，あらかじめ書類選考を通過した 4 名の若手研究者には International Irradiation Association（iia）award が贈られた．選考は事前に組織委員会に送った CV で行われた．賞を狙う皆さん，論文書きましょう！　選ばれた 4 名の中で最も優れた発表をした Matusiak さん（波（Poland））には賞状が授与された（おめでとう！）．通常セッションでは，放射線化学の基礎課程に関する発表から，植物の発育に与える放射線影響等，多岐にわたるテーマで講演があった．タンパク質の損傷収率を OH ラジカルの生成量と関連付けて議論していた IPHC の Raffy 博士（仏）の講演には特に刺激を受けた．筆者は Tihany Symposium に参加するのは初めてであったが，2018 年にモスクワ（露）で開催された Ionizing Radiation on Polymer（IRaP 2018）の参加者も多く出席しており，1 年ぶりに友人たちと再会する機会になった．彼（女）らとは，2020 年秋に奈良で開催される IRaP での再会を約束し，帰路についた．

3　おわりに

放射線化学の専門家が一堂に会する国際会議への出席は今回が初めてであった．筆者にとって，発表の内容は自身の見識を深める非常にいい機会になったとともに，発表後に頂いたコメントや議論を通じて，自身の研究の今後の課題や世界の中でも立ち位置を改めて確認することができた．別の知見から意見を聞くことで自分の研究を見直す機会にもなり，有意義な時間を過ごすことができた．4 年後の 15th Tihany Symposium への参加を検討されることを強くお勧めする．

(量子科学技術研究開発機構　　楠本 多聞)

Miller Conference 2019 参加報告

今回で第 31 回となる Miller Conference に参加した．日程は 2019 年 9 月 9 日から 9 月 13 日の 5 日間であった．会議は英国イングランド北部，カンブリア地方の街 Cockermouth 近くの Energus という会場で行われた．英国の原子力開発で大きな役割を果たした Sellafield まで 26 km という場所である．今回の Miller Conference は率直に述べて低調であった．今回の参加者は 69 名であり，筆者のメモによれば前回シチリア島での開催時の 142 名から半減である．しかも，アジア地域の大学・研究機関からの参加は，筆者所属の原子力機構と東京大学のみ，参加者は筆者を含めてたったの 3 名であった．

今回の Miller Conference のプログラムは，一般的な研究発表を行う 5 セッションに加えて，パネルディスカッションを含む Industrial Hot Topics セッションが導入された．研究発表のセッションタイトルはそれぞれ Fundamentals，Heterogeneous，Health，Energy，Materials であった．また Industrial Hot Topics セッションと同様に，新しい取り組みとして各セッションの前に 1 時間程度の Educational セッションが設けられ，各分野の基本的な知識に関する講義を聴くことができた．学生や若手研究者，異分野からの参加者を呼び込むための取り組みとして評価できるものと思われる．

ここから各セッションの内容について簡単に紹介する．Fundamentals セッションはパルスラジオリシス法による反応過程や中間状態に関する研究が半数，残りの半数は医療・生化学の基礎研究であった．Heterogeneous セッションは筆者を含めて 7 件の口頭発表，ほとんどは原子力を背景とする研究であり，水素発生や高分子材料の劣化，鉄鋼材料の腐食，溶媒抽出処理に

おける放射線効果に関するものがあった．Health セッションでは，放射線治療における増感剤として金属ナノ粒子を利用する研究についての発表が多かった．その他には，線量評価方法の開発や DNA 損傷に関する研究が報告された．

筆者の印象に残った発表は，パリ南大学 V. Shcherbakov, N. Chen, S. A. Denisov, M. Mostafavi による研究で，金属ナノ粒子には線量吸収を促進する効果はほとんどないことを，パルスラジオリシス法を用いて明確に示し，さらに増感作用は金属ナノ粒子がラジカル反応過程に関与するためという主張を展開したものである．吸収線量は放射線と電子・原子核との相互作用で決まり，その形態がナノ粒子になったところで教科書を書き直すようなことは起こらないのであり，この発表は説得力のある主張であった．

Energy セッションは様々な研究発表があった．Energy との関係を見つけることのできる発表が集められており，その内容は使用済燃料の再処理に関係するもの，直接処分に関係するもの，太陽光電池材料中の反応に関する基礎研究，水素発生用触媒の放射線を利用した調製等についての報告があった．Materials セッションは材料開発への放射線利用に関する研究と原子力材料についての研究との報告がほぼ半数ずつであった．材料開発関係は，従来から盛んに行われてきた高分子関係の報告が 1 件のみであり，他は電子デバイス材料への照射効果や触媒用金属ナノ粒子調製に関する報告であった．原子力材料に関しては MOX 燃料，セメント材料，アルミナ系廃棄物に関する研究が報告された．

これらの研究発表セッションとは少し趣向を変えた Industrial Hot Topics セッションは 11 日の午後に行われた．このセッションは 2 件の口頭発表からパネルディスカッションに続ける形式であった．2 件の口頭発表は英国 Sellafield 社と National Nuclear Laboratory 所属の参加者によるもので，原子力のバックエンドに関する発表，具体的には用途のなくなったプルトニウムの安定保管のための技術開発と，再処理もしくは地層処分を待っている使用済燃料の中間貯蔵のための技術開発であった．これに続けてパネルディスカッションを行い，“これから 5 年間で放射線化学は何をすべきか” をテーマに設定するという試みであった．

これらの口頭発表セッションに加えてポスター発表が 35 件あり，また Manchester 大学が 2005 年に Cumbria に設置した研究施設 Dalton Cumbria Facility（DCF）の見学が行われた．DCF は比較的小規模な施設であるが，ガンマセル 1 基と 5 MV および 2.5 MV ペレトロン型イオン加速器各 1 基を擁し，放射線研究および原子力施設の廃止措置に係る研究開発を行っている．

会議を終えての全体的な感想として，原子力の廃止措置・バックエンドに関係する研究の割合が高かったことが印象に残る．また，冒頭でも述べた通り，参加者数の減少，アジア地域の研究者の参加率の低さは顕著である．逆に，筆者が昨年参加した APSRC2018 には欧米からの参加者が極めて少なかった．本来研究者間のコミュニケーションを促進するためにある学会が，その数が多すぎるために，自然発生的な地域的ブロック化を引き起こしてしまっているように感じている．次回の Miller Conference は 2 年後，開催はフランス，コルシカ島予定とのことで期待できそうではあるが，この報告記事をお読みの方は是非，次回参加をご検討頂きたい．

(日本原子力研究開発機構　熊谷 友多)

16th International Congress of Radiation Research（ICRR2019）参加報告

令和元年 8 月 25 日–8 月 31 日の 5 日間，イギリス・マンチェスターにあるマンチェスター中央会議場にて 16th International Congress of Radiation Research（ICRR2019）が開催された．放射線の生体影響ならびに細胞応答の評価，モデリングに関する基礎研究をメインに発表が行われ，二次がんリスク，放射線治療時の増感剤や新規放射線治療法等のその他，多くのサブテーマがパラレルに進められた．放射線化学に関するセッションは 8 月 28 日の Parallel session 7: Radiation chemistry and oxidative damage にて行われた．内容は

生体分子の酸化還元ならびに修復プロセスに関する話が主であった．2011 年のポーランド，2015 年の京都で開催されたこれまでの ICRR では原子力工学関連するセッションがあったが，今回はセッション自体がなく，同時期にイギリスで開かれる Miller Conference 2019 に集中したものと考えられる．

写真 1.　会議が行われたマンチェスター中央会議場．

さて，筆者は “Nanoclay gel-based radio-fluorogenic gel dosimeters using Dihydrorhodamine 123” のタイトルでポスター発表を行った．ポスター発表は全体で 410 件あり，そのうち 118 件が日本からの発表であった．多くの日本人が参加しており，イオンビームの放射線の生体影響に関する最近展開について話を伺うことができ，大変有意義な会となった．ポスター発表の様子を写真 2 に示す．お時間をとって丁寧に説明していただいた先生方に大変感謝申し上げる．

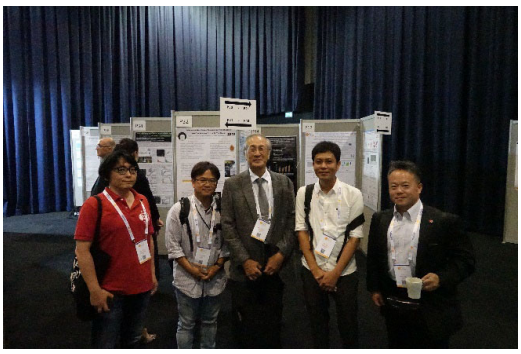


写真 2.　ポスター発表の様子．

その他の印象に残っている研究をいくつか挙げると，DNA 損傷を標的とし，細胞生存率をモデル化する標的理論に対して，DNA 以外，たとえばミトコンドリア等を標的とした場合のモデル化やそれを実験的に検証可能な，つまり単一の細胞内に照射線量のコントラストをつくる研究が進められており，今後の研究展開が楽しみであった．また，GSI の PIDE プロジェクトがポスター発表で紹介されており，文献でこれまで発表された 1000 以上の in vitro 細胞生存実験結果がデータベースとして取得可能になっていることを知った．今後の重粒子線治療のモデル化に有用であると考えられる．その他，放射線化学をベースとした線量計が活躍しそうな領域としてアダプティブ放射線治療や MR-guided radiotherapy に関する発表や Synchrotron Microbeam Radiation Therapy に関する口頭発表があり，大変興味深かった．最後に，会期中毎日食べる予定であったフィッシュアンドチップスの写真（写真 3）を載せる．筆者と近くにいたメンバーは雨で気温が急激に下がったためか，途中から体調を崩してしまい，初めてのイギリスでの体調管理の難しさを感じた．尚，次回の ICRR は 2023 年 9 月 頃にカナダのモントリオールにて開催予定である．

写真 3.　フィッシュアンドチップス．

(北里大学　　前山 拓哉)

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会 参加報告

第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会は，2019 年 7 月 3 日から 5 日までの 3 日間，東京大学弥生講堂，弥生講堂アネックス，農学部フードサイエンス棟，東京大学農学部 2 号館にて開催され，パラレルセッションで進行された．

さて，筆者は初日の「放射線効果」のセッションおよび特別講演の「たんぽぽ計画の現状と将来」に参加したので報告する．

今回の研究発表会では，大分して 15 セッションから構成されており，154 件の一般口頭発表と 30 件のポスター発表が行われ，そのうち「放射線効果」のセッションでは，17 件の口頭発表が行われた．

午前中のセッションでは，放射線グラフト重合法を利用した材料開発，放射線の DNA 損傷に関する基礎研究等，7 件の講演があった．堀内氏（早稲田大）の電子線グラフト重合法による温度応答性細胞培養膜の作製についての講演では，Si モールドを利用した熱ナノインプリント法により温度応答性細胞培養膜に微細構造を作製できるだけでなく，パターン化したグラフト重合膜は温度応答性が保持されていることが報告された．永井氏（東大）の防護フリーな条件下での放射線の直接作用による DNA 損傷についての講演では，さまざまな線質を用いて，アガロースゲル電気泳動法により一本鎖切断および二本鎖切断の収率を明らかにし，防護剤フリーでは二本鎖切断が高効率で生じている可能性を示唆する結果を報告した．大和氏（大阪府大）は高線量ガンマ線場における照射効果のリアルタイム計測の講演では，液体シンチレーターから高強度な発光が観察され，分光測定が可能であるという報告がされたが，照射によるガラスレンズやアクリル製光ファイバーからの発光の影響があることが明らかになり，今後の発光の影響を除去できる材料の選択が望まれる．中村氏（早稲田大）の電子線グラフと重合法による直接メタノール型燃料電池用有機/無機ハイブリッド電解質膜の開発についての講演では，温度条件，溶液組成によってシリカの分布が変化し，発電性能に影響を与えるという報告がなされた．大塚氏，村上氏（ともに早稲田大）の電子ビームを用いた応用研究についての講演では，RF-Detector を用いて電子ビームの時間分解移送空間分布を計測し，初期ビームの傾きによるエミッタンスの増大の機構の解明，および空間変調電子ビームを用いた傾き角付与によるコヒーレント放射に成功し，空間変調電子ビームによる準単色化の効果が得られたという報告があった．菅氏（阪大産研）のコヒーレント遷移放射による発生したテラヘルツ電場の解析の講演では，構築した測定光学系にフェムト秒レーザーを入射させることで時間分解計測が可能になり，さらに得られたデータをモンテカルロ計算によってコヒーレント遷移放射の電場の向きや光電動アンテナの検出範囲などを考慮した結果が報告された．午前中のセッションのどの講演も活発な議論がなされた．

午後は一条ホールで特別講演として宇宙航空研究開発機構，東京薬科大学の山岸氏が「たんぽぽ計画の現状と将来」についてご講演された．たんぽぽ計画の目標とテーマが壮大であり，国際宇宙ステーションでの宇宙塵中有機物と微生物の補修と曝露実験に感銘を受けた．放射線や乾燥耐性がある Deinococcus radiodurannsやその属の新種の菌を選択し，宇宙空間で曝露を行った結果，Deinococcus radiodurannsは 1 年間の宇宙環境曝露後も生存できることや開発した超低密度のエアロゲルを用いて，宇宙空間で高速で衝突する微粒子の捕集実験を行ったという報告があった．たんぽぽ計画の今後の展望を垣間見ることができる貴重なお話であった．

午後の「放射線効果」のセッションでは，今回新しい試みとして量子科学研究開発機構（QST）のアクティビティを紹介するセッション（4 件の講演）から始まり，QST の研究について前川氏（QST）が高崎研における量子材料・物質科学研究について説明し，筆者も今回の発表会で QST における EUV 超微細加工研究の現在のアクティビティについて口頭発表した．とりわけ，QST（関西研）の短パルスの XRL（波長：13.9 nm）を用いて実施している次世代 EUV リソグラフィの照射効果の実験について詳細に報告した．この発表会に初めての参加だったため緊張したが，質疑を通じて今後の研究の展開への糸口を得ることができ，大変有意義な経験をした．澤田氏（QST）の機械学習による放射線グラフと電解質膜のプロトン導電率予測についての講演では，基材高分子の物性データを取り入れることで予測精度が顕著に向上することが報告された．田口（QST）の量子ビーム架橋技術の先端医療用デバイ

スへの新展開についての講演では，ゲル状では 3 次元的に増殖する様子をはじめ，既存のディッシュでは得られない多様な機能を発現した細胞に成功したという報告があった．国内の研究機関のアクティビティを紹介することは学生さんにとって非常に良い機会になるので，来年以降もこのような新しい試みが行われることが期待される．

その後，引き続き，「放射線効果」のセッションが 2 つ続き，電子線によるベータ崩壊各種の短寿命化，パルスラジオリシス法による放射線化学反応の初期過程やナノ粒子形成過程に関する基礎研究，ヒアルロン酸ナノリウムの分子サイズ及び粘性における電子線照射効果，高純度 DNA 資料への X 線照射効果等，6 件の講演があった．室屋氏（阪大産研）の量子ビーム照射による有機物フリーな白金水溶液中におけるナノ粒子形成過程研究では，NaOH では照射によって懸濁粒子から生じる長寿命ラジカルペアが pH を変えても長寿命のままであるが，NH_4OH の場合は高 pH ほどナノ粒子の前駆体として振る舞い，アンモニア添加すると混濁粒子の配位子が変化することを見出したという報告があった．神戸氏（阪大産研）の四塩化炭素の放射線誘起反応初期過程の解明では，CCl_4 の 340 nm の過渡種は Cl ラジカル性であり，水素引き抜き反応によるものであるが，480 nm のものは水素引き抜き反応以外であるという報告があった．山下氏（東大）のナノ複合体ゲル線量系で利用されるラポナイトと水分解ラジカルとの反応についての講演では，ラポナイトの水和電子や OH ラジカルとの反応性について明らかになったと報告された．今後，ナノ複合体ゲル線量計で線質効果がなくなる原因を解明されていくと期待される．

最後に，この研究会で新しい知見を広げることができました．このような実りのある研究会の開催を運営していただいた皆様に深く感謝するとともに，「放射線効果」のセッションが今後益々発展することを願っています．

(量子科学技術研究開発機構　山本 洋揮)

2019 年放射線化学若手の会「夏の学校」報告

2019 年度の放射線化学若手の会「夏の学校」を令和元年 9 月 26 日–27 日に福井県敦賀市および美浜町で開催した．幹事校を代表して報告する．

この会は，放射線化学を学ぶ若手研究者や学生が研究活動をより良いものにすべく学びあう会である．会は毎年開催されており，今年は 7 大学から 24 名が参加した（表 1，写真 1）．

表 1.　各大学の参加者.

所属機関	人数 / 名	備考
福井大学	9	
福井工業大学	3	2018 年幹事校
大阪大学	1	2016 年幹事校
東京大学	3	
早稲田大学	6	2017 年幹事校
広島大学	1	
群馬大学	1	

今年の若手の会のスケジュールを表 2 に示す．初日の午前に研究室紹介を行い，参加者全員が研究テーマを説明した．午後は医療器具の滅菌などを業務としている関西電子ビーム株式会社の施設見学に訪れ，放射線化学の産業利用」について講演を聴講し，放射線の利用について学んだ．ポスター発表では，線量計や顕微鏡の開発，生体への放射線影響，燃料電池等多岐にわたった発表があり，活発な議論が行われた．

表 2.　スケジュール.

日程	時間帯	内容
26 日	午前	研究室紹介
	午後	見学・講演 （関西電子ビーム株式会社） ポスター発表 懇親会
27 日	午前	テーマディスカッション

最終日は，「若手研究者の理想像」についてグループに分かれて討論し，それぞれの参加者が抱く理想の研

究者像を議論して共有した．これらの経験は今後の研究活動に活かされると考える．夕食とその後の懇親会では，美浜町の地酒「早瀬浦」や地元の魚料理を堪能し，参加者一同，福井の食文化も体験できた．民間企業の見学やテーマディスカッション等，これまでになかった様な試みがあり，例年参加している若手研究者からも「例年とは異なる面で学びになった」との意見があった．この度の若手の会に参加し，全国からの参加者と交流することができた．この縁を大切にし，今後の若手の会が盛況となり，また今後の自身の研究活動の支えとなるようさらに関係を深めていきたい．最後に，企業見学と講演をご快諾下さった関西ビーム株式会社の皆様に感謝の意を表する．

写真 1.　会場玄関前での集合写真.

(福井大学　　河井 宏斗)

The 19th International Conference on Solid State Dosimetry（SSD19）参加報告

2019 年 9 月 15 日から 20 日にかけて，The 19th International Conference on Solid State Dosimetry（SSD19）が広島国際会議場にて開催された．（https://ssd19.org/）

本会議は 1965 年に米国で第 1 回会議が開催されて以来，3 年に一度の開催を経て 50 年以上にわたる長い歴史をもつ．特に今回はアジアでの初開催であった．また，本会議の前（9 月 11 日から 9 月 14 日）には，線量計の原理や線量計測手法の基礎から最新の知識・技術を総合的に学ぶことができる Marko Moscovitch school（夏の学校）もあわせて開催された．

日頃「ゲル線量計」を手がける筆者もこれまで本会議に興味はあったものの，半導体やシンチレータなどの固体（固い）検出器がメインの国際会議のような印象を持っていたので参加したことはなかった．しかし伝統ある本会議がせっかく地元広島で開催されるということと，大会長の保田浩志先生（広島大学原爆放射線医科学研究所教授）に「ぜひゲル線量計も」とお声がけいただいたこともあり，3D ゲル線量計研究会の仲間たちにも声をかけて参加させていただいた．発表演題も，放射線検出器開発・評価から放射線・線量計測，被ばく影響，生物学，医工学応用など，かなり広い範囲にわたる分野を包括しており，放射線化学的にも楽しんで参加することができた．

写真 1.　ガラ・ディナーでの Young Scientist Award 表彰の様子.

参加者は 333 名（うち日本から約 100 名）で，招待講演を含む口頭発表は 69 件，ポスター発表 268 件の盛会で，多すぎず，少なすぎず，ポスターも会期中でゆっくり全て見て回れる規模であった．そのためか，ポスター会場でのディスカッションも連日かなり賑やかになされていたように見受けられた．筆者が驚いたのは参加国数（38 カ国）の多さで，本会議の歴史と広がりを垣間見た気がした．（ちなみに，参加国は以下の通り．アメリカ，カナダ，メキシコ，ブラジル，ベネズエラ（！），イギリス，フランス，ドイツ，イタリア，

オランダ，ベルギー，ポーランド，クロアチア，チェコ，オーストリア，スイス，スペイン，ギリシャ，フィンランド，スエーデン，デンマーク，ラトビア，ルーマニア，ロシア，日本，韓国，台湾，中国，フィリピン，マレーシア，インド，カザフスタン，オーストラリア，ニュージーランド，イスラエル，クウェート，トルコ，南アフリカ）

期間中，台風シーズンにしては幸運にも連日，真夏を思わせる快晴が続き，まさに残暑ではあったが宮島観光などのエクスカーションは楽しめたのではないかと思う．

当初の予想に反して（？），「ゲル線量計」に関する我々のポスターセッションも国内外問わず多くの参加者から興味を持っていただき，質問やコメントをたくさん頂くことができて非常に有意義な会議であった．

ちなみに次回は 2022 年，イタリアのピサで開催される予定である．

(広島国際大学　林 慎一郎)

第 62 回放射線化学討論会参加報告（1 日目）

第 62 回目となる放射線化学討論会は，福井県敦賀市で令和元年 9 月 23 日（火）から 25 日（水）までの日程で開催された．会場は JR 敦賀駅から徒歩 3 分とアクセスのよい福井大学付属原子力工学研究所であった．初日は 13 時にホストである泉佳伸先生（福井大）から開会挨拶があり，その後，2 つのセッションで 8 件の口頭発表があった後，1 件の招待講演があり，最後にはポスターセッションも行われた．

最初のセッションでは，望月杏莉氏（北里大）による「界面活性剤の添加が蛍光ゲル線量計に与える増感効果」，青木祐太郎氏（福井工大）による「PVA-KI ゲル線量計の開発成果」，池田時浩氏（理研仁科センター）による「フタ付きガラスキャピラリーで生成したイオンマイクロビームのレイヤー挿入による halo 成分抑制効果」，前山拓哉氏（北里大）による「NC-FG（ナノクレイフリッケゲル）線量計へのラジカル捕捉剤添加が感度特性の LET 依存性に与える影響」についての報告があった．2 つ目のセッションでは，山本洋揮氏（量研高崎研）による「ノーリア誘導体に基づいた分子レジスト材料の電離放射線に対する応答性」，保坂勇志氏（量研高崎研）による「単パルス極端紫外線のレジストへの照射が現像感度と化学構造に与える効果」，吉村公男氏（量研高崎研）による「放射線グラフト型アニオン伝導膜のイミダゾリウム基構造の変化が与えるイオンチャンネル構造変化」，櫻井庸明氏（京大院工）による「低分子化合物の粒子線誘発固相重合によって形成した有機ナノワイヤの照射，昇華による配向制御」についての報告があった．その後の招待講演では，鈴木隆之氏（原子力機構）から「原子力機構での敦賀での活動について」と題し，新型転換炉原子炉ふげん，高速増殖原型炉もんじゅの廃止措置の現状，敦賀地区での研究開発，人材育成，地域産業支援の内容，実施状況などについてお話しいただき，大変有意義な講演，議論がなされていた．その後，この日最後のセッションとしてポスターセッションが行われた．約 1 時間にわたり様々な研究成果が発表され，どの発表においても積極的な質疑応答が行われていた．

筆者は今年 4 月から放射線化学分野の研究を開始した身であり，初めての討論会参加であることも相まって正直不安を感じていた．しかし，実際参加してみると，発表，質疑応答では和気あいあいとしながらも熱心かつ有意義な議論がなされていた．今年度は筆者自身の研究成果はないため聴講のみにとどまったが，来年度は自身の研究成果と共に参加したいと思わせるような素晴らしい討論会であったと思う．最後に，このような機会を設けてくださった組織委員，実行委員の皆さま方，有意義な発表，議論を行ってくださった多くの先生方，学生方に深く感謝したい．

(東京大学　近藤 勇佑)

第 62 回放射線化学討論会参加報告（2 日目）

放射線化学討論会 2 日目は，午前 9 時 15 分から午後 16 時 50 分まで開催され，3 件の口頭発表，2 件の招待講演，9 件のポスター発表，および特別企画セッション「放射線化学の現状」が行われた．

口頭発表では，まず豊田中研の細川氏に，ラジカル源となる有機物存在下において，水中で高線量率電子線を用いた CO_2 変換反応を検討した研究について講演していただいた．続いて，北大の市川氏に 2 件の発表をしていただいた．1 件目は，非晶質アルミノシリケート多孔体であるジオポリマーは Cs イオンを強く吸着するという特性を用いて，海水へのセシウム漏出を抑制する手法を検討した講演であった．2 件目は，有機高分子を造粒剤とするフェロシアン化銅を吸着材に用いたイオンクロマトグラフィーにより，^{137}Cs 濃縮飛灰の洗浄液から効率よく Cs を除去する手法についての講演であった．

その後，招待講演のセッションでは，株式会社サンルックスの長谷氏に，放射線照射によるレンズ着色技術の開発から学校教材として利用するための樹脂や標本セットまで，サンルックスと放射線の関わりについて幅広く講演していただいた．ポスター発表と昼食を挟み，2 件目の招待講演では，若狭湾エネルギー研究センターの岩瀬氏に，同センターで所有している 3 種類の加速器の詳細，および粒子線医療，イオンビーム育種，イオンビームによる材料分析・材料改質，高エネルギー放射場で使用される材料の放射線耐性評価など，加速器を用いた様々な研究について講演していただいた．

午後に開催された特別企画セッション「放射線化学の現状」では，6 名の方に，放射線化学のこれまでの歴史と放射線化学を用いた最先端の研究について講演していただいた．最初に，早稲田大学の鷲尾氏から，1950 年代に滅菌技術として始まった放射線化学が，架橋技術や重合技術といった様々な技術に応用されてきたという歴史について，ならびに，放射線化学を元に実用化されている現代の技術について講演していただいた．次に，阪大産研の吉田氏から，パルスラジオリシスの基本的な原理と次世代のアト秒パルスラジオリシスの開発について講演していただいた．続いて，原子力機構の平出氏に，陽電子・ポジトロニウム化学と放射線化学とのかかわりについて講演していただいた．その後，量研機構の前川氏に，放射線源である軟 X 線（EUV）の発生・制御技術やその材料への放射線物理・放射線化学を含む照射効果などの基礎基盤研究に基づいたレジスト材料評価・創製技術について，量研における取り組みを紹介していただいた．また，東北大学の越水氏には，シンチレータにおける電子励起状態の学理の確立に向け，特に励起エネルギー移動や消光過程を対象とし，パルスラジオリシス法による電離励起状態ダイナミクスの解析について講演していただいた．最後に，都産技研の中川氏に，水溶液およびメタノール系とゲル線量計の LET 効果について紹介していただいた．

筆者は，放射線測定材料，特にプラスチックを母材とした線量計について研究しているため，サンルックスの長谷氏の講演を特に興味深く拝聴した．電子線や γ 線を照射することにより，緑色や茶色，黄色など，鮮明な色調を呈するレンズを開発し，実用化していることが非常に興味深く，筆者の研究している新規ラジオクロミック材料への応用の可能性を感じた．

本討論会において，筆者は 1 日目のポスターセッションにて発表させていただいた．その際，様々な分野の先生や学生の方々から多くのご意見・ご指摘をいただき，今後の研究方針がより明確なものとなった．このような機会を与えてくださった多くの方々に深く感謝し，結びとする．

(東北大学　河村 一朗)

第 62 回放射線化学討論会参加報告（3 日目）

討論会 3 日目は，午前 9 時から 12 時まで開催され，計 10 件の口頭発表が行われた．まず宇宙航空研究開発機構の後藤氏から，原子状酸素（AO）による高分子材料表面への微視的構造の形成についての報告があった．AO による高分子材料表面上の突起構造の形成が，高分子材料の化学構造に依存することが見出された．次いで群馬大院の山路氏より，放射線化学的手法によるジアリルエテン（DAE）の光学的性質の研究についての報告があった．放射線化学的手法を用いることで，ベンゼン中の DAE の三重項での閉環反応が示された．その後，東大院工の Hanqin WENG 氏により窒化ホウ素ナノシート（BNNSs）の放射線誘起ヒドロキシル化についての報告があった．γ 線による放射線誘起化学反応を用いることで BNNSs の効率的なヒドロキシル化に成功し，ヒドロキシル化された BNNSs はプロパンの酸化的脱水素化反応における触媒として，高い活性と選択制を示すことが報告された．そして，原子力機構の平出氏により水中における $^{\bullet}$OH と *ortho*-Positronium（*o*-Ps）の反応におけるスピン相関の効果および室温イオン液体中の *o*-Ps 寿命の温度依存性に関する計 2 件の報告があった．前者では，比較的大きな水クラスターが存在することで，$^{\bullet}$OH の長距離拡散が抑制される可能性が示された．また，後者では，新たな Ps バブルの存在状態が明らかとなった．後半セッションの始めには，京大院理の西谷氏により溶媒和電子の束縛エネルギーと非断熱遷移の研究について報告があった．垂直電子束縛エネルギーは 3.76 eV と決定され，電子緩和が超高速非断熱遷移により極短時間に起こっていることを明らかにした．続いて，量研の楠本氏により，高分子系固体飛跡検出器として知られている CR-39 中のカーボネートエステル基の低エネルギー電子による損傷メカニズムについての報告があった．アセトアルデヒドおよび酢酸に低エネルギー電子の照射実験を行った結果，カルボニル基を含む官能基の分解は多段階におよんでいることが示唆された．その後，福井大工の松尾氏により，蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた，放射線による生体分子の損傷量評価について報告があった．蛍光修飾されたオリゴヌクレオチドを用いることで，50 mGy 以下の γ 線については，照射による生体分子の切断量について蛍光を介して評価できることが示唆された．続いて，大阪大 RIRC の清水氏により，リアルタイム PCR を用いた，放射線による DNA 損傷の評価について報告があった．DNA 鎖切断を指標とするリアルタイム PCR を用いた手法により，LET が異なる放射線による影響の評価が可能であることが示された．最後に，東大院工の于氏により X 線照射で誘発される DNA 安定変異収率への抗酸化剤添加の影響について報告があった．代表的な抗酸化剤であるアスコルビン酸を添加することで，プラスミド DNA の一本鎖切断および二本鎖切断が半分程度に抑制された．

筆者は，本討論会にてフォトクロミック分子の線量計への応用可能性を調査した内容でポスター発表を行った．それゆえ，山路氏の発表において，放射線分解により生成するベンゼンの三重項からのエネルギー移動により，溶質である DAE の三重項が生成され，これまでほとんど報告されていなかった DAE の三重項での閉環反応が確認されたという話が非常に興味深かった．この話から，筆者が用いているフォトクロミック分子も，溶媒を変えることによって，異なる反応経路を経た反応を生じるのではないかと考えた．

上述の内容に加えて，筆者は銀添加リン酸塩ガラスの放射線照射による発光中心形成機構についてのポスター発表も行った．有機化合物から無機材料といった幅広い材料系で，異なった内容を発表させていただくことで，放射線化学に携わる多くの先生方，学生の方々と討論することができ，非常に有意義な会であったと感じる．このような機会を与えてくださった多くの方々に深く感謝したい．

(東北大学大学院工学研究科　川本 弘樹)

第 62 回放射線化学討論会プログラム

【日 程】2019 年 9 月 23 日（月）–25 日（水）
【場 所】福井大学附属国際原子力工学研究所（敦賀キャンパス）
【会 場】第 1 講義室，多目的会議室
【主 催】日本放射線化学会
【協 賛】福井大学附属国際原子力工学研究所
【テーマ】放射線化学の基礎，応用及び関連分野の研究発表を行う．関連分野には，放射光化学，レーザー化学，プラズマ科学，原子分子衝突，加速器科学，陽電子科学などの学際領域に加えて，ナノテクノロジー，高分子科学，分子科学，デバイス物理などと放射線化学との境界領域を含む．
【事務局】福井大学附属国際原子力工学研究所（泉研究室内）
〒914–0055 福井県敦賀市鉄輪町 1–3–33
jsrc2019fukui@gmail.com
https://radiation-chemistry.org/amrc/62amrc/
【講演時間】（質疑応答 5 分含）
一般講演（21 件）：15 分
依頼講演（6 件）：30 分（特別企画セッション）
招待講演（3 件）：35 分
【ポスター】1 日目（9 月 23 日（月））16:20–17:20（10 件）
2 日目（9 月 24 日（火））11:55–11:25（9 件）

9 月 23 日（月） [1 日目]

＜開会挨拶＞ (13:15–13:25)

＜口頭発表 **1** ＞ (13:25–14:25)
座長：室屋 裕佐（阪大産研）

1–O–01 ジヒドロローダミン 6G と 123 蛍光ゲル線量計の増感剤・界面活性剤の影響
○望月 杏莉 [1]，前山 拓哉 [1]，渡邉 祐介 [1]，水上 慎也 [1]（1：北里大）

1–O–02 PVA-KI ゲル線量計を用いた線量評価技術開発
○青木 祐太郎 [1]，Glenn HARVEL[2]，柴岡 龍 [1]，速水 醇一 [3]，田口 光正 [4]，長澤 尚胤 [4]，畑下 昌範 [5]，久米 恭 [5]，佐倉 俊治 [6]，砂川 武義 [1]（1：福井工大，2：UOIT，3：京大名誉教授，4：QST 高崎研，5：若狭湾エネ研，6：ニュークリアテクノロジー）

1–O–03 フタ付ガラスキャピラリーで生成された MeV イオンマイクロビームの CR-39 によるスポット構造評価性
○池田 時浩 [1,2]，引間 宥花 [1]，森 光正 [1]，河村 俊哉 [1]，金 衛国 [1]（1：理研仁科センター，2：東邦大物理）

1–O–04 NC-FG 線量計へのラジカル捕捉剤の添加効果
○前山 拓哉 [1,2]，望月 杏莉 [1,2]，福西 暢尚 [2]，石川 顕一 [2,3]，福田 一茂 [4]（1：北里大理，2：理研，3：東大院工，4：放医研）

＜休憩＞ (14:35–15:45)

＜口頭発表 **2** ＞ (15:15–16:00)
座長：熊谷 純（名大未来研）

1–O–05 ノーリア誘導体に基づいた分子レジスト材料の電離放射線に対する応答性の系統的な研究
○山本 洋揮 [1]，工藤 宏人 [2]，古澤 孝弘 [3]（1：量研高崎，2：関西大学，3：阪大産研）

1–O–06 短パルス極端紫外線のレジストへの照射効果の検証
○保坂 勇志 [1]，大山 智子 [1]，山本 洋揮 [1]，石野 雅彦 [2]，ヂンタンフン [2]，錦野 将元 [2]，前川 康成 [1]（1：量研高崎研，2：量研関西研）

1–O–07 イミダゾリウム基を有する放射線グラフト型アニオン伝導膜の電解質膜特性と階層構造の関係
○吉村 公男 [1]，Hwan-Chul Yu[1]，Yue Zhao[1]，廣木 章博 [1]，猪谷 秀幸 [2]，岸山 佳央 [2]，山口 進 [2]，田中 裕久 [3]，前川 康成 [1]（1：量研，2：ダイハツ工業，3：関西学院大理工）

1–O–08 低分子化合物の粒子線誘発固相重合による有機ナノワイヤの形成とその配向制御
○櫻井 庸明 [1]，坂口 周悟 [1]，香山 一登 [1]，神谷 昂志 [1]，堀尾 明史 [2]，竹下 友輝 [2]，出崎 亮 [3]，越川 博 [3]，杉本 雅樹 [3]，八巻 徹也 [3]，関 修平 [1]（1：京大院工，2：阪大院工，3：量研機構高崎）

＜休憩＞ (15:35–15:45)

＜招待講演 **1** ＞ (15:45–16:20)
座長：砂川 武義（福井工大）

1–I–01 原子力機構の敦賀での活動について
○鈴木 隆之（日本原子力研究開発機構）

＜ポスター発表 **1** ＞ (16:20–17:20)

＜理事会＞ (17:30–)

9 月 **24** 日（火） **[2** 日目**]**

＜口頭発表 **3** ＞ (9:15–10:00)
座長：平出 哲也（原子力機構/茨城大理工）

2–O–09 高線量率電子線照射による CO_2 変換
○細川 洋一 [1]，梶谷 修司 [1]，大嶋 文子 [1]，石田 亘広 [1]，鷲尾 方一 [2]，臼杵 有光 [1,3]（1：豊田中研，2：早大理工総研，3：京大生存圏研）

2–O–10 放射性セシウム含有ジオポリマーから海水へのセシウム漏出抑制機構
○市川 恒樹 [1,2]，山田 一夫 [2]，芳賀 和子 [3]（1：北大，2：国立環境研究所，3：太平洋コンサルタント）

2–O–11 高分子で造粒したフェロシアン化銅を使ったイオンクロマトグラフィーによる ^{137}Cs 濃縮飛灰からの Cs 除去
○市川 恒樹 [1,2]，山田 一夫 [2]，岩井 良太 [3]，金澤 幸広 [3]（1：北大，2：国立環境研究所，3：関東化学）

＜休憩＞ (10:00–10:10)

＜招待講演 **2** ＞ (10:10–10:45)
座長：泉 佳伸（福井大）

2–I–02 放射線とサンルックス，そして放射線教育の教材開発へ
○長谷 仁（サンルックス）

＜休憩＞ (10:45–10:55)

＜ポスター発表 **2** ＞ (10:55–11:55)

＜昼食＞ (11:55–12:55)

＜招待講演 **3** ＞ (12:55–13:30)
座長：前川 康成（量研機構）

2–I–03 若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオンビームを用いた研究・開発
○岩瀬 彰宏（若狭湾エネ研）

＜休憩＞ (13:30–13:40)

＜特別企画セッション，パート **1** ＞
「放射線化学の現状」 (13:40–15:10)
座長：泉 佳伸（福井大）

2–K–01 放射線プロセス –歴史と現在，将来展望–
○鷲尾 方一（早大理工院）

2–K–02 パルスラジオリシス
○吉田 陽一（阪大産研）

2–K–03 陽電子・ポジトロニウム化学と放射線化学
○平出 哲也 [1,2]（1：原子力機構，2：茨城大理工）

＜休憩＞ (15:10–15:20)

＜特別企画セッション，パート **2** ＞
「放射線化学の現状」 (15:20–16:50)
座長：松尾 陽一郎（福井大）

2–K–04 EUV リソグラフィ –放射線化学からのアプローチ–
○前川 康成，山本 洋輝（量子機構高崎）

2–K–05 シンチレータへのパルスラジオリシスの適用
○越水 正典（東北大）

2–K–06 イオンビーム照射効果 –HIMAC を利用した溶液系およびゲル線量計の LET 効果–
○中川清子（都産技研）

＜休憩＞ (16:50–17:00)

＜総会＞ (17:00–18:00)

＜懇親会＞ (18:30–20:30)
ニューサンピア敦賀

9 月 **25** 日（水） **[3** 日目**]**

＜口頭発表 **4** ＞ (9:15–10:30)
座長：越水 正典（東北大）

3–O–12 原子状酸素による高分子材料表面の微視的構造形成
○後藤 亜希 [1]，山下 真一 [2]，喜多村 茜 [3]，田川

雅人[4]（1: 宇宙航空研究開発機構，2: 東大院工，3: 原子力機構，4: 神戸大院工）

3–O–13 放射線化学的手法によるジアリルエテンの光化学的性質の研究
○山路 稔[1]，藤乗 幸子[2]，藤塚 守[2]（1：群馬大院理工，2：阪大産研）

3–O–14 Radiation-Induced Hydroxylation of Boron Nitride Nanosheets for Oxidative Dehydrogenation of Propane
○ Hanqin Weng[1,2], Geng Chen[2], Shinichi Yamashita[1], Zeyue Wei[3], Kun QIAN[3], Mingzhang Lin[2,4] (1: Sch. Eng., UTokyo, 2: Sch. Phys. Sci., USTC, 3: Sch. Chem. Mater. Sci., USTC, 4: INEST, CAS)

3–O–15 水中の OH ラジカルと *ortho*-Ps の反応におけるスピン相関の効果
○平出 哲也[1,2]（1：原子力機構，2：茨城大理工）

3–O–16 室温イオン液体中のオルトーポジトロニウム寿命の温度依存性
○平出 哲也[1,4]，満汐 孝治[2]，小林 慶規[3]，大島 永康[2]（1：原子力機構，2：産総研，3：早稲田大，4：茨城大理工）

＜休憩＞ (10:30–10:40)

＜口頭発表 **5**＞ (10:40–11:55)
座長：田口 光正（量研機構）

3–O–17 液体の超高速光電子分光とスペクトル回復法による溶媒和電子の束縛エネルギーと非断熱遷移の研究
○西谷 純一，山本 遥一，唐島 秀太郎，鈴木 俊法（京大院理）

3–O–18 低エネルギー電子による有機化合物中カーボネートエステル基の損傷メカニズムの解明
○楠本 多聞[1]，フロム ミッシェル[2]，サンチェレオン[3]，バス アンドリュ[3]，小平 聡[1]（1：量研，2：フランシュコンテ大，3：シャーブルック大）

3–O–19 蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた放射線による生体分子の損傷量評価手法に関する研究
○松尾 陽一郎[1]，榊 祐介[1,2]，清水 喜久雄[2,3]，泉 佳伸[2]（1：福井大工，2：福井大原子力研，3：大阪大 RIRC）

3–O–20 リアルタイム PCR を用いた放射線による DNA 損傷の評価に関する検討
○清水 喜久雄[1,2]，松尾 陽一郎[3]，泉 佳伸[2,3]（1：大阪大 RIRC，2：福井大原子力研，3：福井大工）

3–O–21 X 線照射で誘発される DNA 安定変異収率への抗酸化剤添加の影響
○于 暠[1]，永井 菜月[1]，近藤 勇佑[1]，藤井 健太郎[2]，横谷 明徳[2]，山下 真一[1]（1：東大院工，2：量研機構・量子生命科学）

＜閉会挨拶＞ (11:55–12:05)

ポスター発表

＜**1** 日目＞
（9 月 23 日（月）16:20–17:20，コアタイム 16:20–16:50）

1–P–01 置換型セルロースゲル中でのトリクロロメチルパーオキシドによるヨウ化物イオンの酸化反応のイオンビーム照射効果
○中川 清子（都産技研）

1–P–02 パルスラジオリシスによる自己賦活型シンチレータにおける初期励起緩和過程の解析
○越水 正典[1]，室屋 裕佐[2]，山下 真一[3]，山本 洋揮[4]，柳田 健之[5]，藤本 裕[1]，浅井 圭介[1]（1：東北大院工，2：阪大産研，3：阪大院工，4：量研機構高崎，5：奈良先端大）

1–P–03 電子線グラフト重合法を用いた微細構造を有する温度応答性細胞培養膜の作成
○堀内 寛仁[1]，志村 亮弥[1]，武岡 真司[21]，大島 明博[3]，鷲尾 方一[1]（1：早大理工総研，2：早大先進研，3：阪大院工）

1–P–04 Evaluation of Separation Performance of Diamide-Phenanthroline for Actinides from Lanthanides and Study on its Radiolysis Mechanism
○ Hanqin Weng[1,2], Geng Chen[2], Shinichi Yamashita[1], Xinrui Zhang[3], Weiqun Shi[3], Mingzhang Lin[2,4]（1: Sch. Eng., UTokyo, 2: Sch. Phys. Sci., USTC, 3: IHEP, CAS, 4: INEST, CAS）

1–P–05 地球上生命ホモキラリティ起源の解明を目指したスピン偏極ミュオン照射による光学活性発現実験
○高橋 淳一[1]，坂元 俊紀[1]，柴田 裕実[2]，久保 謙哉[3]，癸生川 陽子[1]，小林 憲正[1]（1：横浜国大院工，2：大阪大産研，3：国際基督教大教養）

1–P–06 フォトクロミック材料を用いた新規ラジオクロ

ミック材料の開発と 3D 線量計への展開
○河村 一朗[1]，藤原 健[2]，藤本 裕[1]，越水 正典[1]，浅井 圭介[1]（1：東北大院工，2：産総研）

1–P–07 2,3-ジヒドロ-2-スピロ-4'-[8'-アミノナフタレン-1'(4H)-オン] ペリミジンの X 線照射による異性化反応
○川本 弘樹，越水 正典，藤本 裕，浅井 圭介（東北大院工）

1–P–08 重イオン照射に伴うアルコール液滴表面からの二次イオン放出におけるサブミクロンサイズ効果
○間嶋 拓也[1]，水谷 汐里[1]，水並 優樹[2]，斉藤 学[1]，土田 秀次[1]（1：京大院工，2：京大工）

1–P–09 シクロデキストリンおよびその包接化合物の電子状態の研究
○吉田 啓晃[1,2,3]，中村 仁彦[1]，安藤 玖瑠実[1]，馬場 公範[2]（1：広大院理，2：広大理，3：広大放射光）

1–P–10 産総研つくばセンターにおける小型電子加速器を用いた中性子施設の構築の現状
木野 幸一[1,2]，○田中 真人[1,2]，小川 博嗣[1,2]，O'Rourke Brian[1,2]，加藤 英俊[1,2]，黒田 隆之助[1,2]，佐藤 大輔[1,2]，宍戸 玉緒[2]，鈴木 良一[1,2]，清 紀弘[1,2]，豊川 弘之[1,2]，友田 陽[1,2]，林崎 規託[1,2,3]，藤原 健[1,2]，古坂 道弘[1,2]，満汐 孝治[1,2]，室賀 岳海[2]，渡津 章[1,2]，帯名 崇[4]，濁川 和幸[4]，古川 和朗[4]，佐藤 節夫[4]，猪野 隆[4]，大友 季哉[4]，大島 永康[1,2]（1：産総研，2：新構造材料技術研究組合，3：東工大，4：KEK）

＜**2** 日目＞
（9 月 24 日（木）10:55–11:55，コアタイム 10:55–11:25）

2–P–01 放射線架橋した高分子の熱分解挙動
○中川 清子（都産技研）

2–P–02 Photoluminescence and X-ray imaging of protein-directed gold clusters
○ Zuoyue Liu[1], Yasuko Osakada[1,2] (1: ISIR, Osaka Univ., 2: Institute for Advanced Co-creation Studies, Osaka Univ.)

2–P–03 電子線グラフト重合法による Poly(N-isopropylacrylamide) を導入した温度応答性細胞培養膜の作製
○志村 亮弥[1]，末松 良隆[2]，堀内 寛仁[1]，武岡 真司[2]，大島 明博[3]，鷲尾 方一[1]（1：早大理工総研，2：早大先進研，3：阪大院工）

2–P–04 電子ビームのテラヘルツ電場分布測定
○菅 晃一[1]，楊 金峰[1]，神戸 正雄[1,2]，吉田 陽一[1]（1：阪大産研，2:阪市大院工大工）

2–P–05 アルゴンプラズマを用いた放射性セシウム分離捕集研究
○砂川 武義[1]，青木 祐太郎[1]，Glenn Harvel[2]（1：福井工大，2：オンタリオ工科大学）

2–P–06 再処理廃液を仮焼した硝酸塩含有固体のガンマラジオリシス研究（2）
○室屋 裕佐[1]，鈴木 晶大[2]，遠藤 洋一[2]（1：阪大産研，2：NFD）

2–P–07 L_{III} 端 X 線吸収微細構造測定による銀添加リン酸塩ガラス中の銀の価数変化探究
○川本 弘樹[1]，越水 正典[1]，正井 博和[2]，藤本 裕[1]，浅井 圭介[1]（1：東北大院工，2：産総研）

2–P–08 粒子線固相重合法による垂直配向有機ナノワイヤの形成とカーボンナノワイヤへの変換
○神谷 昂志[1]，櫻井 庸明[1]，出崎 亮[2]，越川 博[2]，杉本 雅樹[2]，関 修平[1]（1：京大院工，2：量研機構高崎）

2–P–09 無機水和物・水酸化物の放射線分解による水素分子生成収率とその発生メカニズムの考察
○熊谷 純[1]，堀之内 克好[2]，根岸 久美[3]（1：名大未来研，2：名大院工，3：（株）太平洋コンサルタント）

(福井大学附属国際原子力工学研究所　泉 佳伸)

本　会　記　事

第 110 回 日本放射線化学会 理事会議事録

日時　2019 年 3 月 22 日（火）17:00–
場所　東京大学 本郷キャンパス 工学部 8 号館 5 階 502 講義室
出席者　吉田陽一（阪大産研），鷲尾方一（早大），平出哲也（原子力機構），前川康成（量研），中川清子（都産技研），小嶋拓治（ビームオペレーション），伊藤賢志（産総研），河内宣之（東工大），熊谷純（名大），泉佳伸（福井大），青木康（住友重機械），伴弘司（高エネルギー加速器研），菊間博之（いいえんじ），青木昭二（イー・シー・イー），岡 壽崇（東北大高教機構），山路稔（群大），池田時浩（理研），山下真一（東大），廣木章博（量研）
議題

1. 前回（第 109 回理事会）議事録（案）（事務局）

- 第 109 回理事会の議事録が確認された．

2. 平成 30 年度役員名簿（事務局）

- 新役員等名簿が提案され，承認された．編集委員に，神戸氏（阪大産研）が就任した．

3. 平成 30 年度賛助会員名簿（事務局）

- 賛助会員名簿が紹介された．

4. 平成 30 年度予算執行状況（事務局）

- 平成 30 年度予算案の改訂が提案され，承認された．
- APSRC2020 の開催補助金は，会議終了後に返金予定である．改訂予算案については，2019 年秋の総会で承認を得る（吉田会長）．

5. 入退会者一覧（事務局）

- 入退会者一覧が示され，学生会員 1 名の入会が承認された（事務局）．
- 会費未納のまま退会する会員はいないのか？（伊藤氏）．退会希望者の会費納入状況を確認し，未納分があれば請求し，会費支払い後に退会手続きを行っている（事務局）．

6. 会員滞納者への対応について（事務局）

- 第 54 回総会後，会長・副会長による滞納者への支払い働きかけにより，一部の滞納者から支払いがあったことが報告された．
- 第 109 回理事会での議論を踏まえた除名手順，及び会則の改定が提案され，承認された（事務局）．
- 3 年以上滞納している会員のリストを理事に提示し，知人がいれば支払いを働きかけるよう依頼した（吉田会長）．
- 会員継続の意思がある海外留学中の会員には，会費納付に猶予期間を設けることが提案された（鷲尾副会長）．
- 次回理事会において，名誉会員の候補者リストを提示する（吉田会長）．
- 学生会員として入会する際は，学生証のコピー等の提示を必須とし，学生証の有効期間のみ学生会員と認めてはどうか（伊藤氏）．学生会員の資格確認（在学状況）は，事務局が適宜行うことが提案された（事務局）．

7. 編集委員会報告（熊谷主任）

- 4 月末発行の 107 号について進捗状況報告があった．
- 編集委員の交代について．H30 年 10 月に菅氏（阪大産研）から神戸氏（阪大産研）に交代した．菅氏は，アドバイザーに就任した．H31 年 4 月に甲斐氏（JAEA）から喜多

村氏（JAEA）に交代予定である．
- 次回編集委員会は，4 月 20 日に東京で開催予定．
- Dropbox Business の運用を開始した．
- J-STAGE の利用説明会に山下・田中編集委員が参加，今後の運用方法を検討中．

8. 企画委員会報告（事務局）

- 先端放射線化学シンポジウム（SARAC）2019 の開催計画について，2019 年 12 月に弥生研究会との共催予定と報告があった．

9. 国際交流委員会報告（鷲尾副会長）

- ICRR2019 への若手支援について，応募状況の報告があった．

10. 放射線化学討論会について（泉氏）

- 開催日程および準備状況について報告があった．2019 年 9 月 23 日–25 日に福井大学敦賀キャンパスにて開催予定．
- 公式ホームページは 4 月に開設の予定．学生会員の参加費は，前回に引き続き無料とする．

11. 若手の会（事務局）

- 夏の学校の開催日程について報告があった．
- 2019 年 9 月 26 日–27 日に，海のホテルひろせ（福井県御浜町）で開催予定．
- 研究室の学生に参加を呼びかけるように理事の方々に依頼した．

12. 放射線化学賞について（事務局）

- 今年度は応募者なし．

13. その他（岡理事）

- 日本化学連合化学系学協会連絡会の第 1 回，第 2 回定例会議の様子が報告された（中川副会長）．
- APSRC2020 は，2020 年 4 月 21 日–24 日に高崎シティーギャラリーで開催予定．公式ホームページを開設．助成金獲得に向け，応募先を検討中（事務局）．
- IRaP2020 は，2020 年 9 月 27 日–10 月 2 日に奈良で開催予定（吉田会長）．
- 第 63 回放射線化学討論会は，IRaP2020 の前に早稲田で開催予定（鷲尾副会長）．
- 学会の発展，会員数増加，財政健全化を図るにはどうするべきか（吉田会長）．まずは，会長・副会長で方策を練る（鷲尾副会長）．

以上

本 会 記 事

令和元年度役員等名簿（令和元年 9 月 24 日現在）

会長	平出 哲也（原子力機構・東海）	
副会長	吉田 陽一（阪大産研） 鷲尾 方一（早大理工学術院） 前川 康成（量研・高崎） 中川 清子（都立産技研） 高橋 憲司（金沢大工）	国際会議推進担当 国際交流委員会担当 事務局担当 放射線サイエンス連合担当 研究推進担当
常任理事	錦見 敏朗（NHV コーポレーション） 河内 宣之（東工大院理工） 丑田 公規（北里大理） 伊藤 賢志（産総研） 浅井 圭介（東北大院工） 青木 康（住友重機械）	辻 正治（九大炭素資源センター） 永石 隆二（原子力機構・東海） 真嶋 哲朗（阪大産研） 堀邊 英夫（大阪市大院工） 田口 光正（量研・高崎）
理事	澤井 友次（放振協） 小泉 均（北大院工） 小嶋 崇夫（大阪府大） 工藤 久明（東大院工） 熊谷 純（名大） 鈴木 信三（京産大理） 関 修平（京大院工） 林 慎一郎（広島国際大） 田中 真人（産総研） 岡 壽崇（原子力機構・東海） 古澤 孝弘（阪大産研） 越水 正典（東北大院工） 楊 金峰（阪大産研） 間嶋 拓也（京大院工） 山沖 留美（大阪薬大）	砂川 武義（福井工大） 竹中 康之（北教大） 中村 一隆（東工大セラミック研） 駒口 健治（広大院工） 斎藤 恭一（早大理工総研） 青木 昭二（イー・シー・イー） 泉 佳伸（福井大） 山路 稔（群馬大院工） 加藤 隆二（日本大） 菊間 博之（いいえんじ） 廣木 章博（量研・高崎） 伴 弘司（高エネルギー加速器研） 山下 真一（東大院工） 池田 時浩（理研）
監事	勝村 庸介（日本アイソト - プ協会）	平岡 賢三（山梨大工）
顧問	佐藤 伸 田川 精一（阪大産研） 市川 恒樹（北大院工） 小嶋 拓治（量研・高崎）	籏野 嘉彦 南波 秀樹（放振協） 中川 和道（阪大産研）
名誉会員	近藤 正春 田畑 米穂（原子力システム研究懇話会）	濱 義昌（早大理工研）
編集委員会	委員長：平出 哲也（原子力機構・東海） 主任：熊谷　純（名大） 岡本 一将（北大院工） 加藤 昌弘（産総研） 神戸 正雄（阪大産研） 佐伯 誠一（量研・高崎） 樋川 智洋（原子力機構・東海） 喜多村 茜（原子力機構・東海）	山下 真一（東大院工） 林 慎一郎（広島国際大） 伊藤 賢志（産総研） 岡 壽崇（原子力機構・東海） 田中 真人（産総研） 藤井 健太郎（量研・東海） 椎名 孝行（千代田テクノル） 竹内 夕桐子（極東産業）
企画継承委員会	委員長：越水 正典（東北大院工） 青木 康（住友重機械） 駒口 健治（広大院工）	須郷 由実（量研・高崎） 藤井 健太郎（量研・東海） 室屋 裕佐（阪大産研）
国際交流委員会	委員長：鷲尾 方一（早大理工学術院） 室屋 裕佐（阪大産研） 田口 光正（量研・高崎）	泉 佳伸（福井大） 林 銘章（中国科技大） 楊 金峰（阪大産研）
事務局	前川 康成（量研・高崎） 田口 光正（量研・高崎）	廣木 章博（量研・高崎）

本 会 記 事

平成 30 年度会計決算報告書（決算日：令和元年 8 月 31 日）

収入の部　　（単位：円）

項目	H30 年度予算案	H30 年度決算	内容等
賛助会員	340,000	300,000	2018 年度契約数 30 口（17 社） ※未納 4 口（1 社× 4 年）40,000 円
個人正会員 学生会員	990,000	812,500	正会員 入金金額 796,000 円（内預り金 25,000 円） 学生会員 入金金額 16,500 円（内預り金 7,500 円） 未納者（正：67 名，学生：7 名） 未納金額累積合計 1,008,500 円
終身正会員寄付金	–	–	
雑収入（利息等）	5,000	37,315	著作権料 37,299 円 受取利息（国際文献分 7 円，事務局分 9 円）
第 61 回 放射線化学討論会 余剰金返金	–	178,074	
編集委員会 余剰金返金	–	91,030	
積立基金からの繰り込み	–	–	
前年度繰越金	955,915	955,915	
合計	2,290,915	2,374,834	

支出の部

項目	H30 年度予算案	H30 年度決算	内容等
通信連絡費	20,000	7,597	郵送料・レターパック・事務局データ保管用 HDD 代
振込手数料	–	4,860	国際文献社分 540 円，事務局分 4,320 円
事務委託費 　年間業務費	700,000	700,909	H30.6–8 月分 111,392 円 H30.9–11 月分 430,043 円 H30.12–H31.2 月分 72,090 円 H31.3–R1.5 月分 87,384 円
会議費	15,000	–	
放射線化学討論会援助	200,000	200,000	第 62 回 放射線化学討論会事務局
先端放射線化学 シンポジウム補助	100,000	–	
若手の会　夏の学校補助	70,000	70,000	H30 年度分 70,000 円
学会賞	100,000	864	H29 年度分 賞状代，H30 年度応募者なし
企画委員会経費	75,000	–	
国際交流委員会経費	150,000	150,000	ICRR2019 若手支援 50,000 円/人× 3 人
編集委員会経費	200,000	48,600	Dropbox 年間利用料 48,600 円
日本放射線研究連合負担金	50,000	50,000	H30 年度分 50,000 円
日本化学連合 化学系学協会会費	10,000	15,000	2018 年度下期分 5000 円 2019 年度分 10,000 円
ホームページ運営費	60,000	5,054	HP ドメイン更新料 1,814 円 レンタルサーバー代 3,240 円
予備費	200,000	–	
次年度繰越金	40,915	921,950	
合計	2,290,915	2,374,834	

本 会 記 事

入退会者一覧

入会

会員種別	会員番号	会員名	所属機関名	紹介者
正会員	748	岩品 真悟	株式会社大阪ソーダ	
正会員	749	喜多村 茜	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター	平出 哲也
正会員	750	細川 洋一	（株）豊田中央研究所	鷲尾 方一
学生会員	751	志村 亮弥	早稲田大学先進理工学研究科共同原子力専攻	鷲尾 方一

退会

会員種別	会員番号	会員名	所属機関名	退会日
賛助会員	687	有限会社イーオーアール		2019/8/31
賛助会員	631	レーベン館株式会社		2019/9/23
正会員	304	早味 宏	住友電気工業（株）	2019/9/23
正会員	365	三浦 栄朗	富士写真フィルム 宮台技術開発センター	2019/9/23
正会員	371	皆川 雅朋		2019/9/23
正会員	386	森 利明	大阪府立大学 産学官連携機構	2019/9/23
正会員	431	渡辺 重之	三菱化学ポリエステルフィルム（株）	2019/9/23
正会員	439	松井 良憲	ルネサスエレクトロニクス（株）	2019/9/23
正会員	526	藤田 憲明	北海道大学病院	2019/9/23
正会員	537	島田 明彦	量子科学技術研究開発機構	2019/9/23
正会員	569	清水 享	日東電工株式会社	2019/9/23
正会員	581	金子 博実	株式会社 NHV コーポレーション	2019/9/23
正会員	620	瀬川 麻里子	日本原子力研究開発機構	2019/9/23
正会員	657	別當 良介	早稲田大学理工学術院総合研究所	2019/9/23
正会員	658	石倉 理恵	（株）FC 研究所	2019/9/23
正会員	661	藤田 創	早稲田大学理工学部	2019/9/23
正会員	662	及川 敬太	北海道大学大学院工学研究院	2019/9/23
正会員	672	Phantira Lertnaisat	東京大学	2019/9/23
正会員	679	峯井 俊太郎	茨城大学	2019/9/23
正会員	682	西川 剛史	早稲田大学	2019/9/23
正会員	683	花崎 祐	早稲田大学	2019/9/23
正会員	692	伊藤 孔明	早稲田大学理工学研究所	2019/9/23
正会員	700	添田 雄史	早稲田大学	2019/9/23
正会員	703	高橋 篤史	早稲田大学大学院先進理工学研究科	2019/9/23
正会員	704	田倉 貴史	早稲田大学大学院先進理工学研究科	2019/9/23
正会員	705	西山 将大	早稲田大学	2019/9/23
正会員	706	漆畑 諒	早稲田大学	2019/9/23
正会員	707	山岨 優	株式会社ジャストシステム EPS 事業部	2019/9/23
正会員	715	金森 航	早稲田大学	2019/9/23
学生会員	699	山原 有未	早稲田大学	2019/9/23
学生会員	712	川中 一平	早稲田大学	2019/9/23
学生会員	714	横田 龍輝	大阪大学	2019/9/23

令和元年度 日本放射線化学会賛助会員

住友電気工業（株）
http://www.sei.co.jp

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

（株）環境浄化研究所
http://www.kjk-jp.com

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

岩崎電気（株）
http://www.iwasaki.co.jp

東邦金属（株）
http://www.tohokinzoku.co.jp

（公社）日本アイソトープ協会
http://www.jrias.or.jp

いいえんじ合同会社
http://iieng.jp

（株）NHV コーポレーション
http://www.nhv.jp

（一財）放射線利用振興協会
http://www.rada.or.jp

（株）イー・シー・イー
http://www.ece-ebara.com

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

量子科学技術研究開発機構
http://www.qst.go.jp

（株）イング
http://www.ing-co.jp

（株）千代田テクノル
http://www.c-technol.co.jp

放射線化学　第 108 号〈WEB 版〉

令和元年 10 月 31 日　発　行
発 行 所　　日 本 放 射 線 化 学 会

〒370–1292 群馬県高崎市綿貫町 1233
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
高崎量子応用研究所　先端機能材料研究部
e-mail: jsrc@qst.go.jp
TEL: 027–346–9410, FAX: 027–346–9443

編集委員長　平 出　哲 也
編 集 委 員　熊　谷　　純
岡 本　一 将　加 藤　昌 弘
喜 多 村　茜　神 戸　正 雄
佐 伯　誠 一　椎 名　孝 行
竹内 夕桐子　樋 川　智 洋
林　慎 一 郎　伊 藤　賢 志
岡　　壽　崇　菅　　晃　一
田 中　真 人　藤井 健太郎
山 下　真 一

郵便振替口座　　長野 00540–9–34599
日本放射線化学会
発 行 人　平 出　哲 也