



Photo Masaya Tsujimoto

Index

米国シリコンバレーに憧れて始まったIVRへの関わり ～技術者として携わってきた“もの創り”と“しくみ創り”～…市田 隆雄	1
六ヶ所再処理施設の環境安全について……………岡村 泰治	6
〔コラム〕 5 th Column……………中川 恵一	11
第14回 放射線モニタリングに係る国際ワークショップ ポスター賞 受賞記 ……………	12
2019年 製薬放射線研修会 (第21回製薬放射線コンファレンス総会) ……………	14
図説 量子ビーム・放射線利用 ー第4回 ポリマーを創る・操るー ……………岡田 漱平	15
〔サービス部門からのお願い〕 ガラスバッジの装着について……………	19

米国シリコンバレーに憧れて始まった IVRへの関わり



市田 隆雄*

～ 技術者として携わってきた“もの創り”と“しくみ創り”～

1 はじめに

1995年頃、北海道大学から九州大学までの主たる大学で“産学共同”のレクチャがあったことを回想する。筆者は京都大学で受講したが、周囲はベンチャー起業を目指そうとする研究・教育職、大学を管理監督する事務関係者で埋もれていた。その頃の時代背景は次の如くである。本邦の大学における特許取得数は世界一であったが産業に生かされていない傾向があった。それを打破するべく総務省、経済産業省、文部科学省が主軸に“産学共同”、つまりは研究を産業に直結させて、新たな事業創生を狙いに定めていた。新しい事業は、工場建設や新規資源が必要となるだけでなく、様々な業態に連鎖して好影響を齎す。当然ながら雇用も促進することを目指し、国政としては“産学共同”は経済を戦略的に活性化させる手立てと捉えていたのであろう。そして当時を振り返れば国立大学を法人化する前段階であったので、大学機関の経営観念の強化事業になっていたとの方向性も読み取れる。その後“産学共同”は産学官連携という言葉として取り扱われているようである。

さて、筆者はこの時期にIVR (interventional radiology) に関連して様々な“もの創り”にチャレンジしていた。自施設先輩方の業績に本邦初DSA (digital subtraction angiography) 開発、井上春成賞を受賞したデバイス (スーパーセレクトイブワイヤ) 開発があるが、それに倣いたく“産学共同”の代表格である米国シリコンバレーのような成り立ちに憧れたためである。本稿ではその筆者の足跡を紹介したい。ところで事実の信ぴょう性を明示するという意味で、守秘義務が解除されている事物 (事業終結)、守秘に干渉しないものについては具体名で記載する。メーカー名を開示することをお願いしたい。

2 “もの創り”を成功させるテクニック

私の“もの創り”との関わり方は臨床目線を養い放射線技術を有効的に活用してきたことであるが、並行して欠かせないテクニックはマネジメントである。ここで示すマネジメントとはメリットとデメリットのバランスを成すことである。より良い“もの創り”であっても、例えば費用対効果を逸すると恒常的な耐容がない。実践的活用には、効果・労力・時間・費用・信頼性・安全性・広報等がリスクに対するバランスがあり『総合的な成功』との結論付けを要する。

上手く辿れる手法は『リスクを最大限、メリットを最小限』に考えることがkeyである。私の場合、その相殺で推進するか否かを判断している。厳しい批判的吟味での『リスクを最大限、メリットを最小限』は、経験則であるがリスクが最大になることはまずなく、メリットが最小になることもない。実際には各々がそこまで達しないのが常である。

3 主たる“もの創り”

現在のIVRの様相に多少なりとも影響を与えた“もの創り”を解説する。

3-1 IVR-CTシステムの開発

発案は1991年であった。1980年代終盤から、超音波診断で指摘できる肝臓の小さな病変がangiography (血管造影) で描出されないため、時折CT室へ移送して濃度分解能に優れたダイナミックCTを施行していた。今から顧みれば、スキャン位置がタイムリーにマッチングすれば造影像として描出 (微細腫瘍の存在診断) できるが、その位置がマッチングしていない場合は描出できなかったのが当時の臨床光景である。しかしながら腫瘍マーカー、超音波診断等でHCC (hepatocellular carcinoma: 肝細胞がん) が濃厚と疑われるにも関わらず、

* Takao ICHIDA 大阪市立大学医学部附属病院 中央放射線部

angiographyで描出されないことから鑑別診断の精度に疑念が湧く。ダイナミックCTでは患者さんの息止めがズレることを強く疑い、システムティックに対応できないかを考えていた。その頃CTの技術革新がありヘリカルCTが登場、同時に新システム開発を日立メディコに提案した (Fig.1)。非常に大きな事業のためなかなか時間がかかり、結果的には1993年に別施設で東芝メディカルの装置が発表された。わずかに遅れて日立メディコも完成して自施設に納められたのが1994年である¹⁾。1999年第58回日本医学放射線学会総会時に、衛星中継によるライブがされて手技的には確立されたと考えられる。IVR-CTは小肝腫瘍の存在診断に力を発揮し、肝がんの5年生存率の改善に大幅に寄与できた。開発後に驚いたことは、当時HCCはアジア圏に限られる疾患であったが、欧州メーカーであるシー

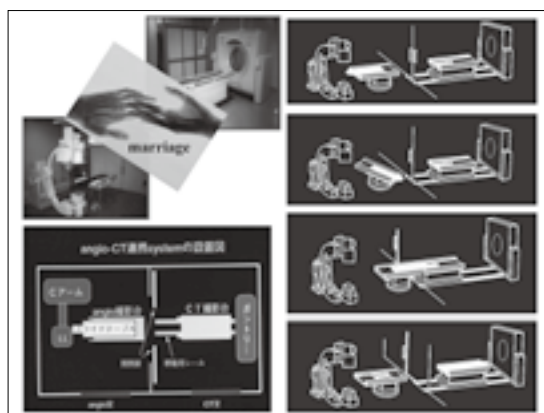


Fig. 1 CTとangioを連携させたシステム
隣接させた部屋同士で開閉扉を設置。angio寝台をローテーションさせてCT寝台とドッキングさせる。寝台上的患者ベットをスライド移動させて相互の部屋を行き来できる仕様。

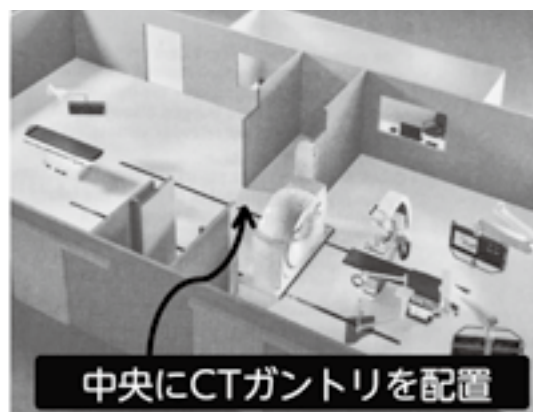


Fig. 2 1台のCTと2台のIVRマシンを連携させたシステム
中央にCTの小部屋、左右にIVR室を設けて開閉扉を設置。自走式のCTを相互のIVR室に移動して、CT撮像ができる仕様。

ンスが素早く同様の機器を開発、市場提供したことである。またここ数年來の世界市場でIVR-CT普及が好調なことにも驚いている。

実は5年ほど前からシーメンスに新しいアイデアを提案していた。より効率的な運用をするため、1台のCTを2台のIVRマシンで共用できるアイデアである (Fig.2) 自走式のCTを中央に配置して小さなCT室を設け、それを挟む両側にIVR室を設定する仕様である。IVR-CTでは診断能を高めたいのでハイリンクのCTが求められるが、そのCTを1台のみにできると経済効果は大きい。例えば2台のIVR-CTを購入する場合に比して、ランニングコストの保守費用も含めると数億円節約できる試算である。2017年にその1号機がドイツで設置されたが、有難くも装置名は日本語で“Miyabi (みやび)”と命名できた。1991年から始まった関わりが現在も続いている流れとして非常に感慨深い。

3-2 ナビゲーションシステムの開発

現在のIVRではナビゲーション (画像支援) が診療放射線技師 (以下、技師) の当然な業務であり、X線機器のナビゲーション機能は馴染み深い。しかしナビゲーションという用語が医療で一切使用されていない1980年代後半からこの機能は技師の手で着手されていた。1993年IVRの国際学会で『Navigation System for IVR』として発表したことが世界の先駆けである。同年にはDICOM (digital imaging and communications in medicine) 規格が登場しているが、ご承知のように普及するには時間がかかり、PACS (picture archiving communication system) から画像観察への展開が進むのは2000年を過ぎて、そして2008年に診療報酬制度の改訂として電子画像管理加算によりアプリケーション整備が進む。その経過があつて、IVRにおけるナビゲーションシステムも進化したと分析している。

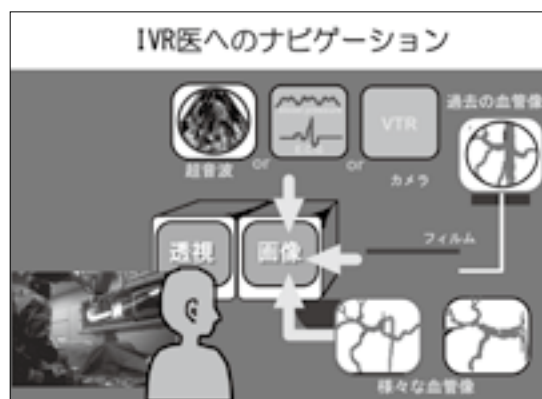


Fig. 3 様々な画像を自在にIVR医に提供

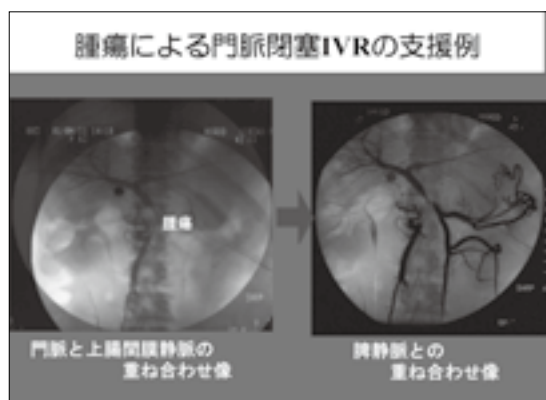


Fig. 4 門脈閉塞では開通路(門脈、上腸間膜静脈、脾静脈)を重ね合わせして、更に画像強調して閉塞経路を示す。ガイド役としての支援例。

話題を戻すが、従前は医用画像の信号方式はメーカー独自で互換性を有しなかった。『Navigation System for IVR』として開発したシステムは、その映像信号をNHK標準テレビ信号に変換して各種映像媒体を統一的に管理、自在に映像配信するシステムであった。様々な画像を支援モニタ上で分割表示、或いは重ね合わせ表示してナビゲーションしていた(Fig.3, 4)。このシステムを東芝メディカルおよび日立メディコと共同開発²⁾していたが、その後の機器メーカーのナビゲーション機能の原型となっている。

3-3 IVRにおける懸架式LCDシステムの開発

1998年民生機器で10.4型のカラーLCD (liquid crystal display) が発売されて利用にかかった。門脈圧亢進症の治療手技であるTIPS (transjugular intrahepatic portosystemic shunt: 経頸静脈的肝内門脈静脈短絡術) でIVR医がモニタ観察に苦慮していた。そこで小型の観察モニタとしてのLCDの活用を始める。その後、II.側面 (Fig.5)、懸架式 (Fig.6) となり国内特許をとる。

ところで、2000年代になり読影モニタとしての高精度LCDが出現していたが、一般的な医用機器での採用はなかった。X線機器業界では1999年米国サンディエゴで開催されたCVIR (Cardio Vascular and Interventional Radiology) の機器展示で、LCDが一体化の超音波装置を初めて確認した。大きな驚きと共に筆者はLCDシステム開発への“もの創り”に安堵を得た。その後開発が更に進み、大掛かりなシステムを作製して腹部用マシンに装備させた³⁾。その時期には医用LCDとして新しいVA方式が登場しておりその採用に臨んだ。X線機器メーカーに投げかけることで実現したが、ただ当該メーカーにとっては既製CRT (cathode ray tube) モニタの導入を断り、独自に作製したモニタを導入する



Fig. 5 小型LCDのI.I.側面への装備仕様
IVR医はI.I.周囲を取り巻くように立つ。そのためI.I.側面にレールを敷設させて周囲を移動できる仕様。



Fig. 6 医用LCD (VAモード) による新たな懸架式仕様

ことが奇怪であったようである。この一連の動きが当該メーカー工場に報告され、メーカー本社内での話題となる。2004年に当該メーカーの工場長等の訪日視察の申し入れがあり臨床現場をご覧いただいた。同年のJSRT秋季学術大会時に当該メーカーはIVR懸架モニタとしてLCDを展示した。その当該メーカーはフィリップスで、オランダから来日していた工場長による判断であった。その翌年のJRC2005ではフィリップス、シーメンスにおいてIVRマシン装備が懸架式LCDシステムになっていた。各々の展示場でLCDのタイプを確認すると、筆者の施設のバルコ社製LCDと同一であった。

3-4 様々な“もの創り”への歩み

有難いことにこれらの履歴でメーカーからの信頼感が増し、期待が寄せられるようになった。X線透視線量の可変システムの開発⁴⁾、二次蛍光面を拡大したII (image intensifier) 搭載のIVRマシン開発⁵⁾、世界初のFPD (flat panel detector) によるDSA開発⁶⁾にも繋がった。またFPD開発で得たノウハウは、2008年リニアックメーカーのエレク

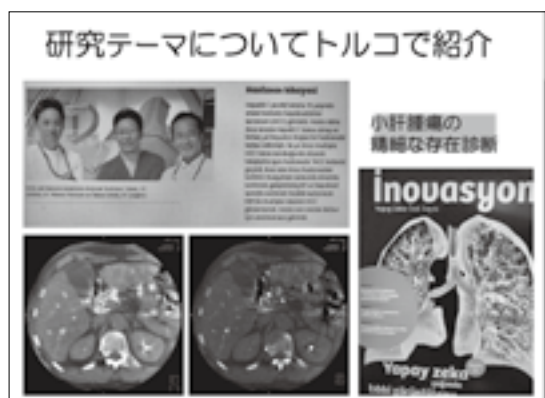


Fig. 7 共同研究の内容(小肝腫瘍の精細な存在診断についてトルコで紹介)

タの定位放射線治療の精度保障システムの開発に繋がった。コーンビームCTのデータ構築・処理が全くの別分野に役立った事例である。ガンマナイフで業績を積み上げていたエレクタが、治療計画装置3Dラインを買収してリニアック販売に注力しようとしていた時代である。ただ精度保障システムがなく本邦のシビアな精度管理には不向きと思われたが、新しい精度管理ソフトウェアを提案した。大阪市立大学オリジナルがエレクタの世界マーケットのラインナップに加わることとなる。エレクタは『top of site』を東日本では東京大学と順天堂大学としていたが、西日本では筆者の施設が選ばれ、その後の数々の共同研究に繋がった。そして、こうした思考経験がIVRでも広がりを見せ、現在は本邦における腹部領域『top of site』としてシーメンスと共同研究に臨んでいる。コーンビームCTにおける小肝腫瘍の存在診断に有用なソフトウェアの臨床使用では、2017年のRSNA（北米放射線学会）で広く情報周回された。一部の国からは母国語での翻訳が依頼されてその情報開示もされている（Fig.7）。

4 主たる“しくみ創り”

“もの創り”の展開から着々と経験したIVRでの“しくみ創り”について「日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構」、「IVR手技施行に関する診療体制についての提言」について解説する。

4-1-1 三位一体のIVR

現在、技師の提供する支援画像が頼りにされて現場が動いている。われわれの画像構築が期待され、その画像には臨床価値が豊富に含まれなければならない。さて、その実践にはスキルが必要である。病変の有無、関与が描出されている画像構

築をするには必然として医療行為の読影に似通った能力（読影の補助）が必要となる。

ところで、チーム医療を推進させるために、2010年4月の医政局長通知0430第1号で読影の補助が謳われた。厚生労働省が医療行政として諸手で推し進めている流れである。ただ、このような動きの起こる前から、IVRでは医師、看護師、技師での三位一体での医療が当然であり、その方向性が示されていた⁷⁾。日本インターベンショナルラジオロジー学会（以下、IVR学会）では1990年代から岡崎正敏先生（福岡大学名誉教授）、坂本力先生（公立甲賀病院）等により推し進められており、筆者は1990年過ぎから会員となりその動きを目前で眺めていた。2002年のIVR学会総会シンポジウムでは『医師・看護師・技師による三位一体のIVR』がテーマとされ、筆者は演者として高度な専門性を備えて三位一体の一角が担えることを伝えた。IVR学会での動きは、現行のチーム医療推進の先駆けと称せられるかもしれない。これが“しくみ創り”への気付きになったと回想する。この延長上で「日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構（以下、認定機構）」に関与することになる。

4-1-2 専門性についての2000年過ぎの動向

当時、IVRと放射線治療部門のマネージメントを任されていたが、放射線治療の世界では残念にも誤照射が時々発生しており、技師の専門性が広く問われ始めた時代であった。同時に放射線治療では各種の専門資格が立ち上がり、専門性の保障が常態となった。筆者がIVRでの専門資格の必要性について自身内で問い始めた時期である。しばしば関係者に問い掛けをしていたが、物事を執行する側とは当時は縁遠い筆者の進言は戯言でしかなかったのであろう。永きに悶々とする時間を過ごしたが、明光が射すタイミングが訪れる。数多くの有識者に問い掛けをしたが、その中のお一人 江口陽一氏（元山形大学医学部附属病院）が日本放射線技術学会に働きかけ、ST委員会（スーパーテクノロジー認定制度検討委員会）を通じて検討班等が2005年頃に立ち上がることになった。光栄にも班員に加入するべき指名を頂戴し、私の“しくみ創り”が始まる。

その後「循環器撮影専門技師認定制度設立に向けての協議会」が発足し、IVRに関係する医学会にも投げかけられた。協議会の参画団体は、日本医学放射線学会、日本脳神経血管内治療学会、日本循環器学会、日本IVR学会、日本診療放射線技師会、そして日本放射線技術学会である。そして、2008年2月にどの団体にも帰属しない中立団体として認定機構を設立した。その後日本心血管イン

ターベンション治療学会が加入して、現在は5医学会、2技師団体、計7団体である。

4-1-3 今後への期待

純朴な“もの創り”思考が、より良い放射線業務への熟考に繋がり、より良いスタッフ育成の一環として“しくみ創り”に関わられた履歴といえる。認定機構は設立後11年目を迎えるが、現在までの認定者は760名（退職等で継続を辞するケースがあり現有資格者は711名）を数える。彼らは最適なX線機器を前に、フルにその機能を使いこなすスタッフだと確信している。

4-2 診療体制についての提言への関わり

2017年7月にIVR学会から『IVR手技施行に関する診療体制についての提言』（http://www.jsir.or.jp/guide_line/ivr_syugiteigen/）が刊行された⁸⁾。“しくみ創り”として、その関わりに触れる。

IVR学会内で2015年にIVR手技施行に関する診療体制についてのガイドライン作成委員会がIVR医8名で組成され、同時に評価委員会が3名で組成（IVR医2名、技師1名）された。この評価委員着任の要請を筆者が受けたことがすべての始まりであった。

これを足掛かりに本ガイドラインに様々な意見提示をすることに努め、その中で根拠に則るテクニカルの重要性を説いた⁹⁾。IVRでの技師は自主的な活動がすべてで、公的に示せる指標がなく時節としては絶好な機会であった。幸いにも筆者の進言が作成委員会の審議に耐えうることが叶い、技師としてガイドラインへの加筆が認められた。同時に9人目として作成委員会に加入する。

ところで、当初“ガイドライン”を予定していたが、すべてが整い公開情報としてパブリックコメントを求める段で変更された。IVRは様々な医学会が関係している分野であるため、IVR学会のみ1つの団体で“ガイドライン”を刊行することの難しさが確認されて“提言”に改められる（これ以降は提言と記載する）。

本提言の重要な点は「どのような診療体制が必要か？」の中で、『IVR放射線技師は、学会認定の資格を有している』とした。この意味の解説では『診療放射線技師は、専門的な知識・技術を持つIVR専門放射線技師（日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師等）の資格を有することが望ましい』としている。つまり認定機構の専門資格を前面に押し出す格好で、提言を刊行することができた。様々なモダリティで専門資格が稼働しているが、このような動きは本邦初であり、世界初であることをお知らせしておきたい。

5 まとめ

米国シリコンバレーに憧れてIVRに関わった足跡を、“もの創り”と“しくみ創り”で記した。“もの創り”での数々の経験が、より良いIVRへの携わりのため“しくみ創り”になった歩みを認める。ベンチャーとは程遠く、残念にも憧れは単なる憧れで終わっているが、背伸びした歩みで身の丈以上にできた節も感じている。これからも『熱い思い』でIVRに寄り添い、若人の活路の手助けに努力したい。読者の皆さまには当方足跡の長文をお読みいただいたことに深く御礼を申し上げます。心より感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) 市田隆雄, 工藤弘明, 山田龍作, 他: Sliding tableを用いた新しい血管撮影CT連携システムの開発, 臨床放射線, (40), 749-752, 1995
- (2) 松岡利幸, 中村健治, 市田隆雄, 他: IVR支援システムの開発と応用 (特集 インターベンショナル・ラジオロジーの最前線), 映像情報, 1070-1075, 29 (18), 1997
- (3) 市田隆雄, 工藤弘明, 中村健治, 他: 透視への液晶モニタの導入 (透視用液晶モニターシステムの試作と臨床評価), H IVR学誌, 18 (1), 55-58, 2003
- (4) Kudoh H, Ichida T, Yamada R, et al: Development of Variable Dose X-ray Fluoroscopic System. -Aimed at Reduction of X-ray Exposure during Interventional Radiologic Procedure-, Radiation Medicine, 16 (3), 229-232, 1998
- (5) 工藤弘明, 水口和夫, 市田隆雄, 他: 高性能X線-TV装置により血管撮影, H IVR学誌10(3), 349-351, 1995
- (6) Okusako K, Ichida T, Nakamura K, et al: Basic evaluation of physical characteristic and clinical study of New Digital Subtraction Angiography System with a large-area flat-panel detector, SPIE, The International Society for Optical Engineering, 5030, 845-852, 2003
- (7) 市田隆雄, 工藤弘明, 奥山和夫: 三位一体のIVR -最善のIVRのための私達の思考-, H IVR学誌16(4), 321-326, 2001
- (8) 米虫敦, 市田隆雄, 井上政則, 他: IVR手技施行に関する診療体制についての提言, 日本IVR学会編, Webアドレス, http://www.jsir.or.jp/guide_line/ivr_syugiteigen/, 2017/07/10
- (9) 市田隆雄: 教育講座-EBM手法に基づく放射線技術-, 血管撮影のEvidence Based Medicine (EBM) を考えてみる, 日放技学誌 61(3), 335-343, 2005

著者プロフィール

略歴
 昭和59年 大阪大学医療技術短期大学部卒業
 同年 大阪市立大学医学部附属病院 中央放射線部に入職
 平成15年 同施設 主査
 平成23年 同施設 副主幹・副技師職長兼務
 平成25年 同施設 保健副主幹・技師長職兼務
 平成28年 同施設 保健主幹・技師長職兼務 現在に至る
学術団体、職能団体、研究会等の担務
 日本放射線技術学会 業務執行理事
 日本診療放射線技師会 読影分科会委員
 日本IVR学会 メディカルスタッフ委員会 委員
 日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構 副理事長
 医用画像情報学会・MII 理事
 関西IVR撮影技術研究会 会長

六ヶ所再処理施設の 環境安全について



岡村 泰治*

1. はじめに

エネルギー資源に乏しい日本がウラン資源をより有効に利用するために、原子力発電所の使用済燃料から再利用できるウランとプルトニウムを取り出すためのシステムが「再処理」である。現在、青森県上北郡六ヶ所村において、日本で初めての商業用再処理施設が建設されており、2021年度上期のしゅん工を予定している。

再処理施設の特徴として、使用済燃料を硝酸に溶かして処理を行うことにより非密封状態の溶液を取り扱うこと、原子力発電所のように大量の放射性物質が一カ所に集中して存在するのではなく、取り扱う核燃料物質の種類、量、その状態等が様々で複数の工程に広く分布していることなどがある。また、再処理施設全体の放射能の約95%は、ガラス固化体、使用済燃料、MOX粉末等の密封された固体の放射性物質であり、密封されていない液体の放射性物質のうち、全体の放射能の約5%が高レベル濃縮廃液で、貯槽に貯蔵されている。

六ヶ所再処理施設については、国内外の最良の技術を用いて、再処理に伴い発生する廃棄物をできる限り取り除く設計としているが、その一部並びに除去できないクリプトン-85 (Kr-85)、炭素-14 (C-14) 及びトリチウム (H-3) は、排気又は排水とともに大気又は海洋へ放出される。環境安全は重要な課題であり、放射性気体及び液体廃棄物の放出により公衆の受ける線量が国の安全審査により評価されるとともに、放出管理及び環境モニタリングにより、六ヶ所再処理施設の周辺住民等の安全の確認を行っている。

ここでは、六ヶ所再処理施設の環境安全について紹介する。

2. 六ヶ所再処理施設の環境安全に対する設計方針

六ヶ所施設の設計においては、気体及び液体放射性廃棄物の放出による一般公衆の線量が合理的に達成できる限り低くなるよう、放出放射性物質の低減を行うことを基本方針としている。再処理施設から発生する気体廃棄物に含まれる放射性物質は、その性状に応じて、洗浄塔、デミスタ、高性能粒子フィルタ、ヨウ素フィルタ等を組み合わせて洗浄及びろ過するとともに、これらの処理後に残るわずかの量の核種並びに希ガス（主にKr-85）、C-14及びH-3について、十分な拡散・希釈効果を持つ排気筒から放出することにより、一般公衆の線量低減を図っている。

液体廃棄物に含まれる放射性物質は、廃液の種類及び濃度に応じて、蒸発装置、ろ過装置、脱塩装置等を組み合わせて処理するとともに、これらの処理後に残るわずかの量の核種及びH-3について、十分な拡散・希釈効果を持つ海洋放出管から放出することにより、一般公衆の線量低減を図っている。

大量の温排水によって希釈され沿岸から放出される原子力発電所と異なり、再処理施設は温排水を排出しないことから、液体廃棄物に対しては、汀線から沖合約3 km、東京湾平均海面下約45 m（水深約44 m）の海洋放出口から海中に放出することにより、拡散・希釈効果を得ることとしている。

気体廃棄物及び液体廃棄物の放出に際しては、一般公衆の線量評価に用いた推定年間放出量に基づき放出管理目標値を設定し、これを超えないように管理している。

再処理施設内に内蔵されている放射性物質からの直接線とスカイシャイン線に対しては、周辺監視

* Yasuharu OKAMURA NPO法人放射線安全フォーラム 理事／日本原燃株式会社 安全・品質本部 副本部長

区域外での線量が合理的に達成できる限り低くなるように、しゃへい材の使用等による設計上の配慮を行うことを基本方針としている。

気体廃棄物及び液体廃棄物の放出による一般公衆の実効線量は、約0.022mSv/年と評価されている。この値は、自然放射線から受ける実効線量である約2.1mSv/年（日本人の平均）の約100分の1である。また、直接線及びスカイシャイン線による実効線量は、約0.005mSv/年と評価されている。

3. 環境モニタリング計画の策定

六ヶ所再処理施設の環境モニタリングの策定にあたり、昭和60年度から青森県による環境放射能調査が開始されるとともに、専門家による「原子燃料サイクル環境放射能総合調査検討会」が設置され、モニタリングの結果及び将来のモニタリング計画の検討が開始された。

この検討結果を踏まえ、平成元年3月「原子燃料サイクル施設に係る環境放射線等モニタリング構想、基本計画及び実施要領」が策定され、操業前モニタリングとして本格的なモニタリングを開始した。基本的考え方として、青森県及び事業者で環境モニタリングの対象地区を分担し、トータルとして施設周辺全体のモニタリングが行われ、地域全体として整合が取られるようにすることとした。具体的には、事業者は、施設からの影響の有無をみるという立場から施設の近傍を、青森県は、住民の立場に立って、その外側を受け持つこととした。ただし、施設近傍の主要な集落においては、青森県としても確認のためのモニタリングを行うとした。

環境モニタリングの結果は、県内の他の事業所の結果と合わせて四半期ごとに青森県環境放射線等監視評価会議において審議され、公開されている。また、モニタリングポスト、モニタリングステーション等による連続監視データのリアルタイムデータ等を日本原燃のホームページ等で公開している。

4. アクティブ試験における環境モニタリングの経験

再処理施設のしゅん工に向け、施設・設備の安全機能、生産性能、運転操作性・保守性等について、段階的に試験を行うことにより確認することとしており、これまで、水、水

蒸気等を用いた通水作動試験、硝酸等の化学薬品を用いた化学試験、ウランを用いたウラン試験を終了し、現在は、2006年3月31日に開始した、使用済燃料を用いた総合試験（アクティブ試験）の最終段階にある。

アクティブ試験は、使用済燃料を用いて、プルトニウム、核分裂生成物等の取り扱いに係る安全機能及び機器・設備の性能を確認するものであり、環境への放出放射線量についても確認項目としている。

再処理施設の操業に伴い放出される放射性物質による施設周辺住民等が受ける線量評価値は約0.022mSv/年と、線量限度の1mSv/年を十分下回るものの、放出される放射性物質に起因する放射線（能）は、環境放射線モニタリングにおいて施設寄与分として検出され得るレベルのものであり、また、1年間の積算値又は平均値としては有意な増加が認められない場合でも、短期間では測定値に比較的大きな変動が予想される。アクティブ試験においても、使用済燃料を用いた処理を行うことから同様の測定値の上昇が予想される。このため、青森県等の関係機関に対して、あらかじめ再処理施設の操業に伴う環境モニタリング項目への施設寄与分の予測値を示し、環境試料等に有意な施設寄与分が検出されることはあるが線量としては小さく健康に影響を与えるものではないことを理解していただくための活動を行った。

施設寄与分の予測値の一例として、Kr-85による空間線量率への影響を表1に示す。

モニタリングステーションにおける自然放射線による空間線量率は、通常20～30nGy/h、最大で100nGy/h（降雨雪時）程度が観測されているが、再処理施設から放出されるKr-85により、気象条件等によっては、一時的に100nGy/h以上の上昇も考えられる。ただし、その出現頻度は低いと予測している。

アクティブ試験では、2006年から2008年にかけて

表1 再処理工場の操業に伴うKr-85による空間線量率への影響

測定項目	施設寄与分 (増分とその頻度)の予測値(*1)			これまでの測定値 (*2)		
	尾駸局 (*3)	10以下 10～40 40以上	99.83% 0.16% 0.01%	尾駸局	平均 最大 最小	5 96 13
空間線量率 (nGy/h)						

(*1) 短期間の運転条件及び気象条件を想定した際の空間線量率の大きさ及びその頻度の試算値

(*2) 期間は2001年4月～2004年3月

(*3) モニタリングステーションのうち、気象条件等からKr-85による線量率への寄与が最も大きいと考えられる尾駸局について試算

て、約425t・U_{Pr}の使用済燃料のせん断・溶解をはじめとする処理を行った。これに伴い、放射性気体廃棄物及び液体廃棄物の大気放出及び海洋放出が行われた。アクティブ試験期間における主要な核種の放出量を表2及び図1に示す。

Kr-85は、せん断・溶解処理に伴って放出されるため、再処理量がゼロになって以降は放出されていない。なお、2012年度は、ガラス固化試験に伴い、高レベル放射性廃液中のキュリウム等の自発核分裂等により生成する放射性希ガスが検出されている。

その他の核種も主に燃料の処理に伴って放出さ

れたが、その後も、工程中の溶液等に残存し、放出管理目標値に比べるとわずかな割合であるが、放出が検出されている。

環境放射線モニタリングでは、Kr-85により、空間線量率に対して、最大で5nGy/h（1時間値）の施設寄与分があったと評価された。その他、空気、雨水、湖沼水、海水、農海産物において、施設寄与分と考えられるKr-85、C-14及びH-3の上昇が認められた。これらを、再処理事業指定申請書における公衆の線量評価手法を用いて、再処理施設が最大処理能力（800t・U_{Pr}/年）で本格操業した場合の予測計算値及びアクティブ開始以前の測定実績と合わせて、表3に示す。

アクティブ試験に用いた使用済燃料の条件は、事業許可指定申請書の条件に比べ全般に冷却期間が長く、燃焼度が低い等、放出量が小さくなる条件であったという要因もあるが、アクティブ試験中における環境放射線モニタリングの結果再処理施設の環境への影響は、予測値に比べ十分小さかった。

また、環境への放出実績を用いて公衆の実効線量を評価した結果は、

表2 六ヶ所再処理工場からの放出実績

核種	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度
Reprocessed fuel	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
H-3(ocean)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
I-129(ocean)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
I-131(ocean)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
Kr-85(atm.)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
H-3(atm.)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
C-14(atm.)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
I-129(atm.)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
I-131(atm.)	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04

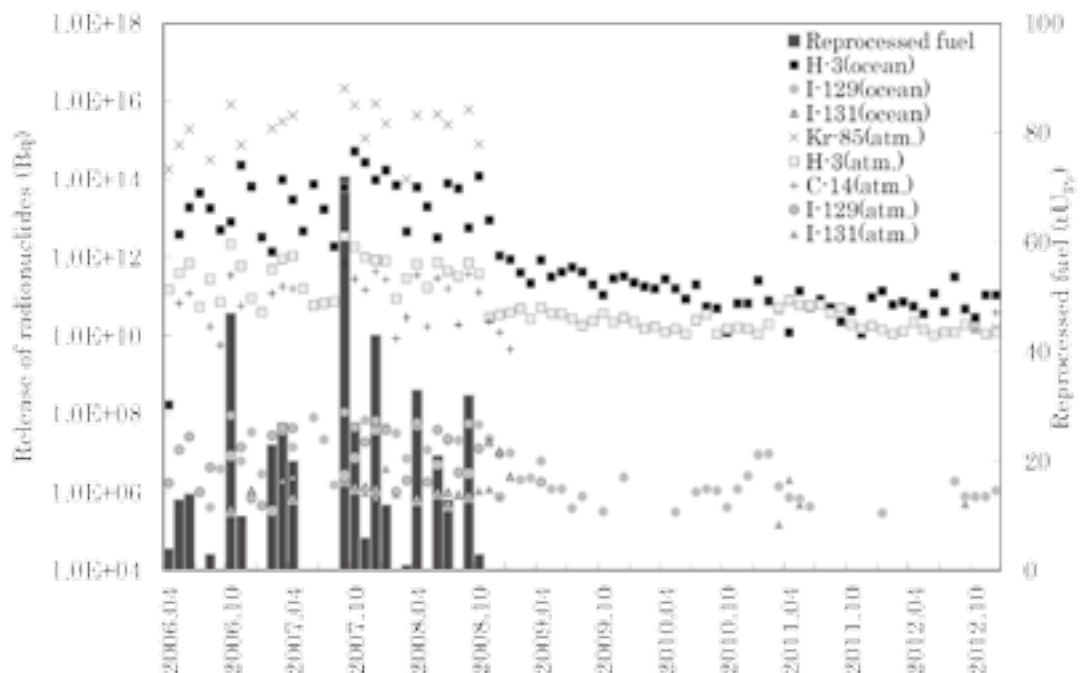


図1 六ヶ所再処理工場からの放出実績

表3 測定結果(最大値)と予測計算値との比較

測定対象	測定値(最大値)	予測計算値	過去の測定値
線量率 (nGy/h)	5 (*1)	200	96 (最大)
大気中Kr-85 (kBq/m ³)	11	150	ND (< 2)
大気中トリチウム (Bq/m ³)	ND(<0.04) (参考値0.015)(*2)	1 (*3)	ND (<0.04)
雨水中トリチウム (Bq/L)	12	—	
湖沼水中トリチウム (Bq/L)	4	—	
海水中トリチウム (Bq/L)	4	300 (*4)	ND (< 2)
魚類組織自由水中トリチウム (Bq/kg・生)	3	300	ND (< 2)
精米中C-14比放射能 (Bq/gC)	0.26(BGを含む)	0.44(BG(0.23)を含む)	
葉菜中C-14比放射能 (Bq/gC)	0.27(BGを含む)	0.44(BG(0.23)を含む)	

NDは定量下限値未満であることを表し、定量下限値を()に示す。

(*1) Kr-85寄与分 (*2) 定量下限値未満であるが有意な測定値

(*3) 年間平均値 (*4) むつ小川原港湾区域域内年平均值

過去の測定値の期間

・積算線量: 1999年4月～2004年3月

・環境試料: 1989年4月～2004年3月 (ただし、精米のC-14は1995年4月～、魚類のトリチウムは1998年4月～)

2006年度について0.00054mSv、2007年度について0.00132mSv、2008年度について0.00057mSv、2009年度について0.000037mSvと、いずれの年度も、線量限度である1ミリシーベルト未満であった。

力発電所事故に起因する核種を検出した。代表的な事例を図2に示す。検出されたのはいずれも微量であり、健康に影響を与えるレベルではなかった。

5. 福島第一原子力発電所の事故の影響

六ヶ所再処理施設は東京電力(株)福島第一原子力発電所から北方約400kmの直線距離があるが、2011年3月以降の環境モニタリング結果において、I-131、Cs-134、Cs-137等、東京電力(株)福島第一原子

6. 緊急時の環境モニタリング

再処理施設に異常事象または非常事態が発生した場合に供え、空間線量率等の監視、環境試料の採取・測定等を迅速かつ的確に実施できるように、緊急時環境モニタリング計画を策定し、対応要員の招集・配置体制の整備、緊急時用資機材の配備

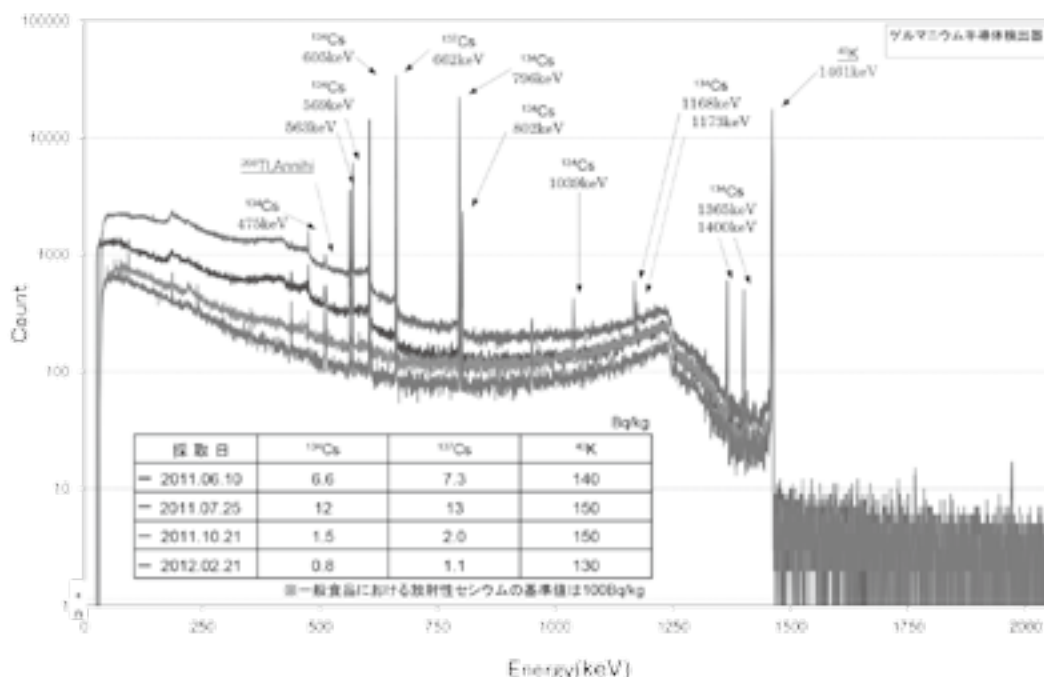


図2 ヒラメにおけるγ線スペクトロメリー分析結果

等を行っている。

再処理施設は、核分裂反応で発生させたエネルギーを取り出して発電する原子力発電所と異なり、通常状態では大きなエネルギーは発生しないなどの特徴がある。このため、原子力災害対策指針に定める原子力災害対策重点区域について、予防的防護措置を準備する区域（PAZ）については不要とされており、緊急防護措置を準備する区域（UPZ）については再処理施設からおおむね半径5 kmを目安として設定されている。

緊急時環境モニタリングにおいては、原子力災害対策指針に基づき、緊急時活動レベル（EAL）により緊急事態区分を判断して対応体制を整え、UPZ内を主な対象に、運用上の介入レベル（OIL）に基づく迅速な判断と緊急時防護措置が行えるように活動する。

なお、敷地外の環境モニタリングの実施項目や頻度等については、国の設置する緊急時モニタリングセンター（EMC）において国、地方自治体と連携を図りながら実施する。

また、緊急時の環境線量予測のためのシステムとして、“JEEPS（JNFL Emergency Effect Prediction System）”を導入している。気象庁から配信される気象予測の領域モデルのGPVデータを初期値及び境界値として大気力学モデルにより気象予測計算（最長約2日間先まで）を行い、放射性プルームからの外部被ばく、吸入摂取による内部被ばく、地表への沈着による外部被ばくの予測値を得ることができる。モニタリングカーの出動地点の選定などに活用している。

7. 新規制基準への対応

福島第一原子力発電所の事故を受けて制定された新規制基準への適合性審査への対応として、安全設計での想定を超えて安全機能が喪失したことを想定し、重大事故等の発生を防止するとともに重大事故等による影響を低減するための対処を追加している。

環境安全に関連する放射線監視設備として、重大事故等が発生した場合に再処理施設から放出される放射性物質の濃度及び線量の監視・測定のために、常設の設備が使用できないときのための代替の可搬型排気モニタリング設備及び可搬型試料分析関係設備を配備する。必要な数量は、それぞれ1セットであるが、故障時及び保守点検による

待機除外時のバックアップを考慮して3セットを、分散を考慮して3箇所の保管場所に配備する。

周辺監視区域境界付近における空間線量率及び空気中の放射性物質の濃度の監視並びに気象観測について、常設の設備が使用できないときのための代替の可搬型環境モニタリング設備として可搬型線量率計及び可搬型ダストモニタ並びに風向風速計、日射計、放射収支計及び雨量計で構成される可搬型気象観測設備を配備した。可搬型環境モニタリング設備は、非常用所内電源系統からの給電が可能な設計とするとともに、モニタリングポスト用発電機からの給電が可能な設計としている。

これらの電源が喪失した場合に備えて、専用の発電機を有する設計としている。

可搬型環境モニタリング設備は、その測定値を再処理施設緊急時対策所に伝送し、表示できる設計としている。必要な数量を5セットとし、故障時及び保守点検時の待機除外によるバックアップを考慮し、15セットを、分散を考慮した3箇所の保管場所に5セットずつ保管する。また、敷地周辺の空間線量率及び空気中の放射性物質濃度を迅速に測定するため、空間線量率測定器、ダストサンブラ等を搭載した無線通話装置付きの放射能観測車、環境放射線サーベイ機器を配備している。

8. 今後の対応

六ヶ所再処理施設から環境に放出される放射性気体・液体廃棄物等による環境影響について、アクティブ試験への準備等を通じ、施設寄与分の予測値を含め国、地元自治体、住民、報道機関等に対する説明を行い、理解を進めてきた。しかし、アクティブ試験の開始から10年以上を経過して世代交代があること、福島第一原子力発電所の事故により環境への影響に関する公衆の関心が高まっていると思われることから、これまで蓄積した環境モニタリングの経験を活用し、しゅん工を目指し、さらに丁寧かつ正確な説明を行っていくことが必要であると考ええる。

著者プロフィール

1981年、東京大学工学部原子力工学科を卒業し、日本原燃サービス株式会社（当時）に入社。六ヶ所再処理施設の安全審査に従事し、主に放射性廃棄物の放出による環境影響評価を担当。1998年、六ヶ所村勤務となり、日本原燃株式会社再処理事業所における現場の放射線管理業務に従事。その後、環境管理センター長等を経て、現在、安全・品質本部において放射線安全・環境管理センターの担当として勤務。

コラム
5th
Column

中川 恵一

東京大学医学部附属病院

私も膀胱がんを経験していますが、がんはわが国の「国民病」です。年間、100万人を超える人が新たにがんと診断され、37万人以上がこの病気で命を落としています。戦前からがん死亡数は一貫して増え続けており、減少に転じるきざしも見られません。一方、欧米では、日本における脳卒中や結核による死亡と同様、すでに峠を越えています。先進国のなかで、がん死亡が増え続けているのは日本くらいなのです。人口10万人あたりのがん死亡数では、日本は米国よりナント6割！も多くなっています。

日本人の死亡原因の約3割が、がんですが、日本人が罹患する確率は50%を超えています。アバウトに言えば、日本人の2人に1人以上が、がんになると言えます。正確には、日本人男性のがん罹患リスクは生涯で62%、女性でも47%に上ります。しかし、この数字は2014年のものです。日本はがんの罹患情報を集約する「がん登録」制度の整備が遅れており、2016年の1月からやっと始まったばかりで、最新データが5年以上前のものとは、正直、情けない状態です。

この生涯がん罹患リスクは、長期的には上昇傾向にあり、2019年では男性65%、女性でも50%程度まで上昇するはずです。つまり、現在、日本人男性の3人に2人、女性でも2人に1人が、がんになる計算です。

発がん原因の半分以上が生活習慣によるものですから、喫煙率や飲酒率などの男女差が、発がんリスクの男女差につながっていますが、54歳までの若い世代では女性の方のがんが多いため、要注意です。また、女性の喫煙率が上昇傾向にある点も気がかりです。

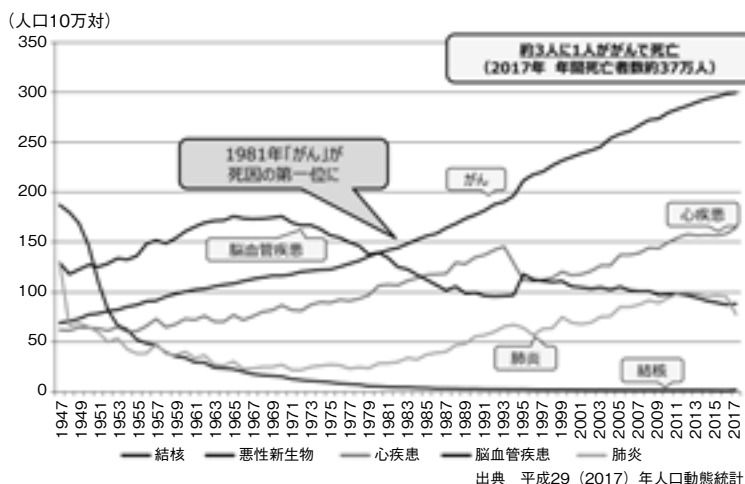
日本人男性の喫煙率は3割程度、女性では1割弱ですが、ヨーロッパ諸国では男女の喫煙率に日本ほどの男女差はありません。スウェーデンなど女性の喫煙率が男性を上回る国さえあります。これは、女性の就業率の高さが一つの理由だと思います。仕事に伴うストレスは人をたばこに向かわせるのかもしれませんが。女性も働くのが当たり前になった今日の日本でも女性の喫煙率をもっと高くなる可能性があります。そうなれば、男女とも3人に2人が、がんになる時代を迎えるはずです。

さて、がんはよほど進行しないかぎりは「症状が出にくい病気」です。早期がんでは、症状が出ることはまずありませんから、元氣なうちに検査をする「がん検診」が大事です。しかし、がん検診の受診率は3～4割と欧米の半分程度です。

がんの治療でも、手術偏重で、放射線治療も欧米の半分程度にすぎませんし、体と心の痛みをとる「緩和ケア」も遅れています。

がんはわずかな知識の有無で運命が分かれてします病気です。この連載を参考にがんから守って頂きたいと思います。

我が国における死亡率の推移（主な死因別）



第14回 放射線モニタリングに係る国際ワークショップ ポスター賞 受賞記

2018年12月8日(土)、9日(日)の2日間にわたり、第14回放射線モニタリングに係る国際ワークショップ(The 14th International Workshop on Ionizing Radiation Monitoring: IWIRM14)が開催されました。IWIRM14では大学院生を中心に、放射線測定技術に関わる様々なポスター発表が66件行われました。今回は、1日目と2日目それぞれで参加者による優秀ポスター発表の投票を行い、各日の1位から3位までに優秀ポスター賞が授与されました。また、本年9月に広島市で開催される第19回固体線量計測会議(SSD19)の参加費免除が副賞として授与されるSSD19 Awardが選出されました。各日の優秀ポスター賞1位(金賞)を受賞された、Chryzel Angelica B. Gonzales氏(広島大学大学院)およびAizhan Shakayeva氏(長崎大学大学院)ならびにSSD19 Awardを受賞された石川諒尚氏(名古屋大学大学院)にポスター発表の内容と受賞記をご寄稿いただきました。



Chryzel Angelica
B. Gonzales
(広島大学大学院)

本研究では、放射線災害の対応において人間の手指爪の電子スピン共鳴(ESR)信号を用いることを、個々の放射線反応分析に焦点を当てて検討する。本稿では、健康な状態のドナー7名(アジア人種)から採取し、0、35、70Gy線量の管理曝露条件下で*in vitro*照射したヒトの手指爪について報告する。試料には、セシウム(^{137}Cs)線源の γ 線を0.857Gy/minの線量率で照射した。照射した手指爪をXバンドESRスペクトロメーターで28日間測定し、測定の合間には常に真空乾燥器(湿度30%、室温20℃)に保存した。試料は、ある特定の爪切りを用いて採取し、その他に特別な処置は行わなかった。真空保存した手指爪の放射線生成信号(RIS)の直線性の程度、安定性などの関連する特徴を検討した。ドナー全員

の手指爪で測定されたRISは24時間の間に速やかに減衰したが、測定の3日後にはある一定水準に達したことを確認した。線量反応曲線はドナー間で有意差が認められたものの、若年ドナーの手指爪試料には比較的大きな直線性が認められた。手指爪は0~70Gy範囲の吸収された放射線量を測定できることが本研究の予備結果より示唆されたことから、想定外の放射線事故や医療過誤が起きた場合の遡及的線量測定の有用なツールにできる可能性がある。しかしながら現状は、放射線生成信号の速やかな減衰を止めるべくさらなる調査が必要な段階である。このように、爪の線量測定を実際に使用するには、適切な保存条件やその他の物理的/生理学的因子を考慮しなければならない。

IWIRM14において、最優秀ポスター発表に送られる「金賞」を受賞したことを非常に光栄に思います。正直なところ、博士号を取得するまでの過程は容易ではなく、実際には山ほどの課題があります。ワークショップには、尊敬する線量測定の実験家の多くの方々ご参加していましたので、この賞の受賞は私にとって極めて幸運な出来事です。選ばれるべきふさわしい候補者の方々が非常に多くいらっしゃいますので、この審査は難しい仕事であったに違いありません。私達の研究に対する評価がこのような大きいことに心から感謝申し上げます。一人の人間による仕事というものは人生においてほとんどありません。そして今回も例外ではありません。私を信頼し、多大なる貢献をいただいた同僚達と教授陣の方々にこの場で深く感謝申し上げます。IWIRMに参加することは常に学習体験となっています。今回の受賞がさらなる励みとなり、今後新たなやりがいある研究に取り組む熱意も湧いています。

はじめに、2018年12月8~9日に茨城県大洗町で開催されたIWIRM14において、私の研究を発表する素晴らしい機会を与えてくださった株式会社千代田テクノルにお礼申し上げたいと思います。私はカザフスタン出身の、長崎大学・福島県立医科大学 共同大学院の修士課程2年生の



Aizhan Shakayeva
(長崎大学大学院)

Aizhan Shakayevaと申します。このコースでは、災害・被ばく医療科学と放射線生物学、特に、放射線によるDNA損傷の修復機構について研究しています。ご存知のとおり、放射線被ばくは多くの健康影響を引き起こし、主に細胞死やゲノムDNA変

化の原因とされています。細胞死やゲノム変化はDNA損傷が正しく修復されないことで起こります。そのため、放射線によって生じるDNA損傷が正常に修復されるメカニズムを解明することは極めて重要です。放射線は100種類以上のDNA損傷を引き起こしますが、その中でもDNA二重鎖切断 (DSB) が最も修復が難しく、しばしば細胞死やゲノム変化を引き起こします。IWIRM14では、DSB修復とスプライシング因子との関係を検討した研究を発表しました。

研究の要旨は次のとおりです：細胞が電離放射線 (IR) に被ばくすると多様なDNA損傷が起こる。DNA損傷の中でもDNA二重鎖切断 (DSB) は、正常に修復されない照射後に細胞死や染色体異常を引き起こす。したがって、細胞の恒常性やゲノムの完全性にはDSBの正常な修復が不可欠である。pre-メッセンジャーRNA (mRNA) スプライシングは成熟mRNAの生成に必要な細胞機構である。興味深いことに、最近行われたDSB修復因子のスクリーニングによって、スプライシング因子がDSB修復、特に相同組換え (HR) に関与することが明らかにされた。しかしながら、スプライシング因子がどのようにHRに関係するのかについては解明されていない。本研究では、pre-mRNAスプライシング因子SART 1がHRを促進する機構を解明しようと試みた。short interfering RNA (siRNA) を介してSART 1の発現を抑制すると、S/G 2期において、HRの第1ステップであるDSB末端の削り込み (Resection) の減少が見られた。SART 1の発現抑制により、HRの第2ステップであるDSB末端へのRAD51タンパク質の集積も抑制された。BRCA 1もSART 1と同様にResectionとRAD51の集積を促進することから、私達は次にSART 1とBRCA 1との関係について検討した。SART 1の発現を抑制したところ、BRCA 1のDSBへの集積が著しく低下した。さらに免疫沈降法により、

SART 1とBRCA 1の物理的な相互作用が確認された。以上の結果から、SART 1は直接的な相互作用を介してBRCA 1をDSBに集積させ、それによりHRを促進することが示唆された。

今回の研究の意味を人々に伝えることは私にとって非常に意義深いことでした。そして、非常によい結果になったと思います。正直なところ最初は、受賞することは期待していませんでしたし、他の参加者の方々のポスターや活動を拝見して、自分が賞を受賞する可能性はないのではないかと考えていました。しかし受賞した瞬間、このプロジェクトに注いだあらゆる努力が無駄ではなく、勝利に値するようだという事に気づきました。このように結果にすぐにつながった経験は初めてです。こういったところが長崎大学アイソトープ実験施設の当研究室の長所であり、私の独創力と努力を強く支えてくれたのだと思います。

このワークショップに参加して、今後のスピーチへの自信が増し、この受賞のおかげで新たな目標やアイデアに挑戦する意欲が湧きました。将来的には、現実的な利益をもたらす科学者になりたいと考えています。科学は進歩するため、やらなければならないことは山積みですが、その進歩に遅れることなく進まなければならないと考えています。



石川 諒尚
(名古屋大学大学院)

この度は、SSD19 Awardを受賞させていただき、日々研究を支えてくださっている瓜谷先生、渡辺先生をはじめ、数々のご助言やご協力を賜りました諸先生方や研究室の諸先輩方に心より感謝申し上げます。

本ワークショップでは、我々の研究室で開発を進めている光ファイバ型中性子検出器に関して発表させていただきました。今日、日本人の死因別死亡率第一位となっているがんの新たな治療法にホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) があります。BNCTでは、がん細胞に集積する性質をもったホウ素薬剤を患者に投与し、外部から中性子線を照射することで ^{10}B (n, α) ^7Li 反応を起こし、 α 線と ^7Li 線の高いエネルギーと短い飛程を利用して選択的にがん細胞を破壊します。BNCTを行う上で、ビームの品質管理や照射中性子量の適切な評価のため、現在中性子計測

において広く行われている金箔放射化法による事後評価に代わるリアルタイム計測手法が求められています。そこで我々の研究グループでは、光ファイバの先端に小片シンチレータを配した光ファイバ型中性子検出器の開発を進めてきました。この検出器のもつ利点として、検出器の体積が極めて小さいため狭い空間で中性子場をほとんど歪ませることなく計測を行うことができ、小片シンチレータを用いるため高強度な場でも飽和せずγ線に対して低感度な計測を行うことができ、さらに検出器の有感部と光電子増倍管などの電気回路を隔離することで被ばくによる機器の劣化を防ぐことができます。本研究では、使用する小片シンチレータの質量を高精度電子天秤により管理することで中性子コンバータの量を制御し、任意の中性子感度を有する検出器の製作が可能となりました。また、得られた測定データに対して、シンチレーション光の減衰に起因する高計数率下における波高値の過小評価と数え落としの補正を施すことで、100kcpsを上回る高計数率下においても出力線形性を保つことができ

るようになりました。今後は、製作した検出器を用いてBNCT場のキャラクタリゼーションを行い、ビームの品質管理や患者の被ばく管理への実用化に向けた課題に取り組んでまいりたいと考えております。

この度SSD19 Awardを受賞させていただき、受賞の喜びを感じますとともに、今後はこの放射線計測分野の発展に貢献できるよう、より一層精進してまいりたいと考えております。



ポスター賞受賞者

2019年 製薬放射線研修会

(第21回製薬放射線コンファレンス総会)

- 会 期：**2019年 6月28日(金) 10:30~17:45 (受付開始: 10:00)
会 場：大田区産業プラザPiO 3F 特別会議室 (東京都大田区南蒲田 1-20-20)
主 催：製薬放射線コンファレンス (PRC)
 ・総 会 10:30~12:00
 「PRC活動報告等」
 ・研修会 13:00~17:45
 特 別 講 演「放射線障害防止法関連の最近の動向(仮題)」原子力規制庁担当官
 招待講演1「軟β核種(H-3、C-14等)による内部被ばくの測定・評価について」
 馬田敏幸(産業医科大)
 招待講演2「RI廃棄物の現状について」日本アイソトープ協会 環境整備課担当者
 公 開 対 談「事故発生! そのとき主任者はどうする?(仮題)」
 矢鋪祐司(日本たばこ産業(株))、池本祐志(日本農薬(株))
 ・交流会 大田区産業プラザPiO 4F レストラン「コルネット」18:00~20:00
【参 加 費】 [研修会] 事前申込: 5,000円、当日受付: 6,000円
 [交流会] 5,000円
【事前申込締切】 6月14日(金)
【参加申込】 以下のウェブサイト内の研修会参加申込フォームからお申込下さい。
 製薬放射線コンファレンスホームページ <http://www.web-prc.com/>
 ※会場の関係で席には限りがありますので、事前申し込みをお勧めします。
【問 合 先】 2019年製薬放射線研修会準備委員会事務局
 E-mail: administration_2019@web-prc.com

図説 量子ビーム・放射線利用

－第4回 ポリマーを創る・操る－

大洗研究所 特別研究員 岡田 漱平

1. はじめに

我々の周りには、台所・お風呂場・茶の間からビル・工場・自動車・航空機まで高分子（ポリマー）の製品があふれている。そして、これらのうちかなりの部分が量子ビーム・放射線（以降、用語を「量子ビーム」に統一することにする）を使って作られている。このことは意外と知られていない。

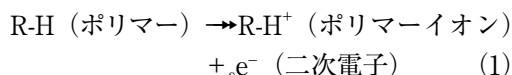
そこで今回は、量子ビームを用いたポリマーの創製・改質の原理とその応用を、例によってファインマン図形を使って解説する。

2. 婚活中の男女のような…を量子ビームで生成させる

図1に、電子線やガンマ線などの量子ビー

ムをポリマーに入射した場合にまず何が起こるかを示す。この図ではポリマーの代表例としてポリエチレンを描いているが、他のポリマーでも起こることは同じである。ここで、ポリマー中のひとつの水素原子Hに注目し、ポリマーのH以外の残りの部分をRであらわして、ポリマー全体としてはR-Hと表記することにする。「-」はRとHとの結合をあらわす。

R-Hに量子ビームを入射すると、量子ビームは物質中でエネルギーを失っていくが、失ったエネルギーがイオン化に使われた場合は、プラスの電荷を持ったポリマーイオンR-H⁺とマイナスの電荷を持った電子e⁻の対が生成する。この電子のことを「二次電子」という。本稿ではこれを特に「_se⁻」と書くことにする。



(→は量子ビームの照射をあらわす)

この二次電子は最初のうちまだまだ元気がいいので、図1の入射電子と同じようにイオン化を起こしてさらに二次電子を生み、その二次電子がまた…、といった具合に鼠算式に二次電子を増殖していく。

そうして、もとの入射量子ビームと一緒にR-Hを攻め立てるうちにRとHとの結合を切ることがある。この結

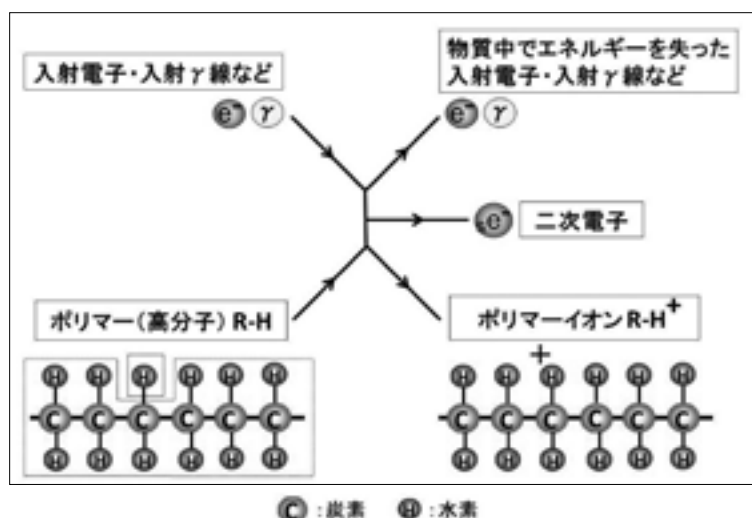


図1 二次電子の生成

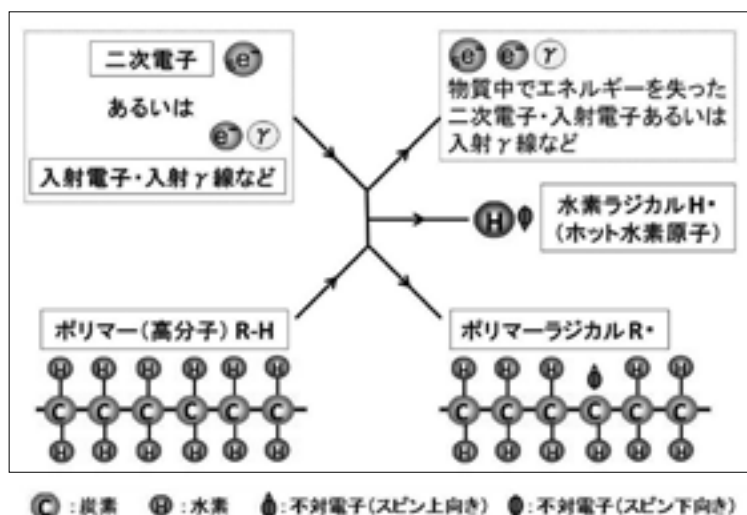
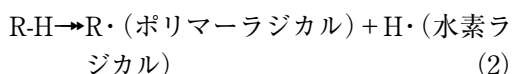


図2 ポリマーラジカルの生成

合というのは、Rが電子(「 $\cdot$ 」であらわす)を1個提供し($R\cdot$)、Hも電子 $\cdot$ を1個提供して($H\cdot$)、この2個の電子が共有されて $R:H$ (すなわち $R-H$)という結びつきができていものである。この結合が切られてしまうわけであるから、結果としてもとの $R\cdot$ と $H\cdot$ に分かれることになる。この $R\cdot$ のことをポリマーラジカル、 $H\cdot$ のことを水素ラジカル(あるいはホット水素原子)と呼ぶ。またこのときの「 $\cdot$ 」のことを「結合すべき相手がいない電子」という意味で「不対電子」という(図2)。



「ラジカル」というのは化学的に活性の高い(化学反応を起こしやすい)化学種のことで、「結合すべき相手を探している」まるで婚活中の男女みたいなものである。

3. 量子ビームプロセスはクリーンで省エネ

上で述べたラジカルを生成させることが、ポリマーを改質したり、新たなポリマー材料を創るための出発点となっている。これを「開始反応」と呼ぶ。

開始反応を起こさせる方法としては反応性

の高い薬品を使う手もある。しかし、激しく反応する化学物質というものは厄介な代物で、残留した場合には環境を汚染する恐れがある。量子ビームを使えばこれを避けることができる。

熱によって開始反応を起こす場合も多い。では、開始反応に使われるエネルギーは熱に換算するとどれくらいになるだろうか。図1や図2のように $R-H$ をイオン化したり結合を切ったりするのに必要なエネルギーは10eV程度である。

熱エネルギー E と絶対温度 T との関係式、

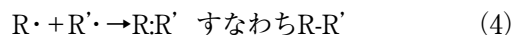
$$E \sim k_B T \quad (3) \quad (k_B: \text{ボルツマン定数})$$

を使って計算すると、10eVは十萬℃に相当する。一方、工業用の電子加速器などのビーム出力はだいたい100kW程度であり、家庭用のハロゲンヒーター100台分の消費電力と同程度である。

量子ビームを使ったプロセスはクリーンで省エネなのである。

4. 頑丈な体をつくる(ポリマーの橋かけ)

図2に示したポリマーラジカル $R\cdot$ が別のポリマーラジカル $R'\cdot$ と出逢うと図3に示すようにお互い惹かれあって(なにしろ婚活中なので)不対電子を提供し合い結合する。



これを「橋かけ」という。これによってタフなポリマーができるので、タイヤ表面の強化、電線の製造などに広く使われている。

「お仲人さん」がいる場合もある。ポリマーラジカルがうじゃうじゃいるところに、先端と末端の両方に不対電子があるような化合物「 $M\cdot$ 」(多官能性モノマーという)があると、



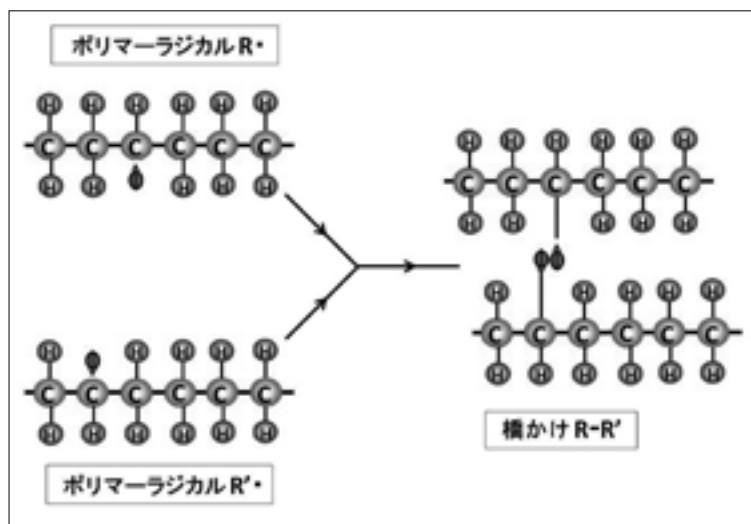


図3 ポリマーの橋かけ

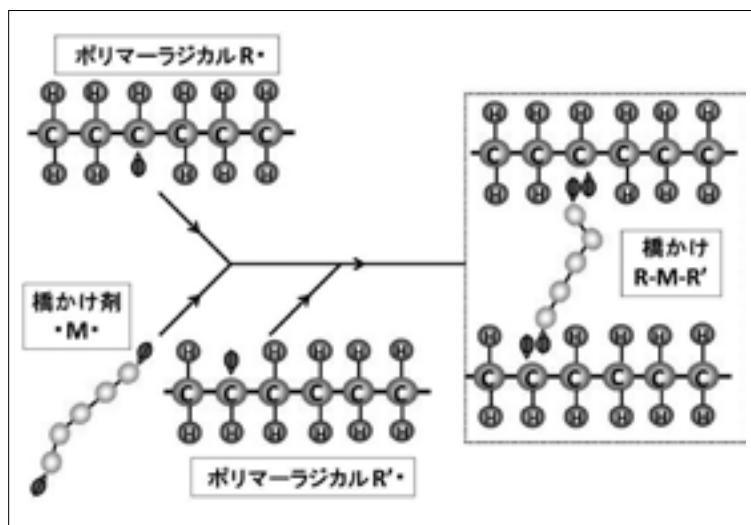


図4 橋かけ剤を媒介とした橋かけ

のように多官能性モノマー（「橋かけ剤」という）が仲をとりもって橋かけができるのである（図4）。

5. 頑丈な体に優秀な頭を乗せる（グラフト重合）

~~~~~

体は筋肉隆々で申し分ないのだが、脳味噌も筋肉になっちゃっていて、ちょっと残念、というような人がいる。頑丈な体に優秀な頭

を繋げられたらいいのに、と思う。実は、植物ではこれができる。「接ぎ木」である。図5に示すように、美味しい実になるけど害虫に弱い木と、不味いけど害虫に強い木とがあったとき、前者（「穂木」という）と後者（「台木」という）の両方にハサミなどで切り込みを入れ、切り口をかみ合わせるによって「美味しくて害虫に強い」新品種をつくることのできるのだ。

ポリマーでもこれと同じような芸当ができる。たとえばポリエチレンは構造的に丈夫なポリマーであるが電気を伝える機能はない。そこで図6に示すように、量子ビームをハサミのように使ってポリマーに切り込み入れたポリマーラジカルR・をつくる。ここに、電気を伝える反応部分（官能基）を持った化合物（電導性モノマーという）M・を混ぜてやる。すると、この官能基という部分も切り込みのようなものなので、両者が合体して「構造的に丈夫で電気を

伝える機能も持つ」新しいポリマーR-Mができる。



これを「グラフト（接ぎ木）重合」という。

R・とM・との結合に、「橋かけ」の項で述べた「橋かけ剤」を仲立ちとして用いる場合もある。

グラフト重合という手法は、量子ビームの独壇場と言ってもいいプロセスである。このようにして電導性を与えられたポリマーは、ポ

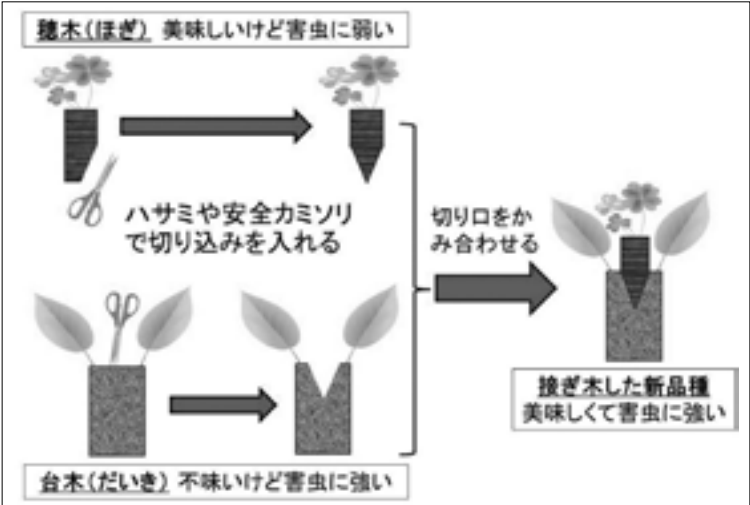


図5 接木のしくみ

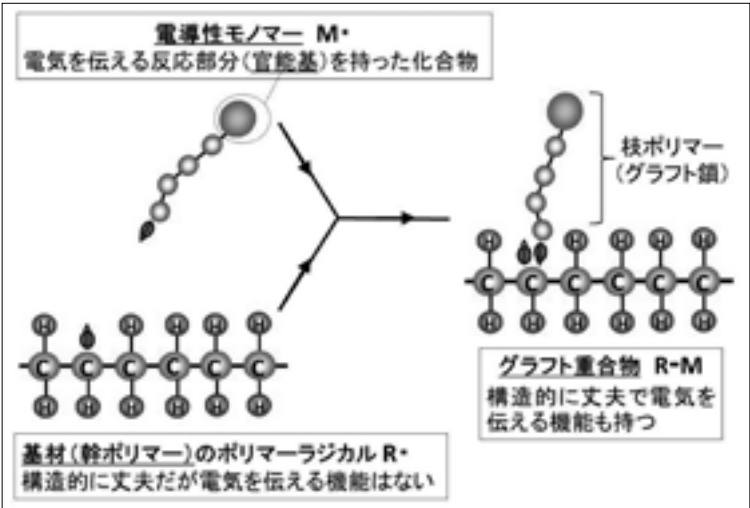


図6 グラフト(接木)重合による機能性ポリマーの創製

表1 量子ビームプロセスを利用したポリマー製品の数々

|      |                                                                                                                                                                                                      |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 橋かけ  | ラジアルタイヤ (自動車)<br>架橋電線 (家電、自動車、航空機)<br>熱収縮チューブ (電子機器、自動車、航空機; 電線接続部保護、防水処理、配管・パイプライン腐食防止)<br>創傷被覆材 (医療)<br>発泡ポリオレフィン (発泡ポリエチレンなど; 家庭用マット、緩衝材、医薬品容器パッキン、自動車用内装材、スポーツ用品)<br>炭化ケイ素繊維 (耐熱機器、宇宙航空機、ガスタービン) |
| グラフト | ボタン電池用隔膜 (カメラ、電卓など)<br>燃料電池膜 (家電、自動車)<br>有用金属捕集 (海水中ウラン、温泉水中スカンジウムなど)<br>有害金属捕集 (放射性セシウムなど)<br>空気浄化フィルター<br>純水製造装置吸着材                                                                                |

タン電池の隔膜などに広く使われている。

また、電導性モノマーの代わりに特定の金属と結合する官能基を持ったモノマーを使えば「金属捕集材」を製造することができる。海水からウランを採る「ウラン捕集材」などが開発されており、福島  
の早期復興に貢献するセシウム捕集用給水器なども実用化されている。

6. 幅広い用途

本シリーズの第2回では、量子ビームが半導体製造分野で広く使われていることを解説したが、量子ビームプロセスを応用したポリマー製品も巷にあふれているのである。

量子ビームによる「橋かけ」と「グラフト重合」の用途の例をまとめて表1に示した。

サービス部門からのお願い

## ガラスバッジの装着について

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださいます。誠にありがとうございます。

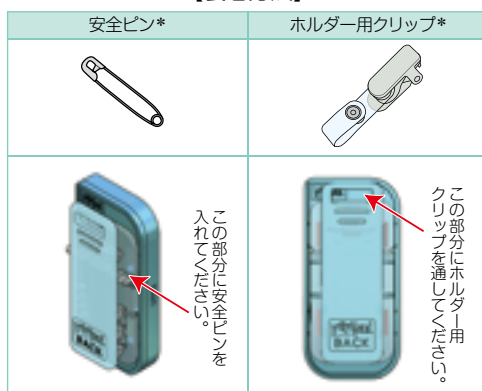
ガラスバッジには市販品の安全ピンやホルダー用クリップを取り付けることができます。お客様のご利用形態に合わせて取り付け、衣服のポケットの内側などにご装着ください。

ガラスバッジのご返却時には、安全ピンやホルダー用クリップは取り外してお手元に保管してください。

なお、ガラスバッジは、本体とクリップが一体型となっていますが、万が一、クリップが本体から外れてしまった場合は、状況によりガラスバッジの交換等の対応をさせていただきますので、最寄りの営業所までご連絡をお願いいたします。

皆様のご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。

### 【装着方法】



(※市販品)

## 編集後記

- 今冬は全国的にインフルエンザが猛威を奮いました。また、これからの時期は花粉症に大いに悩まされることになります。私はインフルエンザは免れましたが、花粉症にとうとうかかったようで、目がしょぼしょぼ涙でうるうるしています。
- 今号巻頭に大阪市立大学医学部附属病院の市田隆雄先生に放射線診療技師（技術者）としての長年のご経験を基に「米国シリコンバレーに憧れて始まったIVRへの関わり～技術者として携わってきた“もの創り”と“しくみ創り”～」と題して執筆いただきました。先生の情熱に感激いたしました。
- NPO法人放射線安全フォーラム／日本原燃(株)岡村泰治氏に、「六ヶ所再処理施設の環境安全について」と題して、六ヶ所施設に関する解説をお願いいたしました。長年に亘って環境安全のために様々な評価、測定などが

行われてきたことをあらためて知ることができました。また、私事です。私も嘗て出向していたことがあり、大変感慨深く当時を思い出しました。

- 2018年12月に開催された第14回放射線モニタリングに係る国際ワークショップでポスター賞を受賞された3名の研究者の方々からそれぞれ受賞記を寄稿いただきました。若手研究者の方々がそれぞれの国で大いに活躍されることを心よりご祈念いたします。
- 弊社大洗研究所の岡田淑平アドバイザーから4回目の連載記事を掲載いたしました。
- 東京大学医学部附属病院の中川恵一先生から5回目となるコラムを掲載いただきました。「発がん原因の半分以上が生活習慣」であること、また、「がん検診」の重要性を肝に銘じておく必要をあらためて痛感しました。

(谷口 和史)

## FBNews No.509

発行日／2019年5月1日

発行人／山口和彦

編集委員／今井盟 新田浩 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘

谷口和史 岩井淳 片桐和真 小口靖弘 高橋英典 和田卓久

発行所／株式会社千代田テクノ

所在地／〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

<http://www.c-technol.co.jp/>

印刷／株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体371円)