



Photo Kiranori Kirano

Index

日本の食品や水に設定されているセシウム137の濃度基準値は心配ですか？ ～ <i>in vivo</i> 実験と <i>in vitro</i> 実験からわかった 子孫への影響と発がん性～ ……………	中島 裕夫	1
ISO/TC85/SC2が牽引する放射線防護の国際標準化 － 国際規格開発の仕組みと我が国の貢献－ ……………	山田 崇裕	6
[コラム] 86th Column 【がんは「コントロールできる病気」 —— 健康とエネルギーの密接な関係】 ……………	中川 恵一	11
[学生応援企画] 東京都立大学理学部化学科同位体化学研究室のご紹介 千葉 祐亮/魏 寅/アブダラ エルショバギ …………… ハナフィ アハメド/東福 滯和		12
[放射能・放射線単位・元素名の由来] 第13回 フェルミウム ₁₀₀ Fm: fermium ……………	高橋 正	17
JCO臨界事故から26年が経過して思うこと ……………	加藤 和明	18
[サービス部門からのご案内] 「ご使用者変更連絡票」の「処理区分」をご記入ください!! ……		19

日本の食品や水に設定されている セシウム137の濃度基準値は心配ですか？

～ *in vivo* 実験と *in vitro* 実験からわかった
子孫への影響と発がん性 ～



中島 裕夫*

「数字は嘘を言わないが、嘘を言う人は数字を使う」と言うフレーズが巷にはあります。確かに色々な場面において、数字が重要な役割を果たしているのですが、多くの人にとって特に紛らわしいのが、割合、確率ではないのでしょうか。絶対値で判断できれば良いのですが、多くの場合は、その絶対値が何を意味するかの理解が難しいために、何か既知の値と比較して相対的に示されることが多いのです。また、まずいことに、人は、その数字の表わされ方で、同じ意味のことでも違って受け取る傾向もあります。

例えば、生活費を20%カット（5分の1カット）して生活せよと言われるより、これまでの80%で生活しなさいの方が受け入れられやすかったりするのです。

また、数値の表わし方でも、リスクに対するイメージが変わることがあります。日本人の放射線被曝によるがん罹患リスクは、白血病の相対リスクが1 Svあたり5.84倍になるのに対して、胃がんは1.37倍です。この倍率からすると、白血病が圧倒的に増加するよう見えますが、実際に増加した罹患者数を表わす過剰絶対リスクでは、10,000人/年あたり白血病で3.08人、胃がんで3.61人と胃がんの罹

患者の方が多いのです。これは、もともと日本では自然に胃がんを罹患する人数が白血病より多いので1.37倍でも白血病より患者が多くなるわけです（リスクデータ：UNSCEAR報告書2006年より抜粋）。

このように、数字の出し方によって与えられるイメージが変わることから最初に挙げたフレーズの真実味が出てくるわけです。数値の意味を知ると知らないでは科学的、心情的な許容が大きく変わることになります。

数字の意味する重要なものの一つに基準値、規制値があります。2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の後に日本では、セシウム137の水や食品への含有濃度の規制が、暫定基準を経て、現在の基準値（水は10Bq/kg以下、食品は100Bq/kg以下）に設定されました。国際食品基準（CODEX）では、水、食品ともに1,000Bq/kg以下となっていますから、日本の基準は、水が国際基準の100分の1、食品が10分の1とより厳しい設定になっています。それでも巷では、心配という意見が多く聞かれます。皆さんはいかがお考えでしょうか。確かに、まったくなかったものが新たに食品に混じるのであれば、たとえ微量でも嫌なものです。しかし、セシウム

* Hideo NAKAJIMA 大阪大学 核物理研究センター 特任教授/放射線科学基盤機構 招聘教授/医学系研究科未来医療イメージングセンター 招聘教授

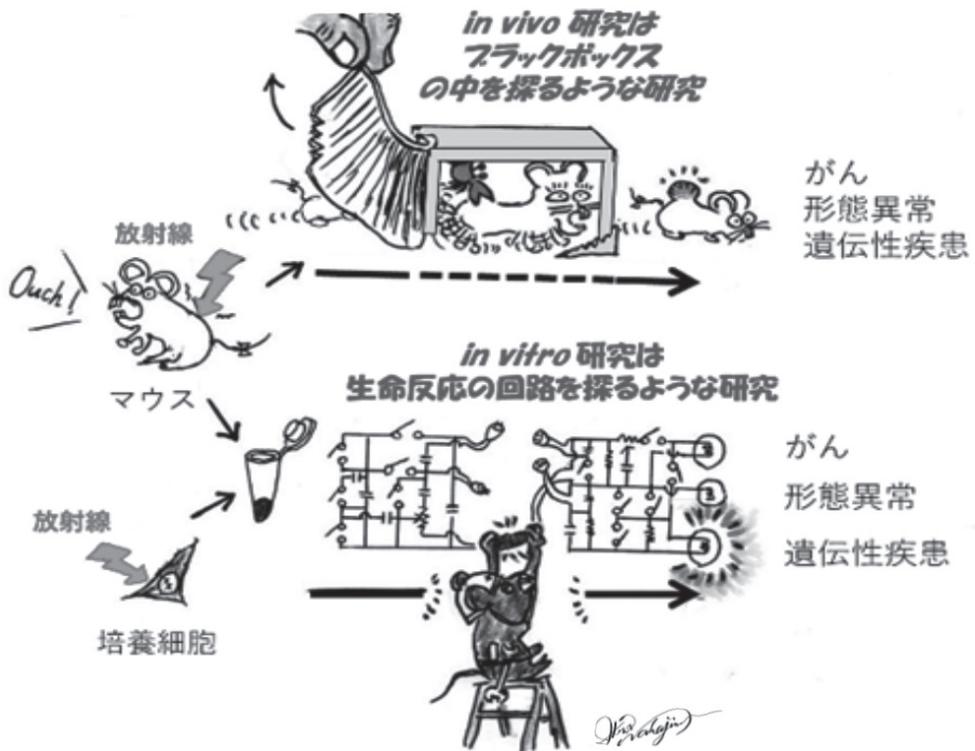
137については、過去の大気圏内原爆実験の名残として、既に全世界の土壤に降り注いでおり、農業環境技術研究所の1959年から50年間の測定によれば、日本の農地土壤には平均20Bq/kg（最大140Bq/kg）ほど、1960年代のピーク時には一日に一人当たり4Bqを食物から摂取していました。事故直前の食品中には、0.1~0.01Bq/kg混入していたことがわかっています。今回の事故により、一部の地域でこの既に存在しているセシウム137にある量が新たに上乗せされる形となります。このようなセシウム137が水や食品に混入した場合に科学的、心情的にはどれくらいの上乗せまで許容できるのか気になるところです。

話はさかのぼりますが、チェルノブイリ原発事故10年後の1996年から1998年にかけてウクライナ、ロシア、ベラルーシの現地調査に赴いた私は、この地域の低線量放射線被曝を

受け続ける人々や動物の子孫が将来どのようになるかが気になりました。そこで、準備を重ねて2007年からヒトより世代交代が速く、次世代に起こる自然突然変異率がヒトとほぼ同じマウスにセシウム137を飲ませながら世代交代をさせる実験を始めました。その4年後に、まさか自分の国でも同じことが起こるとは夢にも思いませんでした。

生物系の研究では、大きく分けると下図に示すように動物個体レベル (*in vivo*) の研究と試験管レベル (*in vitro*) の研究に分けることができます。

In vitro 研究は、細胞内における複雑な生理反応をつぶさに調べて電子回路図のような生理反応の経路図を作成するミクロ的な研究です。一方、*in vivo* 研究は、まさにブラックボックスのような生物のからだの中で何が起きているかを知るためのマクロ的な研究



です。生物系の研究にとっては、車の両輪のようにどちらも重要な研究です。

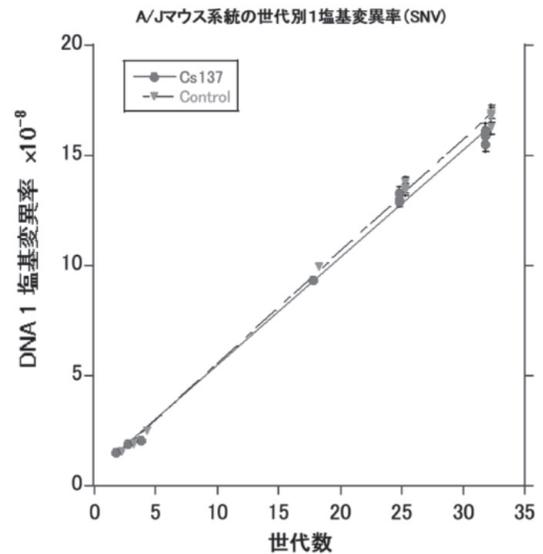
マイクロピペットや遠心チューブを扱って行われる *in vitro* の研究は、今や生物系の研究室では当たり前に見られる光景で、かっこよく見える研究です。一方、糞尿と獣の臭いをからだに染みつかせながら動物の世話が8割がたの動物個体を扱う *in vivo* の研究は、傍目には、地味な研究です。皆さんは、どちらの研究をしてみたいと思いますか？

筆者の行ってきた主な研究は、後者です。なぜなら、我々がセシウム137水を毎世代飲み続けたら子孫はどうなるのかの疑問を解明するには、*in vitro* 研究では無理だからなのです。*In vitro* 研究でも、発がんや遺伝性影響の研究は行われていますが、それは試験管の中での生物反応を見ているようなものであって、ヒトの個体がどのようにになるかを見ているわけではないからです。言い換えると、東京駅に向かっていて新幹線の中で後ろに向かって歩く人は、進行方向とは逆の大阪に向かって歩いているとも言えます。しかし、いずれその人も東京駅に着くことになります。列車をヒトの個体と考えると車内の人の行動は、細胞内で起こっている色々な生理反応に例えることができます。細胞内の反応がたとえ発がんに向かう反応であったとしても、その細胞が、免疫細胞などにより淘汰されれば、個体としてはがんになることはありません。従って、まずは、セシウム137水を代々飲み続けたら個体はどうなるかを見極めてから、その過程を *in vitro* 研究にて裏付けするという手法が理にかなっているのです。

さて、筆者の行った実験では、一組のペアから生まれた子供の雌雄を2つのグループに分けて、一方には、セシウム137水を、他方

には、セシウム137を含まない水を飲料水として自由に飲ませながら兄妹交配を32世代以上繰り返して、子孫マウスの2群間でDNA塩基配列（約25億のDNA塩基対当たり）にどれくらい差が出るか定量的な比較を行いました。

マウスに与えたセシウム137水の濃度は、国際基準（CODEX）の100倍、日本基準の10,000倍量の100,000Bq/kgです。その結果、1、2、18、25そして32世代後（徳川将軍家15世代が約260年間であることを考えると、ヒトでは、550余年の世代交代をしたことに値します）の約25億のDNA塩基対当たりの変異数が、セシウム137群と対照群の間で統計学的に差がない結果でした（下図）。



これまでに、原爆被爆者、放射線治療を受けた小児がん患者、チョルノービリ原発事故後の除染作業者の放射線被曝が子供に影響したことは認められていませんが、高線量によるマウス実験では認められているので、同じ生物であるヒトでも影響が有り得ることを否定できないとされる考えがあります。しかし、そのマウスですら、子孫に影響が出ない線量

がありました。さらに、セシウム137の飲料水に対する日本の基準値が、マウス実験でもDNA塩基配列に影響の出ない線量の10,000分の1ですので、基準値以下では安心と言えるのではないかと考えています。

また、発がん率についても2群間では差がない結果であり、逆にセシウム137群では腫瘍の増殖抑制効果が認められました。そこで、血漿中のサイトカイン量を調べた結果、腫瘍が発生していないにもかかわらずセシウム137を飲んでいるマウス群では、抗腫瘍性免疫能にかかわるサイトカインが増加していました。(ただ、ヒトとマウスの発がんについては、種が異なることから簡単にはヒトに外挿できないと思われます)。

「過ぎたるは及ばざるがごとし」とはよく言ったものです。これは、論語からのことわざで、程度を超えているということは、不足していることと同じであり、良くないことであることを意味しており、このために、物事はほどほどがよいということです。福沢諭吉は、学問ノススメで、このことを、栄養は食物の本色であるが、過食すれば弊害となることであるとして説明しています。

放射線による発がんも同様で、放射線被曝線量が強過ぎれば、がんはできず、及ばざれば、やはりがんはできないということです。通常、1つの細胞ががん化してから直径1cmほどになるまでに15年から20年を要するとされています。被曝線量が多すぎれば、多くの細胞は細胞死を起こして臓器死を起こします。ヒトでは、被曝線量が10Gyを超えると2週間ほどで全てのヒトが腸管死により、4Gyあたりで骨髄死により2か月ほどで半数のヒトが死に至る急性障害を起こしますので、体内にがんができるまでに亡くなってしまいます。ですから、がんができるためには、被

曝後に細胞もヒトも生存する必要があるので、ほどほどの被曝線量でなければならぬのです。

では、低線量ではどうでしょうか。確かに、放射線の被曝線量を下げていくと最後に残る憂慮は皮肉にも一番恐れられる発がんです。その発がん放射線の関係について、現在の放射線防護では、閾値なし直線仮説(LNT)に則り、被曝線量に比例して発がんする可能性が上昇する確率的な考えが取り入れられています。そのために、多くの人々の間では、少しでも放射線に被曝すれば、がんになることを心配します。しかし、他の要因、例えば飲酒、喫煙、やせすぎなどによるがんへの寄与率があり、それを下回る放射線量における発がん率においては、憂慮には値しないはずで、100mSv以下の被曝線量でもがんを恐れるならば、まずは、生活習慣を改める方がよさそうなのです。

放射線は、がんを起こすけれど、がんを抑えたり治したりもします。まさにもろ刃の剣ですね。ただ、どちらが私たちにとっての本当の放射線の姿なのでしょう。このように世の中には答えが2つに分かれてどちらが正解かわからないことが多々あります。

実は面白いことに、発がん制がんは同じDNA切断から起こるのです。つまり、DNA切断が起こらなければ、いずれも始まらないということで、発がん制がんは正反対なことなのですが、途中までの経過は同じなのです。ちなみに答えが2つと言えれば次のような式があります。

$8 \div 2 (2 + 2) = ?$ 答えは1それとも16どちらでしょうか。いずれも正しいのです。このような簡単な算数の式でも答えが2つあるということです。

このように世の中には、答えが2つに分かれてどちらが正解か悩むことがあります。京都大学の楠見孝教授の研究によると、高等教育を受けた人ほど、どちらかの意見を強く言われるより、両方の根拠を聞いて自分で判断したいと思う傾向が強いようです。ただ、状況に応じてどちらかが正しかったり、あるいは両方とも正しいかたりするかもしれない社会の中での判断は難しいですね。放射線も社会の中で決められた規制値という制限の中で、自分にとって安心できるものかどうかは、本稿のみならず他の色々な情報が助けになると思います。

本稿で紹介しました、ネガティブデータについても決定的ではないです。しかし、年月をかけて得られた信頼性の高いデータには価値があると考えています。昨今では、短期に研究成果が求められる傾向にありますが、長く時間をかけなければわからない研究もあります。読者の誰かが時間のかかる研究にも興味を持って戴けると嬉しく思います。

最後に本稿の数字に絡む内容にちなんでクイズを1つ。

旅館に宿泊した学生A, B, Cは、一人1,000円ずつ宿泊費を旅館の仲居に渡しました。女将は学生だからと減額してあげるようにと仲居に500円渡しますが、3人では割り切れないだろうと思われたことから、仲居は200円をくすねます(ネコババ)。100円ずつ返金された学生は宿泊費が安くなったことを喜びました。しかし、3人で900円ずつ払った合計2,700円と仲居のネコババ200円を足しても2,900円にしかなりません。100円が消えています。どこへ行ったのでしょうか？

数字は、嘘は言わないけれど使いようによっては・・・数字は魔物ですね。



追記：本稿に挙げました筆者たちの17年間に渡る研究の論文「Effects of generational low dose-rate ¹³⁷Cs internal exposure in descendant mice」は International Journal of Radiation Biologyのオンライン公開でご覧戴けます。

URL : <https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2400521>



著者プロフィール

大阪大学 核物理研究センター 特任教授
放射線科学基盤機構 招聘教授
医学系研究科未来医療イメージングセンター
招聘教授

1958年仙台生まれ。1987年大阪大学大学院医学研究科博士課程修了(医学博士)

大阪大学大学院医学系研究科遺伝医学・放射線基礎医学講座 助教(医学部講師)、放射線基盤機構准教授を経て現在に至る。専門分野は、放射線基礎医学、発生遺伝学で放射線、化学物質によるがん、奇形の発生機構、次世代への影響を中心に研究。ここ18年間は、セシウム137を58世代以上にわたって投与して低線量内部被曝させ続けたマウスの子孫への遺伝学的、生理学的影響について研究。また、チェルノブイリ原子力発電所事故後や福島第一原子力発電所事故後の20km圏内調査、一時帰宅者のスクリーニング支援、大阪大学浜通り地区環境放射線学生研修の運営・開催の教員として従事。学振委員。

International Congress of Radiation Research (2015) : Excellent Poster賞、Environmental Mutagen Society of Japan Meeting (2015) : Best Presentation Elsevier賞を受賞

ISO/TC85/SC2が牽引する放射線防護の国際標準化

— 国際規格開発の仕組みと我が国の貢献 —

山田 崇裕*

1. はじめに

国際標準化機構 (ISO : International Organization for Standardization) は、国際的な製品・サービスの交換の円滑化、標準化活動の促進、科学技術・産業・医療など幅広い分野における国家間協力を発展させることを目的として国際規格の整備を進めている。放射線防護に関連する測定・評価技術などもこの枠組みの中で標準化されており、線量評価、放射線モニタリングなどの基盤技術は、国際的に調和した規格を通じて、研究開発、産業利用、医療、規制行政及び環境評価といった多様な現場における比較可能性と信頼性を支えている。

ISOには270の専門委員会 (TC : Technical Committee) が設置されており、原子力及び放射線利用分野を所掌するのが ISO/TC85 である。その下位組織である分科委員会 (Subcommittee) SC2は放射線防護 (Radiological Protection) の国際標準化を担い、現場で必要とされる測定・評価技術等の規格化を進めている。本稿では、ISO/TC85/SC2における標準化の仕組みと、我が国が果たしている技術的貢献について概説する。

2. 国際標準化のプロセス — 技術的根拠を積み上げる合意形成

国際規格の策定は、WTO/TBT協定で示された透明性、開放性、公平性、市場適合性、一貫性及び途上国への配慮の六原則に基づいて実施される¹⁾。ISO/IEC Directives, Part 1²⁾では、規格開発の組織構成、責任範囲、審議手続きが詳細に定められている。

規格開発は、予備段階 (PWI)、提案段階 (NP)、作成段階 (WD)、委員会段階 (CD)、照会段階 (DIS) 及び承認段階 (FDIS) を経て国際規格として発行される。各段階で P (Participating) メンバ国は投票を行い、技術的・一般的・編集上のコメントを提出する。プロジェクトリーダーは、提出されたコメントに対する対応案を整理し、作業部会 (WG : Working Group) 会議で審議しながらドラフトの精緻化を進める。技術的妥当性や適用範囲の合理性など、科学的根拠に基づく検討が求められる点が特徴である。

規格には18・24・36か月の開発トラックが設定されており、所定の期限までに次段階へ進めなければプロジェクトは取り下げとなる。技術的課題が大きい規格では、中間会議や臨時会議を開催して集中的に議論を行うことも多い。

* Takahiro YAMADA 近畿大学原子力研究所 教授 / ISO/TC85/SC2 放射線防護国内審議分科委員会 幹事

これらの会議は新型コロナウイルス感染拡大以降、オンラインでの開催が主となった。会議参加が容易になった一方、対面によらないことによる不自由さに加え、時差の関係で会議は日本時間の深夜に開催されることが多く、参加するエキスパートにとっては負担となっている実情もある。

3. 放射線防護における国際的枠組みの中でのISOの役割と体制

放射線防護の国際的枠組みは、図1³⁾のとおりUNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）による科学的知見の評価、ICRP（国際放射線防護委員会）による防護体系の提示、IAEA（国際原子力機関）による国際基本安全基準（BSS：国際基本安全基準）の策定という階層構造の上に成り立っている。ISOはこれらの枠組みを踏まえ、現場で安全を確保するために必要な具体的な測定・評価手順などを国際規格として整備する役割を担う。すなわちISO規格は、理念としての放射線防護体系と、実際の測定・評価業

務との間にある“実務的ギャップ”を埋めるものであり、放射線防護・管理の現場にとって最も直接的に関わる国際合意である。

ISO/TC85の傘下にはWG1：Terminology、WG4：Management system and conformity assessmentの2作業部会と、SC2：Radiological protection、SC5：Nuclear installations, processes and technologies、SC6：Reactor technologyの3分科会が設置されている。SC2は30か国のPメンバ、11か国のOメンバのほか、IAEA、ICRP、ICRU、EURADOSなどの国際機関がリエゾン組織として参画し、広範な技術分野について議論を行っている。

SC2の所掌範囲は個人（作業員、患者、一般公衆）及び環境の計画、現存又は緊急時の被ばく状況における電離放射線のすべての発生源に対する防護と規定され、原子力産業、医療利用、産業活動、研究活動及び自然放射線源（ラドン、宇宙放射線など）に関連するものを取り扱う。表1にSC2に設置されているWGと所掌範囲を示す。Advisory Group（AG）はSC2全体会議の諮問部会として規格開発戦略などについて議論する。WGは10グループが活動中であり、2025年11月時点で、



図1 放射線防護政策に関するICRP勧告の根拠と利用³⁾

表1 ISO/TC85/SC2に設置されている作業部会(WG)及び所掌範囲

WG	所掌範囲	主査	主な進行中プロジェクト
AG	諮問部会	米	
WG2	標準放射線場	独	ISO/CD 29661 放射線防護のための基準照射場一定義及び基本概念 ISO/DIS 18090-1 パルス放射線標準—パート1：光子
WG13	内部被ばく	英	ISO/FDIS 18990 尿中 ²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Puの放射能測定- α 核種 分析とICP-MSを用いた試験方法 ISO/AWI 25190 プルトニウム取扱い作業者に対する内部被ばく 線量の測定・評価
WG14	空気モニタリング	米	ISO/WD 20041-3 ガス状排出物とガス放出のトリチウムと炭素 14 放射能 — Part 3：パッシブ法によるトリチウム及び炭素14 の放射能の決定
WG17	放射能測定	仏	ISO (出版) 18510-1 環境放射能測定-生物指標-第1部：生物指 標のサンプリング、調製及び前処理に関する一般の手引き ISO (出版) 19361 液体シンチレーション計数法による β 線放出 核種放射能測定 ISO (出版) 19581 ガンマ線放出放射性核種—シンチレーション 検出器ガンマ線スペクトロメトリーを使用する高速スクリーニ ング法 ISO/WD 22931 環境中の放射能測定—大気：ラドン-222校正施 設、ラドン測定装置メーカー、測定装置分析プロバイダーの品質保 証/品質管理
WG18	生物学的線量評価	加	ISO/AWI 22699 未成熟染色体凝縮法 (PCC) による生物学的 線量評価法
WG19	外部被ばく	仏	ISO 15382 (出版) 放射線防護—眼の水晶体、皮膚及び四肢へ の放射線量のモニタリング手順
WG20	放射性物質の 不法往来監視	中	ISO 3999:2004 (改訂) 放射線防護—工業用ガンマ線透過試験 装置—性能、設計及び試験の仕様
WG21	航空機被ばく	日	ISO/DIS 20785-4 民間航空機における宇宙線被ばくの線量評価 —パート4：計算コードの検証 ISO/AWI 20785-5 民間航空機における宇宙線被ばくの線量評価 —第5部：航空機乗務員と飛行中の公衆に影響を与える電離放 射線の断続的な発生源の線量評価
WG22	医療放射線線量評価・ プロトコル	日	IEC/DIS 63465 放射性核種キャリブレーションの使用における校正 と品質保証
WG23	遮蔽及び 閉じ込めシステム	仏	ISO (出版) 24427 医療用陽子加速器—遮蔽設計と評価に関する 要件と推奨事項 ISO (出版) 18518 核融合施設における超電導技術の適用にとも なう安全システムの必要条件 ISO/DIS 16659-2 原子力施設の換気—固体吸着剤を用いたヨウ素 捕集装置のin-situ効率試験—第2部：放射性CH ₃ I法 ISO/DIS 16659-3 原子力施設の換気—固体吸着剤を用いたヨウ素 捕集装置のin-situ効率試験—第3部：シクロヘキサンガス漏洩率法
WG25	原子力/放射線緊急 事態における住民と 対応者の放射線モニ タリング	仏	ISO/AWI 22761 放射線/原子力緊急時における個人の外部被ばく 線量評価

通算129規格が出版され、24の新規規格制定又は既存規格の改訂プロジェクトが進行中である⁴⁾。

4. ISO/TC85/SC2国内審議体制と活動状況

SC2に対応する国内組織は、ISO/TC85/SC2放射線防護国内審議分科委員会(事務局:公益社団法人日本保安用品協会)である。委員長は中村尚司 東北大学名誉教授が務め、大学・研究機関・団体等に所属する約40名の専門家が審議に参加している。また、原子力規制庁監視情報課からもオブザーバ参加がある。

国内審議委員会では、国際会議への対応、各国提出コメントの技術的検討、新規規格提案の審議、既存規格の5年ごとの定期見直し(SR: Systematic Review) 対応などを行う。取り扱うISO規格の中には日本産業規格(JIS)の対応国際規格となっているものも多数ある。放射線管理に関連する規格では、例えば放射性表面汚染測定・評価法を規定したISO7503-1~3(JIS Z 4504-1~3)、X・ γ 線の標準場について規定したISO4037-1~4(JIS Z 4511)などがある。サーベイメータや線量計といった放射線防護機器の製品規格は国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)のIEC/TC45/SC45Bが所掌する一方、ISOはここに示したような方法規格を主に取り扱う。また、SC2のWG17(放射能測定)で扱う規格には原子力規制庁監視情報課の定める「放射能測定法シリーズ」とも関連が深く、国際標準化が国内の技術実務にも直接的に影響を及ぼす。規格の国際整合性確保が求められる中、日本の技術的知見を規

格に反映させることは、より重要な責務となっている。

5. 我が国の技術的貢献

国内委員会では、国際ルール形成・市場創造型標準化推進事業(戦略的国際標準化加速事業)のもとで、複数の規格開発プロジェクトにおいて日本の専門家がプロジェクトリーダー(以下PL)として活動している。これにより、日本提案の国際標準化を進めてきた。特にこの三か年は、非破壊による環境試料中の放射性物質スクリーニング法に関する国際標準化(PL:筆者)、環境試料を対象としたトリチウム分析法に関する国際標準化(PL:北海道科学大学真田哲也教授)、ラドンの校正施設、測定機器製造会社、測定サービス提供会社の品質保証・品質管理に関する国際標準化(PL:弘前大学床次眞司教授・WG17共同コンビナー、大森康孝准教授)及び原子力事故時の環境中放射線場における個人モニタリングによる実用量および防護量評価の標準化(PL:QST赤羽恵一博士・WG22コンビナー)を進めてきた。このうち、「非破壊による環境試料中の放射性物質スクリーニング法に関する国際標準化」は筆者がPLを務め2017年に出版されたISO 19581:2017 Measurement of radioactivity – Gamma emitting radionuclides – Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometryに我が国で食品中の放射性物質検査の一部に用いられている非破壊式手法⁵⁾を盛り込む提案で、本年ISO 19581:2025改訂2版が出版された⁶⁾。また、トリチウム分析法の国際標準化についても重要な取組として我が国が主導して進めている。福島第一原

子力発電所の処理水放出を契機に、低濃度トリチウム測定への国際的関心が高まり、電解濃縮法による前処理、バックグラウンドの安定性、濃縮効率、回収率、不確かさ評価など、複数の技術的要件を満たす測定手法の確立が求められている。我が国では令和5年に「放射能測定法シリーズ9（トリチウム分析法）」が改訂され、この知見を基に電解濃縮法を含む分析手順の国際標準化提案を進めている。海洋モニタリングや環境影響評価における測定結果の国際的整合性に寄与するものであり、日本の技術的蓄積が国際規格として共有される意義は大きいと考えている。この他にも、WG21（航空機被ばく）では保田浩志委員がコンビナーを務め、かつ複数の規格のPLとして国際標準化を主導している。

このように、既存規格の改訂への対応のみならず、我が国の知見を国際標準化に生かすべく積極的に新規国際規格提案を行う活動をしている。新規規格提案及び既存規格改訂プロジェクトにおける地道な活動を含めた積み重ねが、国際標準化への具体的な貢献、放射線防護分野における国際標準化における我が国の存在感を高めることに繋がると確信している。

6. おわりに

ISO/TC85/SC2における国際標準化は、放射線防護分野における科学的根拠に基づく安全確保を支える重要な活動である。国際規格は放射線利用の実務における信頼性の基盤であり、多様化する原子力・放射線利用の中でその重要性は今後さらに増すと考えられる。

本稿が、放射線防護に携わる読者に対し、国際標準化の現状と意義を理解する一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 経済産業省, 標準化実務入門
https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/katsuyo/jitsumu-nyumon/pdf/2015text_zenbun.pdf
- 2) ISO/IEC Directives, Part 1:2023, Procedures for the technical work
- 3) R. H. Clarke and J. Valentin, The History of ICRP and the Evolution of its Policies. ICRP Publication 109. Annals of the ICRP, 39 (1), 2009.
- 4) Geslin Nathalie, 2025 - December Meeting - SC 2 report
- 5) 厚生労働省 事務連絡 非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法について（令和6年7月1日）
<https://www.mhlw.go.jp/content/11135000/001270167.pdf>
- 6) <https://www.iso.org/standard/87739.html>

著者プロフィール

略歴 [簡単な経歴と業績・賞・著作など]

平成8年3月
東北大学工学部原子核工学科 卒業
平成8年4月～平成29年3月
公益社団法人日本アイソトープ協会
平成22年3月
東北大学大学院工学研究科 博士課程後期
(社会人博士) 修了
博士(工学)の学位を取得
平成29年4月～令和5年3月
近畿大学原子力研究所 准教授
令和5年4月～現在
近畿大学原子力研究所 教授

主な社会活動 (現在)

ISO/TC85/SC2、国際エキスパート及び国内審議委員会分科会委員・幹事
経済産業省 日本工業標準調査会、臨時委員
原子力規制庁、環境放射線モニタリング技術検討チーム 委員
原子力規制庁 (受託：三菱総研)、広域的なモニタリングのための次世代モニタリングポストに関する有識者検討会 座長
日本保健物理学会 標準化委員会 副委員長など

主な受賞等

令和5年度産業標準化事業表彰、経済産業大臣表彰、経済産業省



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

がんは「コントロールできる病気」
——健康とエネルギーの密接な関係



昨年11月、東京電力の柏崎刈羽原子力発電所を訪問し、「放射線とがんの全て」と題し、発電所員のみなさんに向けて講演を行いました。電力は暮らしや経済を支えるだけでなく、人々の健康と命を守る基盤でもあります。発電所と医療という異なるフィールドではありますが、放射線を取り扱うという共通点を持つみなさんに、放射線被ばくとがんに関する正しい理解についてお話をしました。

私は放射線治療医として多くのがん患者さんと向き合ってきましたが、2018年、自ら行った超音波検査で膀胱がんを発見しました。「まさか自分が」という驚きとともに、がんは誰にでも起こりうる病気だという現実を、身をもって知りました。日本では男性の3人に2人、女性の2人に1人が一生のうちにがんになる、まさに“がん大国”です。がんはもはや特別な病気ではありません。

発がん原因の半分以上は生活習慣によるものですが、“がんは知ることによってコントロールできる病気”です。がん細胞は日々体内で発生しますが、ほとんどは自然に修復されます。がん検診で見える1cm大に育つまでには10~20年かかりますが、このくらいでは自覚症状がありませんので、検診や

セルフチェックによる早期発見が生死を分ける鍵となります。

1~2cmの早期がんなら95%が完治します。働き盛りの世代においては、がん治療と仕事の両立も重要です。我が国の電力インフラを支える発電所員のみなさんには、がんになる前にがんを知ることによって、がんを過度に恐れることなく、生活習慣の見直しによる予防と早期発見の重要性、そしてがん治療の選択肢についてお伝えしました。

さらに、健康とエネルギーの関係は想像以上に深いものです。夏場の熱中症による死亡者数の印象が強いかもしれませんが、実は冬場の低室温による健康影響のほうが深刻です。

寒さは血圧を上昇させ、心疾患や脳卒中のリスクを高めます。日本人の死因の約1割は、冬場の低温による健康影響が関与しており、夏の高温による死亡者数を上回っています。つまり、エネルギーは単に節約すればよいものではなく、“健康を守るために適切に使う”べき社会的資源なのです。

脱炭素で、大量かつ安定した電力を供給できる原子力は、人々の暮らしと健康を支える重要な基盤です。輸入に頼る化石燃料は国際情勢に左右され、外交問題に発展することもあります。準国産エネルギーである原子力によりエネルギー自給率を高め、医療や福祉と同様に、生命を守る社会インフラとして再評価することが求められています。

柏崎刈羽原子力発電所で働く所員の姿に触れ、電力を支える責任感と誇りを感じました。医師として、そしてがん経験者として、私はこの「命の授業~大人のがん教育~」を、これからも広く伝え続けていきたいと思っています。



東京都立大学理学部化学科同位体化学研究室の ご紹介

千葉 祐亮*1 / 魏 寅*2 / アブダラ エルショバギ*3 /
ハナフィ アハメド*4 / 東福 滯和*5

同位体化学研究室の紹介

東京都立大学同位体化学研究室は東京都立大学南大沢キャンパスに位置する理学部化学科所属の研究室であり、理学部の8号館に隣接するRI研究施設において研究を行っている。当研究室には電池や光触媒を作製し、その物性をメスbauer分光法によって測定するメスbauerグループ、および金属内包フラーレンや、放射性同位元素を用いた錯体の合成・精製を行うフラーレングループの2つの研究グループがあり、週一回のゼミナールで研究の報告を行っている。



写真1 同位体化学研究室メンバーの集合写真
手前 左から沼倉、神保、万木、植田
奥 左からエルショバギ、野村客員准教授、秋山助教、孫、魏、ハナフィ、千葉、東福、久富木准教授

研究紹介

①ソーダ石灰アルミノケイ酸鉄ガラスの構造と光触媒効果の相関

ヘマタイト ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) と呼ばれる酸化鉄は

バンドギャップエネルギーが酸化チタンよりも低く、可視光照射下でも光励起が可能という特徴を持つ。また、鉄はフォトフェントン反応やフェントン反応と呼ばれる光照射によってラジカルを生成する反応を示すことが知られている。生成したラジカルは水中の有機物を分解し、最終的に二酸化炭素と水に分解することから鉄含有光触媒の浄水処理への応用が期待されている。また、鉄含有ソーダ石灰アルミノケイ酸ガラスを熱処理したものが光触媒効果を示したという研究結果も出ている¹⁾。そこで、家庭ごみ焼却灰を溶融して得られる家庭ごみ溶融スラグが前述のガラスと類似した組成を持つことに着目した。スラグを硝酸に溶解した後に熱処理を行うと、光触媒効果が確認された。

私の研究では家庭ごみ焼却スラグから作製した試料のうち、最も光触媒効果の大きい組成を参考に、試薬を用いてスラグのモデルを溶融急冷法で作製した。さらに、鉄濃度を一定に保ちつつ、塩基度(二酸化ケイ素に対する酸化カルシウムの重量比)を変化させた試料も作製し、その光触媒効果を測定した。構造解析には、XRD(X線回折)、XAFS(X線吸収微細構造解析)、およびRI研究施設で扱うメスbauer分光法などを用いた。

実験の結果、塩基度1.3の試料で最も大きい光触媒効果が得られた。同組成の試料について、硝酸処理後と熱処理後と比較すると、熱処理後の方が大きい光触媒効果が得られ、メスbauer分光法の結果ではいずれの処理後試料にも3価の鉄の四面体構造および八面体構造の信号が検出され、うち3価の鉄の八面体構造はヘマタイトに帰属さ

*1 Yusuke CHIBA

東京都立大学 理学研究科 大学院生(修士)

*2 Wei YIN

東京都立大学 理学研究科 大学院生(研究生)

*3 Abdallah ELSHOUBAGY

東京都立大学 理学研究科 大学院生(博士)

*4 Hanafy AHMED 東京都立大学 理学研究科 大学院生(博士)

*5 Miona TOFUKU 東京都立大学 理学研究科 大学院生(修士)

れた。一方、未処理試料は著しく光触媒効果が低く、メスbauer分光の結果も3価の鉄の四面体構造のみが検出され、XRDの結果からも、ヘマタイトの存在は確認されなかった。(千葉 祐亮)

②汚染物分解促進のためのカーボンナノチューブ・コバルトナノ粒子触媒の開発

農薬や医薬品などの化学物質は環境中に残留しやすく、水質汚染の主要な原因となっている。特に農薬アトラジン(ATZ)は分解しにくく、微量であっても生態系や人体に悪影響を及ぼす懸念があり、その除去は喫緊の課題である²⁾。現在、有力な手法の一つとして、ペルオキシ硫酸塩(PMS)を利用した先進酸化プロセスが注目されている。PMSは外部触媒によって活性化されると強力な酸化性ラジカルを生成し、高い処理効果を発揮することが知られている³⁾。中でもコバルト系触媒は、遷移金属の中で最も効率的にPMSを活性化できることが実証されている。しかし従来のコバルト系触媒では、金属の溶出や反応の持続性に課題が残されていた⁴⁾。本研究では、分解しにくい汚染物の効率的除去を目的として、コバルトを含むゼオライト様イミダゾレートフレームワーク67(ZIF-67)由来の新規触媒(Co@CNT-NC)を開発し、その性能を詳細に検討した。従来のコバルト系不均一触媒はPMS活性化に優れる一方、金属が溶出しやすいのでその性能と安定性に限界があった。

そこで本研究では、グラファイト状炭化窒素($g-C_3N_4$)とZIF-67の複合材料を熱処理することで、コバルトナノ粒子をカーボンナノチューブ(CNT)の先端に封入するナノ空間構造を実現した。この構造により、基質やラジカルの拡散が促進されるとともに、金属活性点は腐食や凝集から保護され、高い触媒性能と安定性が期待できる。触媒性能評価では、Co@CNT-NC/PMS系は10分以内に汚染物ATZの完全除去を達成し、従来の触媒(Co-NC)に比べ約8倍高い反応速度を示した。また、PMS利用率は約95%に達し、コバルトイオン溶出も大幅に抑制された。ラジカル捕捉実験と電子スピン共鳴分析から、主な活性種はヒドロキシルラジカル(HO^\bullet)であり、硫酸ラジカル($SO_4^{\bullet-}$)、一重項酸素(1O_2)、+4の原子価コバルト種、さ

らには電子移動経路(ETP)が補助的に寄与することが明らかになった。Co@CNT-NC/PMS系における触媒メカニズムは図1に示されているとおりである。さらに、密度汎関数理論(DFT)計算により、CNT内でのコバルト封入がPMSの吸着や電子移動を促進し、ラジカル生成エネルギーの障壁を低下することが示された。加えて、超高速液体クロマトグラフィー・質量分析(UHPLC-MS)の解析と計算化学(DMol3)の評価により、ATZ分解経路が明らかになり、脱アルキル化や脱塩素化を経て低毒性の小分子へ分解されることが確認された。毒性予測においても処理後水質の安全性向上が裏付けられた。さらに、Co@CNT-NCを組み込んだ膜リアクターによる連続処理試験では、5LのATZ廃水を処理した後も100%の除去率を維持し、優れた再利用性と安定性が実証された。以上の成果より、Co@CNT-NCは従来の触媒の課題を克服し、高効率かつ安定したPMS活性化を実現することが示された。本研究は、持続可能な先進酸化プロセスの新たな設計指針を提示するとともに、水処理および環境修復への実用的応用に大きく貢献することが期待される。しかし一方で、実際の水環境では、無機塩類、天然有機物、コロイドなどのラジカルの触媒効率を抑制する可能性がある。今後は、 1O_2 やETPに基づく非ラジカル型酸化経路を支配できる単コバルト原子触媒の開発を目指し、水中での触媒効率低下を抑制することで、触媒の安定性と寿命を向上させる研究が求められる。

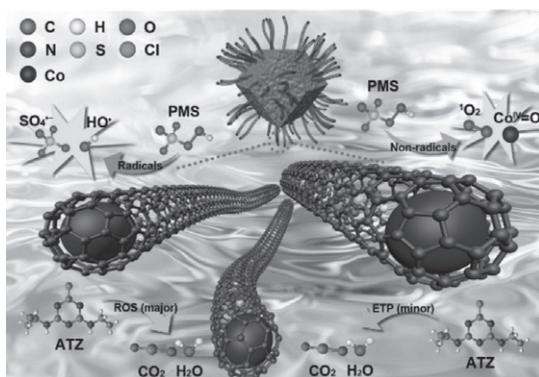


図1 Co@CNT-NC/PMS系における触媒メカニズム (魏 寅)

③二次電池における高性能化のための、ドーピング効果を有するバナジウム-スズガラス-リン酸塩電極の開発

セラミックスおよびガラスセラミックスは、近年、エネルギー貯蔵・変換デバイスの主要な機能材料として大きな注目を集めている。これらの材料は、構造的多様性、化学的安定性、電子・イオン輸送の広範な調整性を併せ持ち、携帯電子機器、電気自動車、さらには再生可能エネルギー拡大を支える定置型貯蔵システムなど、幅広い応用に適している^{5, 6, 7)}。

エネルギー貯蔵市場は依然としてリチウムイオン電池 (LIB) が牽引しており、その成長は環境規制および急速な技術革新によって支えられている^{8, 9)}。近年では、結晶構造の最適化、高いイオン輸送特性、粒子制御、粒界特性の改善を特徴とするセラミック電極材料および固体電解質の開発が進み、LIBのみならず、ナトリウムイオン電池 (SIB) やナトリウム-硫黄電池技術の発展にも大きく寄与している^{10, 11)}。

その中でも、バナジウム系ガラスは半導体的特性とバナジウムの多価酸化状態 ($V^{5+}/V^{4+}/V^{3+}$) に基づくレドックス活性を有し、電極材料として有望視されている。非晶質構造は組成設計の自由度が高く、遷移金属の導入や電気伝導性を高めるナノ結晶の安定化を可能にし、効率的な電荷輸送に寄与する。しかし、ガラス構造、バナジウムの酸化数分布、電気化学特性との関係は十分に解明されていない。

本研究では、一般的な熔融急冷法により組成 $xP_2O_5 - (90-x)V_2O_5 - 10SnO_2$ ($x = 10-60 \text{ mol}\%$) のリン酸-バナジウム-スズ (PVS) ガラスを合成した。本系は、ガラスネットワーク構造および冷却時に形成される結晶相の割合を体系的に制御できる組成設計になっている。構造解析の結果、低リン酸組成 (10PVS、20PVS) では主に SnO_2 (P42/mm) が析出し、リン酸含有量が高い組成 (≥ 30 PVS) では $Sn_2P_2O_7$ が形成されることが明らかとなり、リン酸量に依存したスズ酸塩相の変化が確認された。

¹¹⁹Snメスbauer分光法により、 $SnO_2/Sn_2P_2O_7$ 比の定量とガラス中におけるSnの局所構造が明らかとなった。また、X線吸収微細構造 (XAFS)

測定では、 P_2O_5 濃度の増加に伴い、バナジウムが V^{5+} から V^{4+} 、 V^{3+} へと還元され、同時に第一配位圏のV-O結合距離が短くなることが示された。これらの酸化状態および原子スケール構造の変化は電荷キャリアの移動度に大きく影響する。

電気化学インピーダンス測定 (30°C) では、 P_2O_5 含有量が増加するにつれてDC電気伝導度が 1.46×10^{-5} から $7.83 \times 10^{-10} \text{ Scm}^{-1}$ へと急激に低下した。これは、電子伝導性を担う V_2O_5 が、電気的に絶縁性の高いリン酸ネットワークへと置換され、キャリア濃度が減少したためである。

xPVSを正極として評価した結果、10PVSが最も優れた特性を示し、 50 mA g^{-1} においてLIBで 350 mAh g^{-1} 、SIBで 64.3 mAh g^{-1} を発現し、それぞれ71.4%および67.3%の容量保持率を示した。この高性能は、 SnO_2 ナノ結晶の存在量が多いこと、さらに V^{5+} 濃度が高いことに起因し、 Li^+/Na^+ の挿入に有利に働く。

負極としての性能評価では、10PVSと30PVSが共に大きな初期容量 (LIB: 約 $370-340 \text{ mAh g}^{-1}$ 、SIB: 約 90 mAh g^{-1}) を示した。10PVSは最高の初期容量を示した一方、30PVSは若干優れたサイクル安定性を示し、PVSガラスセラミックスが正・負極の両用途に適用可能であることを示した。

本研究により、PVSガラスセラミックスにおける組成-構造-バナジウムの酸化還元状態-電気化学性能の明確な相関が初めて体系的に示された。特に、10PVSはLIB・SIBの正極材料として最も高い可能性を持つ一方、負極用途に向けてはさらなる安定性向上のための最適化が必要である。

これらの知見は、次世代充電式電池向けの先進ガラス電極材料の設計指針として重要であり、今後の高性能二次電池の開発に貢献するものである。

(アブダラ エルショバギ)

④ナトリウムイオン電池の性能向上を目的としたPVFガラス電解質の開発

リチウム価格の高騰と供給不足は、リチウムイオン電池の拡張性に大きな課題をもたらしている。これらの制約から、研究者たちは代替解決策を模索しており、豊富で安価なナトリウムは有望な候補として浮上した。その結果、ナトリウムイオン電池 (SIB) は大きな注目を集めている。本研究

では、ナトリウムイオン電池の正極材料として、鉄-バナジウム-リン酸ガラスセラミックスを選択した。これは、遷移金属の酸化還元活性と汎用性の高いガラスネットワークを組み合わせることで、混合ポリアニオンガラス材料が有望であることが示されているためである。

バナジウム-鉄リン酸 (PVF) ガラスの組成において、リン酸成分は酸素原子と強力な共有結合 (O-P-O) を形成するため、構造的な支持を強化する。また、 V_2O_3 は還元剤としても作用し、バナジウム (V^{5+} , V^{4+})、鉄 (Fe^{3+} , Fe^{2+}) の還元性を高める。

これは酸化還元活性を促進し、最終的には電池の基本的な科学的根拠である酸化還元プロセスの増加につながる。初期の研究では、鉄リン酸塩ガラスに V_2O_3 を導入すると、 Na^+ のインターカレーションが劇的に促進されることが実証されている。同様に、ナトリウム-リン-バナジウム酸塩ガラス ($xNa_2O-10P_2O_5-(90-x)V_2O_5$) に関する最近の研究では、ナトリウムイオン電池 (SIB) として大きな初期容量が報告されている (例: 25mol% Na_2O の場合、電流密度 $0.2mA\text{cm}^{-2}$ において約 $184mAhg^{-1}$)¹²⁾。

V_2O_3 の導入は構造に摂動を引き起こす可能性がある。例えば、Y-O-P結合がV-O-P結合と競合したり、V=O環境を歪ませて酸化還元反応を促進したりする可能性がある。 V^{3+} は酸化還元容量を増加させることは無く、酸化物カソードにおける同様の戦略により、高原子価カチオンが格子酸素を安定化する¹³⁾。

これまでの試料は、熔融急冷法によって作製された。

現在の研究の限界として、提案されている電池システムの電気化学的安定性のメカニズムはまだ解明されていないことがあげられる。この限界に対処するための今後の計画として次のことを考えている。

1. 安定性を向上させるには、ガラス転移温度 (T_g) と結晶化温度 (T_c) の差を広げることで構造を改変する必要がある。これは組成物中のネットワーク形成物質の割合を調整し、構造安定性を高める適切な改質元素を導入することで達成できる¹⁴⁾。

2. ゼルゲル法や水熱法などの高度な合成方法を用いることで、ナノスケール以上の均一相を実現できる。熔融急冷法は工業的に非常に効果的で安価であるが、均一相を得るのは困難である。これは、ガラスが多相材料に分類されるためであり、特に熱処理を加えると顕著になる。単一相が得られることもあるが、この相は完全に結晶性ではなく、ガラス相と混合されていることが多い。これは理論的にはナトリウムイオンの移動経路を広げるという利点があるものの、得られる材料はしばしば安定性が低い。その結果、ゼルゲル法や水熱合成法といった代替手法を用いることで、ナノスケールで均一な相を形成でき、ナトリウムイオンの移動経路を広げることができる。

3. V-P-Fe骨格に基づく新規正極・負極材料の研究
我々は、遷移元素または希土類元素 (例: Co) をドーブしたバナジウム-リン酸-鉄骨格に基づく新規正極・負極材料を研究している。ニッケル、マグネシウム、エルビウムなどの金属酸化物を添加することで、電子伝導性、イオン伝導性、および熱安定性を向上させる。(ハナフィ アハメド)

⑤光核反応生成核種の医薬品応用に向けた分離特性の検討

核医学分野では、放射性核種を化学的に結合させた化合物の生理的・代謝的挙動を利用した多様な放射性医薬品が用いられている。近年では診断のみならず、腫瘍細胞の治療への応用も進展している。放射性核種から放出される γ 線は透過性が高く体外からの検出に適しており、 β^- 線や α 線などの粒子線は短い飛程と高い線エネルギー付与を有するため、局所的ながん治療に有効である。ルテチウムの同位体である ^{177}Lu は、半減期6.6日で β^- 線と γ 線の双方を放出する特性を持つため、癌細胞を選択的に照射しつつ周囲組織への損傷を抑制できるとともに体外からの検出が可能であり、診断と治療を統合したセラノスティクスへの応用が期待されている。現在、 ^{177}Lu の製造は原子炉を用いた直接法 ($^{176}\text{Lu} (n, \gamma) ^{177}\text{Lu}$) と間接法 ($^{176}\text{Yb} (n, \gamma) ^{177}\text{Yb} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{177}\text{Lu}$) が主流である。直接法では準安定同位体 ^{177m}Lu (半減期約160日) が副生成するため、医療用途では間接法が採用さ

れている。しかし、化学的性質が極めて類似するLuとYbの分離は依然として大きな課題である。Lu-Yb間の抽出クロマトグラフィーでの分離係数は1.5–1.8程度と小さく、高純度のLuを得るには多段階のイオン交換操作や長尺カラムの使用が必要となる。

これらの問題を解決するため、我々はHfをターゲットとした光核反応に着目し、電子線形加速器による照射による ^{177}Lu の製造を検討した。そして、得られた ^{177}Lu をフラーレンおよび放射性医薬品の前駆体である配位子に導入し、標的核種Hfとの分離効率向上を目的とした基礎的研究を行った。

光核反応によりHfターゲットから製造した場合、ランタノイド元素に対して選択的な保持能を示す抽出剤であるリン酸ビス(2-エチルヘキシル)を担持したLNレジンを用いた抽出クロマトグラフィーにより94.5%という高い核種純度で ^{177}Lu を単離することが可能であった。この単離した ^{177}Lu をアーク放電法によりフラーレンに内包させることで、医薬品応用の可能性を示した。さらに、HfとLuの化学的特性より、本実験溶媒系ではHfとLuがそれぞれ電荷の違う錯体を形成すると考えた。そして、より簡便で迅速な分離法として、陰イオン交換樹脂を溶液中で攪拌し電荷の違いを利用して分離を行うバッチ法を試みた。しかし、放射性医薬品合成に適した条件下での分離はpHの制約により困難であることが示唆された。今後は溶媒組成およびpH条件を精密に制御し、医薬品合成プロセスに適した条件下でのHfの除去率を最大化できる溶媒条件の確立を目指す。

(東福 澁和)

おわりに



以上に紹介した研究をはじめとして、我々は測定や合成など様々な形で放射性同位元素を用いた実験を行っている。今後も放射化学・材料科学の分野に加えて、新たな医薬・産業利用の可能性を探索していく。

最後にこれらの研究テーマに対して久富木志郎准教授、秋山和彦助教にご指導いただき、感謝いたします。

参考文献

- 1) A. S. Ali et al., Structural, electrical and photocatalytic properties of iron-containing soda-lime aluminosilicate glass and glass-ceramics. *J. Non-Cryst. Solids* **553**, 120510 (2021)
- 2) W. Jiang, et al., Co-exposure of Monensin Increased the Risks of Atrazine to Earthworms, *Environ. Sci. Technol.* **56**, 7883-7894 (2022)
- 3) H. V. Lutze, et al., Degradation of Chlorotriazine Pesticides by Sulfate Radicals and the Influence of Organic Matter, *Environ. Sci. Technol.* **49**, 1673-1680 (2015)
- 4) G. P. Anipsitakis, D. D. Dionysiou, Radical Generation by the Interaction of Transition Metals with Common Oxidants, *Environ. Sci. Technol.* **38**, 3705-3712 (2004)
- 5) Gandi, S., et al., Recent progress in the development of glass and glass-ceramic cathode/solid electrolyte materials for next-generation high capacity all-solid-state sodium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, **521**, 230930 (2022)
- 6) Shi, K., et al., Recent Progress and Prospects on Sodium-Ion Battery and All-Solid-State Sodium Battery: A Promising Choice of Future Batteries for Energy Storage. *Energy & Fuels* (2024)
- 7) Yang, T., et al., Sustainable regeneration of spent cathodes for lithium-ion and post-lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 1-10 (2024)
- 8) Vinayak, A. K., et al., Circular economies for lithium-ion batteries and challenges to their implementation. *Next Materials*, **5**, 100231 (2024)
- 9) Wali, S. B., et al., Grid-connected lithium-ion battery energy storage system towards sustainable energy: A patent landscape analysis and technology updates. *Journal of Energy Storage*, **77**, 109986 (2024)
- 10) Zhang, M., et al., Recent progress, challenges and prospects of electrolytes for fluoride-ion batteries. *Energy Reviews*, 100083 (2024)
- 11) Xiang, L., et al., Interface issues and challenges for NASICON-based solid-state sodium-metal batteries. *Advanced Powder Materials*, 100181 (2024)
- 12) S. Kubuki, et al., ^{57}Fe -Mössbauer and XAFS Studies of Conductive Sodium Phospho-Vanadate Glass as a Cathode Active Material for Na-ion Batteries with Large Capacity. *J. Non-Cryst. Solids*, **570**, 120998 (2021)
- 13) S. Wang, et al., Electronic structure formed by Y2O3-doping in lithium position assists improvement of charging-voltage for high-nickel cathodes, *Nat. Commun.*, 16:1 (2025)
- 14) A.A. Bahgat, et al., Enhancement of electric conductivity in transparent glass-ceramic nanocomposites of Bi2O3-BaTiO3 glasses, *J. Mater. Sci. Technol.*, **29** (12), 1166-1176 (2013)
- 15) Nikolai A. Lebedev, et al., *Applied Radiation and Isotopes*, **53**, 421 (2000)
- 16) E.P. Horwitz, et al., *Applied Radiation and Isotopes*, **63**, 23 (2005)
- 17) A. G. Kazakov, et al., *Molecules*, **27**, 3179 (2022)

放射能・放射線 単位・元素名の由来

高橋 正

第13回

フェルミウム ${}_{100}\text{Fm}$: fermium

★放射線関連分野での大きな功績を称え、その名前が単位や元素名に用いられている科学者の人物像や功績を紹介するシリーズ★

フェルミウムFmは1952年の水爆実験の際の大量の放射性降下物中から、ギオルソ (A. Ghiorso) 率いるカリフォルニア大学チームによって発見された。 ${}^{238}\text{U}$ の急速な多重中性子捕獲で生成した ${}^{255}\text{Es}$ の β -壊変で ${}^{255}\text{Fm}$ (半減期20.07h, α 壊変)が生成したもので、軍事機密とされた。1954年、彼らは ${}^{252}\text{Cf}$ の連続的な中性子捕獲で ${}^{254}\text{Fm}$ を“再発見”した。ほぼ同じ頃スウェーデンのノーベル研究所のチームは、 ${}^{238}\text{U}$ と ${}^{16}\text{O}$ の核反応で、独立に ${}^{250}\text{Fm}$ を得ていた。元素名には、ギオルソらによるエンリコ・フェルミ (Enrico Fermi : 1901-1954) を讃える名称が使われている。 ${}_{100}\text{Fm}$ は中性子捕獲で生成する最後の元素である。Fmのなかでは ${}^{257}\text{Fm}$ が最も長半減期 (100.5d) だが、研究には ${}^{255}\text{Fm}$ が使われる。

フェルミは、実験家としても理論家としても卓越した科学者で、その名を冠した用語は10を超える。フェルミはローマに生まれた。1918年ピサの高等師範学校に首席で入学し、1920年にはピサ大学の物理学教室に進学した。最初の論文は20歳のときで、相対性理論に関するものだった。21歳のとき、X線回折の実験で学位を取得した。

1924年にフィレンツェ大学の数学・物理の講師となった。1925年にパウリ (W. E. Pauli) が排他原理を発表すると、翌年フェルミはこれを理想気体に応用し、排他原理に従う多くの粒子から成る系における統計法則を提起した。同時期にディラック (P. Dirac) も導出したので、フェルミ-ディラック統計とよばれている。スピン量子数が半整数の粒子のフェルミオンが従うこの統計は、直ぐにゾンマーフェルト (A. J. Sommerfeld) により金属の電子論に応用され、成功した。

1927年、フェルミは新設されたローマ大学の理論物理学教授になった。当初は分光学など原子物理学の理論的研究を中心に行なった。フェルミの下にはセグレ (E. Segrè) を始めとする優秀な学生が集まり、たちまち世界的な研究室となった。1930年代に入るとフェルミは周到に原子核物理に研究をシフトさせた。当時、 β 壊変はエネルギー保存

則を破るように見える現象だった。パウリはエネルギーを持ち去るが検出できない粒子の存在を仮定していた。1933年、フェルミはパウリの仮説を取込み、弱い相互作用による β 壊変の理論を発表した。1932年に中性子が発見されていたので、フェルミたちは β 壊変に関わる中性の粒子を、イタリア語の語尾をもつニュートリノとして中性子と区別した。

1934年にジョリオ=キュリー夫妻 (I. & F. Joliot-Curie) が ${}^{27}\text{Al}$ (α, n) ${}^{30}\text{P}$ による人工放射能を発見すると、フェルミは電荷を持たない中性子の方が核反応を起しやすいと考えた。直ぐにあらゆる元素について、中性子との核反応の実験に取りかかった。最初に見つけたのは ${}^{19}\text{F}$ (n, γ) ${}^{20}\text{F}$ だった。ウランとの反応では複雑な放射線が観測され、フェルミは慎重ながら超ウラン元素が生成している可能性を考えた。実際は主な反応は核分裂で、わずかに ${}^{239}\text{U}$ が生成していた。フェルミたちは中性子の放射化能力の実験の最中に、実験台の材質によって放射化の程度が変わることに気付き、中性子を減速すると強く放射化されることを見つけた。

1938年、中性子による核反応に関する業績でノーベル物理学賞を受賞した。この頃、イタリアはファシズム化が進んでいた。妻のローラがユダヤ人だったため、一家は受賞式の機会を使ってアメリカに亡命して難を逃れた。

1939年早々、核分裂の発見が報告された。直ぐに、核分裂による二次中性子の放出と連鎖反応の可能性に、多くの科学者が気付いた。中性子の泰斗フェルミは、連鎖反応を安定に行なう装置、原子炉を考案した。天然ウランを燃料とし、減速材に黒鉛を用いる原子炉が、シカゴ大学のスタジアムの地下に設置された。1942年12月2日14時20分に臨界に達した。これはマンハッタン計画の一部であった。フェルミはロスアラモスで、原爆の開発にも関与した。

戦後は、水爆の開発には倫理的に反対の立場を取り、シカゴ大学の原子核研究所で、パイオンと核子の相互作用を研究し、宇宙線の起源を探った。1954年11月末がんのために自宅で最期を迎えた。

JCO臨界事故から26年が経過して思うこと

加藤 和明

JCO臨界事故から26年が経過する日が刻々と近づいている。

ある知人に9月30日は何の日かと聞いたら石原慎太郎氏の誕生日だと言われた。確かに彼は昭和7年9月30日の生まれである。ついでに言えば、五木寛之の誕生日でもある。

1999年9月30日におきたJCO臨界事故のことを思いおこす人は少なくなってしまったようだ。かく言う自分もJCOが何の略か言えなくなっているのだから、人様のことをとやかく言える身ではないのだが。

事故や災害は、リスクを学ぶためのヒントが埋め込まれた貴重な経験でもあるが、そこから教訓が生まれぬまま時間とともに風化してしまうことは大変残念なことである。

～JCO臨界事故とは～*

【概要】1999年9月30日、JCO東海事業所の核燃料加工施設内で核燃料を加工していた最中、ウラン溶液が臨界に達して核分裂連鎖反応が発生し、この状態が約20時間持続した。これにより、至近距離で多量の中性子線を浴びた作業員3名中、2名が死亡、1名が重症となったほか、667名の被曝者を出した。事故原因は核燃料の加工工程において、JCO側が事故防止を重視した正規のマニュアルではなく「裏マニュアル」を作成して作業を行うなどの杜撰な管理を行った上、事故前日より作業の効率化を図るためその「裏マニュアル」からも逸脱した手順で作業を行っていたためであった。事故後、法人としてのJCOと、JCO東海事業所所長を始めとした6人が起訴されて裁判で刑事責任を問われた他、JCOは内閣府から加工事業許可取り消し処分を受け、ウラン再転換事業の廃止を余儀なくされた。

国際原子力事象評価尺度（INES）でレベル4（事業所外への大きなリスクを伴わない）に相当する事故である。

*「東海村JCO臨界事故」『フリー百科事典 ウィキペディア日本語版』

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/東海村JCO臨界事故>)。

最終更新 2025年12月6日(土) 12:00 (日本時間)
現在での最新版を取得。

このような重大な事故を起こしたJCOが処分を受けたわけだが、私は委託側にも危険性を伝える配慮が足りなかったのではないかと考える。

放射性物質に核燃料物質が含まれる場合には、臨界事故の発生防止をもっと重要視すべきである。そのためにも、制度設計の改善検討がされることを強く願うばかりである。

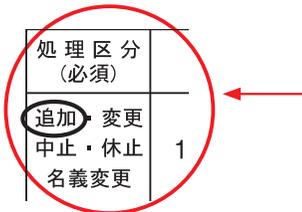
著者プロフィール

昭和10年7月1日
宮城県（鎌先温泉）にて出生（1935年）
昭和29年3月
青森県立青森高等学校卒業
昭和33年3月
東北大学（電気工学）卒業
昭和33年4月
原研（特殊法人 日本原子力研究所）入所
昭和36年9月
米国 ヴァンダービルト大学・大学院（物理）
オークリッジ国立研究所 留学
昭和42年～43年
東京大学原子核研究所に出席
昭和46年10月
文部省高エネルギー物理学研究所（KEK）
助教授、のち教授
平成7年1月
茨城県立医療大学（IPU）教授
平成16年3月
定年退職
現高エネルギー加速器研究機構（KEK）名誉教授
茨城県立医療大学（IPU）名誉教授
（NPO）放射線安全フォーラム 最高顧問

サービス部門からのご案内

「ご使用者変更連絡票」の「処理区分」をご記入ください！！

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして、誠にありがとうございます。
「ご使用者変更連絡票」をご記入の際は、「**処理区分**」のいずれかの項目に○印をつけてください。「ご使用者変更連絡票」と一緒に記入例、**処理区分早見表**をダウンロードしていただけますので、ご参照のうえ、ご記入をよろしくお願いたします。



株式会社千代田テクノル 行

フリーダイヤル (FAX番号)
0120-995-204

ご使用者の変更を次のとおり依頼します。

※処理区分は必ずご記入ください。

※お客様コードは必ずご記入ください。

ご使用者変更連絡票

※ご記入ください

氏名変更名 千代田テクノル総務部

姓 名 氏 姓 氏名

ご所属部署 千代田 太郎 電話番号 03-3818-5210

ご印画者印

処理区分 (必須)	登録コード	登録番号	個人コード	ご使用者名	性別	生年月日(西暦)	職種	学歴	入社	変更年月日(西暦)	22	備考	
追加・変更	123-4567-890			千代田 太郎	男	1960年	医師	FS		2024年	2月	24日	1日
追加・変更	123-4567-890				女	11月10日				20	年	月	日
追加・変更					男	年				20	年	月	日
追加・変更					女	年				20	年	月	日
追加・変更					男	年				20	年	月	日
追加・変更					女	年				20	年	月	日
追加・変更					男	年				20	年	月	日
追加・変更					女	年				20	年	月	日

*「ご使用者変更連絡票」は弊社ホームページからダウンロードできます。

<https://www.c-technol.co.jp/pdf/glass-badge/ご使用者変更連絡票.pdf>



*「ご使用者変更連絡票」は測定センター(フリーダイヤルFAX: 0120-995-204)までお送りください。

記事に関するご意見や掲載希望の記事案については、こちらまでお送りください ctc-fbnews@c-technol.co.jp

編集後記

- 暦の上ではまもなく立春ですが、まだまだ厳しい寒さが続いております。読者の皆様にはお健やかに過ごしのことと存じます。
- 本号では、「数字」と向き合いながら放射線と健康を考える記事が多く掲載されています。中島先生には、セシウム137の長期にわたる動物実験を通じて得られたネガティブデータの意義と、「数字の見せ方」によってリスクの印象が変わることをご紹介いただきました。
- 中川先生のコラムからは、「がんは知ることでコントロールできる病気」であり、生活習慣や検診の重要性を改めて教えられます。
- 山田先生の記事では、放射線防護分野の国際標準化が、現場の測定・評価を支える“見えないインフラ”であることが示されています。東京都立大学理学部化学科同位体化学研究室の紹介からは、放射性同位元素を駆使して環境浄化やエネルギー貯蔵、医療応

- 用に挑む若い研究者たちの姿が伝わってきます。長い時間をかけて積み上げられたデータや規格が、私たちが日々当たり前のように享受している「安心」の土台であることを、改めて実感させられました。
- フェルミの生涯とJCO臨界事故に関する寄稿は、放射線利用の歴史が輝かしい成果と痛ましい教訓の両方の積み重ねであることを思い起こさせます。私たちは、その経験から学び続けることで、より安全で豊かな放射線利用社会を次の世代へ手渡していかなければなりません。編集委員としても、正確な数字の裏にある物語を丁寧にお伝えしていきたいと思えます。
- 本号の記事が、皆様の日々の業務や暮らしの中で、放射線とのよりよい付き合い方を考える一助となれば幸いです。今後ともFBNewsをご愛読賜りますようお願い申し上げます。(小口 靖弘)

FBNews No.590

発行日/2026年2月1日

発行人/井上任

編集委員/小山重成 小口靖弘 中村尚司 野村貴美 福土政広 青山伸 野島久美恵 藤森昭彦 川端方子 篠崎和佳子 高橋英典 田谷玲子 東元周平 堀口亜由美 松本和樹 丸山百合子 牟田雄一

発行所/株式会社千代田テクノル

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/03-3518-5665 FAX/03-3518-5026

<https://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364円)