



Photo J. Mori

Index

産学連携での次世代層リスク教育に関する新たな活動と挑戦 ～NPO法人REHSE「高校生による環境安全とリスクに関する 自主研究活動の支援事業」の紹介～ ……飯本 武志・主原 愛・伊藤 通子・石黒 陽子・大島 義人	1
世界のMo-99供給の現状と問題点 ……………	源河 次雄 6
気象変動を抑えるために原子力エネルギーが必要……………	町 末男 11
最近の放射線計測技術……………	高橋 浩之 12
▶▶▶D-シャトルモニタリングサービスのご紹介◀◀◀……………	17
ACE GEAR Q&A -放射線業務従事者個人管理システム ……………	18
公益財団法人原子力安全技術センターからのお知らせ……………	18
[サービス部門からのお知らせ] ガラスバッジのラベルを変更しました……………	19

産学連携での次世代層リスク教育に関する 新たな活動と挑戦

～NPO法人REHSE「高校生による環境安全とリスクに関する自主研究活動の支援事業」の紹介～

飯本武志*1、主原 愛*1、伊藤通子*1,2,3、石黒陽子*2、大島義人*1

1. 環境安全とリスクに関する認知や 教育の現状についての雑感

我々の日常にはリスクがあふれている。ある種のリスクについてはその相場観が経験的に認知され、我々は必要に応じて適切な対策を施して危険を回避しながら生活を送っている。一方、我々の気づかないリスクが身のまわりに潜んでいることもある。教育や知識が十分でないがゆえに、リスクに気づかずにいることで危険にさらされることは避けなければならないが、逆にある種のリスクを過度に警戒し、常にあるいは一時的に不安をいだき、適度を越えた対策を施している例もあるかもしれない。リスクは安全側から危険側に至る連続的な特徴をもつがゆえに、個人や集団の理解度や価値観で容認レベルに大きな幅が生じ、結果として自身が施す対策やリスクに関する責任者に求める対応策に大きなギャップが生じてしまう可能性がある。この点がこの種の問題を難しくしている感がある。

キャンパスライフ。ここにもリスクがある。日常的な事例のみならず、大学や研究所特有の研究実験施設におけるリスクも存在する。危険な物質を扱うには、あるいは危険な作業をとまなう活動には、前もっての安全教育が義

務づけられていることはいうまでもない。安全教育に関しては法令等で定められているものもある。研究実験施設における適切な環境安全の確立を目指し、環境安全教育の内容、教材、方法については関係者間で議論をさらに詰め、開発を継続すべき重要な課題であると考えている。その前段階に位置する中等教育対象者（中学生や高校生）に対する学校現場や家庭におけるリスク教育、環境安全教育は果たして十分だろうか。彼らは卒業時に身のまわりのリスクを正しく認知し、判断できる社会人としての準備ができていであろうか。本稿ではこの部分に切り込み、環境安全とリスクをキーワードとした「高校生による自主研究活動」を後押しする目的で平成25年度からスタートした、産学連携での新しい活動の概要を紹介したい。

2. NPO法人REHSEの紹介

特定非営利活動法人研究実験施設・環境安全教育研究会（REHSE:レーゼ）は、ユーザーであり、研究・教育機関である大学・高専等と、環境安全管理職員、サプライヤーである器具・設備等のメーカー企業、施設等の設計・マネ

飯本武志 Takeshi IIMOTO

主原 愛 Ai SHUHARA

伊藤通子 Michiko ITO

石黒陽子 Yoko ISHIGURO

大島義人 Yoshito OSHIMA

*1 国立大学法人東京大学

*2 特定非営利活動法人研究実験施設・環境安全教育研究会（NPO法人REHSE）

*3 独立行政法人国立高等専門学校機構 富山高等専門学校（平成25年度当時）

ジメント・コンサルを行う企業等が一致協力して科学技術立国を標榜する我が国の研究実験環境の底上げを行い、環境安全性、研究生産性、そして経済を含めたパフォーマンスの全ての改善を達成することを目指している。

2007年に任意団体REHSEとしての活動を開始し、「安全基準策定に関する研究」「各種評価ツール開発」「普及促進のための国際技術展への出展」「啓蒙のための出版」等のソフトからハードに渡る幅広い取組みを展開してきた。2010年からは特定非営利活動法人（NPO）として、研究実験施設の環境安全について、①現場の問題解決を支援すること、②合理的な基準を提案すること、③教育を通じて人材を育成すること、④新しい学問領域を築くこと、を4本の柱に、化学を中心にバイオロジー・ナノテクノロジーなどを含めた領域において、研究実験施設として最低限必要と思われる実験環境のレベルを設定することや、関連の情報の普及を目的として活動している。

具体的には、化学物質リスク可視化システム（VICRi）やヒュームフードDVD教材（フード屋の魂）、カード認証型試薬庫の開発、研究実験施設のコンサルティング、実験設備のチェックリストの作成、実験室の耐震対策に関するハード・ソフト面からの検討、安全な実験研究活動を支援するためのフリーペーパー「研究生活」の発行、環境安全衛生に関する研究発表会・国際シンポジウムの開催などを行っている。本稿で紹介する「高校生を対象とした環境安全に関する課題研究活動」支援事業もREHSEの活動の中核のひとつである。

環境安全に関するREHSEの基本方針をふまえて、具体的なツール・プログラム開発を進める一方、これらのアウトプットを実験研究現場、社会に広く実装することを目指している。詳細については、REHSEホームページ（<http://www.rehse2007.com/index.html>）を参照されたい。

3. 高校生による環境安全とリスクに関する自主研究活動の支援事業

(1) 事業目的

本事業は、義務教育を終え、自主的に思考し、各々の意見を発信することができるレベルにある高校生や高専生（以降、高校生等）が、身のまわりの環境安全やさまざまなリスクを自身の問題として捉えるための調査研究活動を支援するものである。具体的には、高校生等自らが環境安全やリスクに関連のある研究テーマを決め、自主的に調査し、成果を報告書としてまとめ、さまざまな場面で成果を発表し、相互に意見交換する活動を支援することを目的とし、平成25年度からスタートした単年度メの事業である。

(2) 事業の概要

参加高校はREHSEの本事業のホームページ上で公募される（<http://www.rehse2007.com/koukousei.html>）。環境安全とリスクに関する研究のテーマとして、「化学物質」「バイオ」「放射線」「その他」の4つのキーワードが用意されており、その枠組みのなかで利用、安全、リスク、管理等に関する研究テーマを高校生等自身が設定することになる。本事業の審査委員会により認められた研究調査活動に対し、研究予算（数～10万円程度）がREHSEから授与され、高校生等はこの予算を有効に活用し、自らの計画にしたがって調査、研究活動を展開する。予算の用途としては、書籍購入、施設見学に伴う旅費、専門家へのヒアリングや出前講義の実施などに伴う講師の旅費や謝礼、消耗品購入、印刷代、通信費等が認められている。参加生徒は、研究調査活動の成果につき、定められた報告書（中間報告書、最終報告書）を提出する義務を負い、これらの報告書の内容により、審査委員会で若干数の優秀校が選考される。選抜された優秀校数校の指導教員1名と生徒2～3名が年度末に東京で開催される優秀校成果発表会（一般公開）に招待さ

れる。(これに係る旅費と宿泊費も本事業から全額が支給される。)

本事業はその活動費のすべてを、趣旨に賛同した企業、組織、団体等(以後、企業等)からの協賛金等で運営されている。また、事業全体がREHSEに所属するアカデミアチームのボランティアで運営、支援されている点が大きな特徴である。平成26年5月現在で14(うち2社は手続き中)の企業等(株式会社千代田テクノルを含む)からのご支援をいただいている。教育当局担当官からも右記のような応援を頂戴し、幅広いメンバーからのご協力、ご理解のもとで運営されている事業である。

(3) 平成25年度活動の紹介

平成25年度が本事業活動の初年度であり、ある意味、試験的で挑戦的な活動となった。参加校は6校。各校の区分キーワードと調査・研究タイトルは右記のとおりであった。

各校の参加形態はさまざまで、科学部/化学部等の部活動として、クラスの課外活動として、さらにはこの事業参加のために有志を募って新たなチームを結成してきた学校もあった。

中間報告書の審査、最終報告書の審査を経て、

初年度は参加6校全校が、平成26年3月15～16日に東京大学で開催された合同施設見学会、優秀校成果報告会に招待された。

初日の平成26年3月15日に東大施設(工学

「高校生による環境安全とリスクに関する自主研究活動」を応援します！

義務教育を終えた世代が、科学技術進展や利用について関心を高めるだけでなく、身のまわりの環境安全や様々なリスクについて自主的に研究するこの活動は、バランス良く判断できる社会人になるための第一歩になると考えます。友人と話し合い、報告書をまとめ、自らの成果を発表する過程で、意思決定のプロセスや、他の意見を上手に聴くことができるスキルも身につけられるでしょう。産学連携による支援体制を存分に活用し、是非多くのことを経験し、吸収し、自らの意見を発信してください。
高校生諸君による活動の成果に、大いに期待しています。

清原洋一
文部科学省 初等中等教育局 視学官

参加校	区分 キーワード	調査・研究タイトル
麻布高等学校	「化学物質」	多摩川中流域の水質調査 ～COD・硝酸態窒素値から多摩川の水質を分析する～
千葉県立流山おおたかの森高等学校	「その他」	遺伝子組み換え食品の安全性を考える
大阪府立天王寺高等学校	「化学物質」	淀川における底質土中の重金属濃度の測定
富山高等専門学校	「化学物質」	洗剤と共生する社会に
八戸工業大学第二高等学校	「放射線」	放射線で発電は可能か
早稲田大学本庄学院高等学校	「放射線」	(1) 自立航行ができる無人型潜水機の開発と水底堆積物のガンマ線量測定 (2) 空気中放射線量調査

平成25年度 合同施設見学会/研究成果発表会 東京大学にて開催 (3月15日～16日)

【3月15日(土)】(事前登録をした参加高校関係者とメンバーのみ)

- 15時 東京大学工学部12号館2階会議室集合
- 15時05分 全体概要、スケジュール説明(東大・環安本部 飯本武志准教授)
- 15時15分 タンデム型加速器施設 MALT紹介(東大・工 松崎浩之准教授)
- 15時45分 東京大学浅野キャンパス施設見学会(AB2班、入替)
(A班)MALT見学(移動含め40分見学):東大・工 松崎浩之准教授
(B班)クリーンルーム見学(20分解説、移動含め20分見学):東大・環セ 辻佳子准教授
- 17時半～18時 宿へ移動(徒歩)→ 弥生門、安田講堂、正門、赤門等本郷キャンパス経由

【宿泊】東京本郷「朝陽館本家」

- 18時半 夕食会(会食室)
- 19時 自由時間(入浴等)
- 20時半 21時半 自己紹介&学校紹介(会食室) 一各校10分の持ち時間で、自由にプレゼン。
- 21時半 自由懇談会(会食室) 参加自由(※成果発表会の発表順序を決定)
- 22時半 初日終了

【3月16日(日)】(一般公開) 東京大学工学部11号館講堂

- 平成25年度 研究成果発表会 司会:吉藤 肇、林理美子(REHSE理事長)
- 9時00分 開会挨拶および開会宣言 大島義人(REHSE理事長)
- 9時10分 活動概要(参加校/協賛企業紹介)および審査方法 飯本武志(実行委員長)
- 9時20分 成果発表会 各校20分の発表+5分の質疑
《休憩》
- 12時00分 産業界による環境と安全、リスクに関する研究開発と対応の最前線
アズビル、千代田テクノル、長瀬ランダウア、富士電機
- 12時45分 昼食
- 13時30分 特別講演「先端科学の光と影」 東大・医 鈴木崇彦講師
- 14時30分 審査結果発表、講評、表彰 大島義人(審査委員長)
- 14時50分 メンターからの講評、アンケート、記念撮影、等
- 15時15分 解散



写真1 東大施設見学の様子



写真2 宿での情報交換会



写真3 成果発表会の様子



写真4 参加高校関係者及び事業実行委員

系研究科原子力国際専攻共同施設タンDEM加速器研究棟、武田先端知ビルスーパークリーンルーム)の合同見学会を開催した。(写真1)同日の夜には宿泊施設で各校自慢や参加者自己紹介で懇親、情報交換し、翌日2日目の成果発表会に備えた。(写真2)成果発表は各校20分のプレゼンテーションと5分間の質疑で構成された。(写真3)この口頭発表と最終成果報告書の内容の両者が審査の対象とされ、会場出席者全員(65名)による投票結果を基に、審査委員会の厳正な審査を経て、平成25年度は八戸工業大学第二高等学校に最優秀賞が授与された。(写真4)各校の報告書、合同施設見学会および優秀校成果報告会の当日の詳細な様子は、事業HPを参照されたい。

また、本事業に協賛いただいた企業の中から、有志4社による各社の環境安全、リスクに関する研究開発状況や取り組みの事例が紹介された。高校生等にとっては企業の考え方や姿勢に直接触れる貴重な機会になったようである。アカデミアからは、平成25年度の高校生

による調査・研究テーマにはなかった「バイオ、医療分野」における話題が提供された。アンケート結果によれば、高校生等にとって印象に残った講演になったようであった。

担当顧問の先生のほか、各校の研究調査活動にはそれぞれの研究テーマにふさわしいメンター(参加生徒のためのよろず相談窓口の位置づけ。REHSEからの推薦による当該分野の専門家)が1名ついた。唯一の大原則として「活動のすべてが高校生主体で実施されること」が条件に掲げられていることから、テーマの設定や調査・研究の手順、成果のとりまとめ、予算の使途にいたるまで、高校顧問やメンターが研究活動を「誘導」することは禁じられた。担当顧問やメンターは、予算管理の適切性、実験の実施や見学等における危険性の有無、コンプライアンスの観点等を中心に、後方からみまもることに努め、高校生等からの求めがあった場合にのみ最低限のアドバイスをする姿勢で本事業に参画した。その意味では、各校による研究の方法、成果の内容、

報告書のとりまとめかたには一般的な研究としての不備や不具合が散見されることも事実ではある。しかし、本事業の趣旨は、高校生等自身が自由に発案し、幾多の困難を乗り越えて実施計画を実現し、(成功でも、失敗でも)なんらかの結果を得て、自らの声で地域文化祭や学園祭等で発信し、自らの力で限られた時間のなかで成果をまとめる、このプロセスを実体験することに重点がおかれている。本事業でさまざまな体験をした高校生等が環境安全とリスクの分野に興味をもち、(意見の異なるかもしれない)他者の声をしっかりと聞く重要性を学び、自身の考えを適切かつ効果的に発信できる成人として成長し、さらにはそのうちの一部が将来に同分野を牽引する優秀なメンバーになってくれれば、本事業の目的は達成されるであろう。

(4) メンターとして感じたことと本事業への提案 ～富山高専の例～

こんな事業があるんだけど、と紹介すると「やってみたい」と3名が手を挙げた。1年生の時にプロジェクト型の問題解決に取り組む授業を一緒にチームで経験した2年生3名だ。

取り組みたい課題を見つけ、資金と専門家の支援を得た彼らは、普段の授業とはまったく違う能力を発揮しながら「自主的な研究活動」に熱中して取り組んだ。熱中すると楽しい。熱中して取り組むと、特に若者はぐいぐいと伸びる。側面から支援していて、彼らの熱心さと成長は感動するほどであった。私たちは環境を整えて見守り、質問や相談にも答えは出さず、やる気を喚起するような問いかけやつぶやきを返すだけである。

彼らは夢中になると自然に力が付く。例えば情報収集・選択・活用・発信力(教科書を始め、WEB、書籍、専門家から集め、正しい情報や有益な情報を取捨選択)、交渉力(活動場所の確保、実験道具や薬品の購入や調達、実験計画書を学校に提出して許可を得る、各専門分野の先生方にアポを取り訪ね質問する

など)、議論する力(友人同士の会話ではなくまさに議論)、そしてそれらを統合する企画力とマネジメント力などである。次々と生まれる疑問に取り組んでいくと、自ずと専門的知識が深まっていく。科目をつなぎながら広がっていく。身近なモノへの興味からスタートしたが、最後の発表時には、世界の環境問題や、何十年後の未来に思いを馳せた提案を堂々と楽しそうに行った。そして、もっと学びたいという意欲と将来の自分たちが就きたい仕事(エンジニア)への抱負まで語ってくれた。

実は、活動中、実験計画を立てたが環境が整わずにあきらめた実験もあった。やってみたいが高校ではできないという実験があれば、REHSEの資源(大学、企業の設備やノウハウ)を使ってできないか検討する機会をもてないだろうか。地方の学校ではできないことを実際に経験するチャンスも、本事業でなら可能ではないだろうか。そんな期待感も大きく広がる、関係者皆で協力して育てたい事業であることを強く感じた。

4. おわりに

高校生等は、様々な社会的課題に興味・関心を持ち、その興味・関心に関連づけて自分の将来を考え始める重要な年代にある。「環境安全とリスク」という現代社会が抱える大きな課題に取り組みながら学ぶ本事業は、産学の協働により、学校や塾とは異なるもうひとつの学びの場を提供している。このような新しい学びの場をつくり、さらなる充実をめざして、関係者一同、一社でも多くの企業の参画、ご協力をお願いしているところである。

末筆ではあるが、本事業の支援をいただいている企業関係者の皆様、メンターの皆様、アカデミックメンバーの皆様をはじめ、関係者すべての方に謝意を表す。

世界のMo-99供給の現状と問題点



源河 次雄*

1. はじめに

近年の核医学検査や診断技術の進歩は著しいものがある。なかでも検査対象の臓器に応じて標識される検査製剤の多様さと医療現場における設備の普及とから、テクネチウム-99m (^{99m}Tc : 半減期6時間) を使用する核医学診断はますます重要になっている。全世界で年間3千万件以上の核医学検査が行われており、そのうちの80%が ^{99m}Tc を使用した検査である。世界の人口の高齢化が進む中、特に途上国における需要はますます増加することが予想されている。

現在 ^{99m}Tc の先駆体であるモリブデン-99 (^{99}Mo : 半減期66時間) の供給の大部分はウラン-235 (^{235}U) の核分裂によって得られている。このような中であって、 ^{99m}Tc の安定供給確保のためには ^{99}Mo 製造炉の老朽化の問題とどう取り組むか、同時に対テロ対策上、核兵器転用可能な高濃縮ウラン (HEU) を原料とした製造法から如何に脱却するかが重要な課題となる。そのため製造プロセスの低濃縮ウラン (LEU) への移行の促進、天然モリブデンの放射化や加速器の利用などHEUに依拠しない技術体系の確立、さらに安定供給を支える持続可能な経済構造の構築が急がれている。

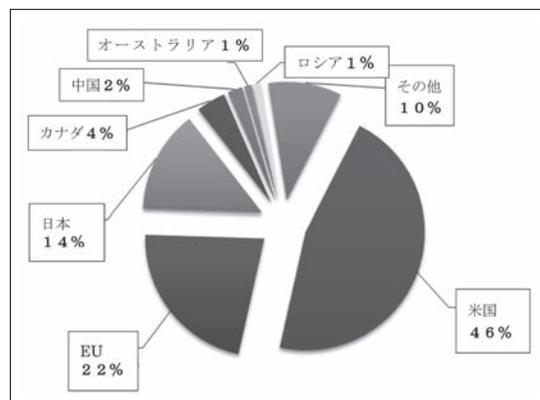
2. 需要供給の現状と将来予測

世界の医療用 ^{99}Mo の需要量として2010年頃までは12,000 6-day Ci/週という値が定着していた。しかし、経済協力開発機構 (OECD) 原子力機関 (NEA) の医療用RIの供給確保に関する専門家グループ (HLG-MR) が、市場関係者から得た情報を基に、それまでの値よりも低い10,000 6-day Ci/週という値に修正した。この需要の減少は2009-2010年の供

給危機を経験して、入手した ^{99}Mo 使用量の節約、 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータの溶離効率の向上、診断の検査方法の ^{99m}Tc 以外の他核種による代替等の努力の結果である。結局現時点で約10,000 6-day Ci/週の ^{99}Mo が、米国 (46%)、EU諸国 (22%)、日本 (14%)、カナダ (4%)、中国 (2%)、オーストラリア (1%)、ロシア (1%) 及びその他 (10%) の地域に供給され消費されている (第1図)。

ところでこの6-day Ciという奇妙な単位は、比較的短い半減期を有する ^{99}Mo を取扱うにあたってその量 (放射能) を統一的に把握するための実用単位であり、照射後の処理工程を終えた時点から6日間経過した値を表す。6-dayという日数に物理学上の根拠はないが、輸送を経て利用に供されるまでに平均6日を要することから決められた。したがって原子炉で製造される ^{99}Mo の量は実際に利用に供される量の約6倍ということになる。(第2図)

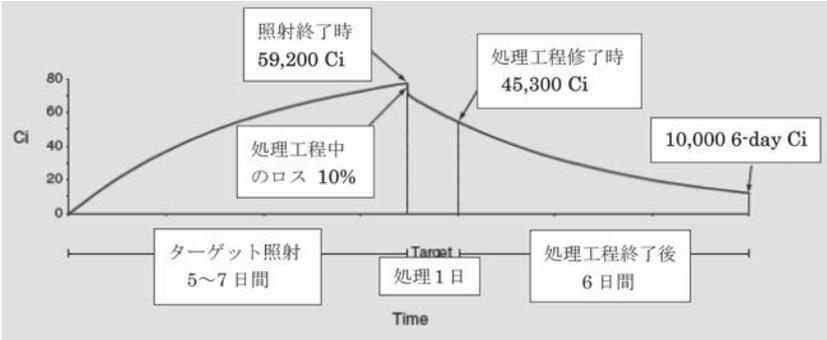
$^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 供給の流れは、ターゲット製造施設に始まり、照射用原子炉、照射済ターゲットを溶解



(出典: Anton Khlopkov 他, Center for Energy and Security Studies, Feb. 2014)

第1図 Mo-99需要の国別割合

* Tsuguo GENKA 元 独立行政法人日本原子力研究開発機構 嘱託



第2図 6-day Ciの定義

Reserve Capacity : ORC) を検討した結果「真の需要曲線」は ORCが +35%と +62%の間にあるとした。これを受けて供給者側も 50%程度のORCは妥当だとしている。

3. 照射用原子炉の高齢化

し⁹⁹Moを抽出する処理施設、⁹⁹Mo/^{99m}Tcジェネレータ製造業者、溶離した^{99m}Tcで標識して医薬品を調製する製薬業者及び輸送業者から構成され、それぞれがスケジュール通りに運用されることが求められる。

2011年、HLG-MRは2015年から2020年までの需要予測を行うにあたって市場関係者の情報をもとに需要の伸び率を見直し、世界需要の84%を占める成熟した市場（北米、ヨーロッパ、日本、韓国）で年率0.5%、16%を占める新興市場（南米、アフリカ、日本と韓国を除くアジア）では年率5%とした。また単に現在の需要量を把握するだけでなく、OSIRISとNRUが戦列を離れる2016年前後の状況や、当面存続する中で最大級のHFRが計画外停止した場合等を想定し、バックアップのための予備的容量（Outage

世界の⁹⁹Moの供給は限られた数の原子炉と処理施設に依拠しており、最近まで大量の⁹⁹Mo製造のための照射を担ってきた研究炉は、NRU（カナダ：2014年現在57才）、HFR（オランダ：53才）、BR2（ベルギー：53才）、OSIRIS（フランス：48才）、SAFARI（南アフリカ：49才）の僅か5基のみである（第1表）。照射されたターゲットはAECL/MDSノルディオン（カナダ）、Covidien（オランダ）、IRE（ベルギー）、NTP（南アフリカ）の4か所の処理施設を通じて世界需要の95%が供給されて来た。

多くの原子炉が既に老齢化しており何れも10年以内に⁹⁹Mo製造用ターゲットの照射を中止することが予想されている。しかしMARIA（ポーランド）、LVR-15（チェコ共和国）、OPAL（オーストラリア）等が新たに供給の戦列に加わった。RA-3（アルゼ

第1表 主な原子炉のMo-99製造用ターゲットと照射量 2014年現在

原子炉 (所在地国名)	ターゲット	年間稼働日数	週間照射量 (6-day Ci/w)	初臨界年-月	予想される運転終了年
NRU (カナダ)	HEU	280	4 680	1957-11	2016
HFR (オランダ)	HEU	280	4 680	1961-11	2024
BR-2 (ベルギー)	HEU	140	7 800*	1961-6	2026
OSIRIS (フランス)	HEU	182	2 400	1966-9	2015
SAFARI-1 (南アフリカ)	HEU/LEU	305	3 000	1965-3	2030

*2010年4月新照射リグ設置後の照射量。従来は 5200 6day-Ci/w 実際の増加量は未確認

第2表 新規参入炉のMo-99製造用ターゲットと照射量 2014年現在

原子炉 (所在地国名)	ターゲット	年間稼働日数	週間照射量 (6-day Ci/w)	初臨界年-月	予想される運転終了年
LVR-15 (チェコ共和国)	HEU	210	2 800	1957-9	2028
MARIA (ポーランド)	HEU	210	2 200	1974-12	2030
OPAL (オーストラリア)	LEU	300	1 000	2006-8	2055
RA-3 (アルゼンチン)	LEU	336	400	1968-8	2027

ンチン)も照射量こそ多くないが既に2002年からLEUターゲットにより⁹⁹Mo供給の一環を担っている。(第2表)

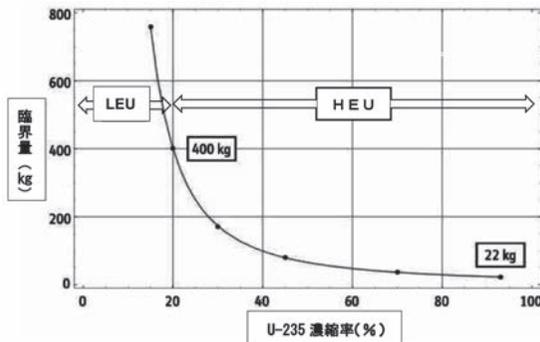
現在は第1表と第2表を合わせて合計9基の原子炉で、運転スケジュールを互いに調整しながら⁹⁹Moの需要に対応している。しかしそれでも供給の流れには脆弱性が付きまとう。老朽炉の突然の運転停止や安全運転確保のためのメンテナンス期間の予定外の延長などには常に対処しなければならない。

第2表の中のLVR-15は初臨界がNRUと同じ1957年であるが、この炉は1989年に大改装が行われ、RI製造は2010年5月から開始している。MARIAは2014年9月から2200 6-day Ci/週に増量見込み。またOPALは2006年8月に初臨界を迎え、その後着々とLEUターゲットによる⁹⁹Mo製造の実績を積み上げ日増しに存在感を高めている。なおLVR-15とMARIAはターゲットの照射のみで⁹⁹Moの分離精製は行っていない。

4. 高濃縮ウランからの脱却

高濃縮ウランの民生利用は、1953年12月8日のアイゼンハワー米大統領による国連総会での演説“Atoms for Peace”に端を発する。以来1957年から2012年までに米国から各国に輸出されたHEUは炉燃料用、⁹⁹Moターゲット用合わせて22,600kgに達し、その後協定に従って返還された分は7,700kg。その他は保管されるか濃縮度を下げて再利用されている。2012年に韓国で開催された「ソウル核安全サミット」では米国主導によりベルギー、フランス、オランダが2015年までにLEU化する方針を再確認し「医用RIの安定供給とHEU使用の最小化に関する共同声明」を発表した。また同サミットではベルギー、フランス、韓国が高密度LEU燃料の開発、ポーランドがMARIA炉の2014年までのLEU化、ロシアが6基の研究炉燃料のLEU化への検討開始、南アが⁹⁹Mo製造のLEU化達成についてそれぞれ報告した。

このように原子炉燃料及び医用RI製造用ターゲットのLEUへの転換を積極的に推進している米国であるがジレンマもある。自国への医用アイソトープ供給を確保するためカナダ、ベルギー、フランス、ドイツ、オランダに対し燃料とターゲットのためのHEUを条件付きながらも輸出を継続している。同じ理由で2013年からはポーランドとチェコ共



第3図 U-235の濃縮率と臨界量の関係

和国にもHEUを供給している。

LEUターゲットによる⁹⁹Mo製造の技術的可能性については既に検証済みであり、LEUの輸送、保管、管理のコストもHEUよりは軽減されることがわかっている。しかし既存の施設の途中からの変更には巨額の経費と長期に亘る製造供給の中断、廃棄物の増加、分離精製法の変更に伴う許可申請などの問題があり、製造規模が大きい供給者程ハードルは高い。

現在⁹⁹Mo製造用ターゲットとして年間40~50kgのHEUが使用されており、その供給源は主に米国とロシアである。⁹⁹Mo製造の場合濃縮率93%のHEUが炉内で照射される時間は7日間程度でありU-235の燃焼率は5%以下に過ぎない。したがって使用済みであっても依然として濃縮率90%程度のHEUである。核爆発のための臨界量は濃縮率93%の場合僅か22kgなので民間施設に貯蔵することの危険性は深刻である(第3図)。ちなみに広島に投下された原爆には濃縮率80%のHEU 64kgが使われた。

5. 今後に向けての取り組み

将来の⁹⁹Moの需要と供給の安定化に向けていろいろな技術の開発とインフラの整備が進行中であるが、取り組みの成否を判定するには技術上の実現性だけでなく経済上の採算性の確立が重要な指標となる。しかしその進捗の度合いは様々であって必ずしも計画通りに進展していないのが実情である。

5.1 ヨーロッパ EU圏内では、以下に述べるような照射量の増加に繋がる計画が進行中である。

- ・FRM II (ドイツ) 2005年からミュンヘン工科大学(TUM)によって運転されている新しい研究炉、2014年からウランターゲット照射可(計画最

大供給能力：ヨーロッパ需要の60%、年間240日運転)

- ・ **JHR (フランス)** 原子力庁 (CEA) により建造運転される新材料試験炉、2014年に運転開始予定 (最大供給能力：ヨーロッパ需要の35%、70%まで増加見込み、年間220日運転)
- ・ **PALLAS (オランダ)** HFRの代替炉として2017年からオランダ原子力研究・コンサルタントグループ (NRG) により運転される新提案の材料試験炉 (供給能力見込み：ヨーロッパ需要の100%以上、年間運転300日)
- ・ **MYRRHA (ベルギー)** 2022年より原子力研究センター (SCK-CEN) によって運転予定の加速器起動型 (ADS) 原子炉 (供給能力見込み：ヨーロッパ需要の100%以上、年間運転240日)

5.2 米国 世界最大の消費国でありながらMo-99の製造を行っていない米国では、エネルギー省 (DOE) 傘下の国家核安全保障局 (NNSA) 主導のもと2007年より地球的規模脅威削減イニシアティブ (GTRI) の枠組みの中でHEUを使用しない国産Mo-99 製造ルートを開拓するため、以下に述べる四つのプロジェクトに対して1件あたり2,500万ドルを上限として50%~50% 経費負担方式による資金援助を行っている。

- ・ **NorthStar Medical Radioisotopes, LLC** 高出力加速器からの高エネルギー電子線による制動放射光子を使った¹⁰⁰Mo (γ, n) ⁹⁹Moによる方法。2016年から米国需要の約50%を製造予定。
- ・ **SHINE Medical Technologies** 加速器によりLEUに中性子を照射する未臨界集合体による核分裂方式。SHINEとはSubcritical Hybrid Intense Neutron Emitter の略である。完成予定は2016年、設計最大製造量は米国需要の50%相当。
- ・ **Babcock and Wilcox (B&W)** 200kWのモジュール炉心から成る多段式小型液体燃料炉 MIPS (Medical Isotope Production System) により、燃料とターゲットを兼ねたLEU溶液 (硝酸ウラニル) を循環させ途中核分裂生成物から⁹⁹Moを分離。
- ・ **GE-Hitachi Nuclear Energy** 商業発電炉 (BWR) の炉心内中性子束計測機器挿入孔を利用した⁹⁸Mo (n, γ) ⁹⁹Mo反応による製造。国内需要の50%対応可能としていたが2012年2月、採算性を理由に開発の無期限凍結。

以上のプロジェクトの他にも幾つかの企業や研究所で新技術の開発が行われている。Northstar/

MURRやPerma-Fixによる中性子放射化法、Global Isotopes Medicalの²³⁸U (n, f) ⁹⁹Mo等がその例である。

5.3 カナダ 建造後半世紀以上を経たNRU炉の代替炉として建設されたMAPLE-1及び2が、出力反応度係数の問題を解決できず、2008年5月遂に廃炉の決定がなされた。1基のみでも世界の需要を充たし、しかも両炉が互いにバックアップするという意欲的な計画であっただけに、北米のみならず世界中の核医学関係者に衝撃を与え改めて⁹⁹Mo供給に対する危機意識を喚起する結果となった。なおMAPLEに出資していたMDSノルディオン社はAECLを提訴し2013年8月によろやく和解が成立するという後遺症も残した。

NRUは2016年に運転を停止することが既に確定している。現在は原子炉によらない製造ルートとして、TRIUMF (Tri-University Meson Facility) 内のグループが加速器による光子-核分裂反応²³⁸U (γ, f) ⁹⁹Moにより世界需要の5%程度の⁹⁹Mo製造を目標としている。

5.4 オーストラリア 2007年4月OPALを完成。燃料板の位置ずれや重水反射槽への冷却水しみ出しなどの初期トラブルを克服し、今やOPALはLEUを使用する大量製造サイトのモデルとして期待されている。2014年5月には所管大臣が⁹⁹Moの製造能力を3倍 (3600 6-day Ci/週) に引き上げるため新たなターゲット処理施設とSynroc法による廃液処理施設をルーカスハイツ構内に建設し2016年から稼働させると発表した。

5.5 ロシア 世界に占める医用アイソトープ製造量の割合は今のところ1%以下に過ぎない。しかし工業用アイソトープに関しては世界市場の約20%を占めており技術の信頼性は高い。したがって最近の供給危機に鑑みてロシアのアイソトープ技術の存在感が高まっている。

国営原子力企業ロスアトムは2010年、傘下の原子炉科学研究所 (NIAR) で⁹⁹Mo製造施設の建設に着手した。2010年12月には処理施設も完成し250~400 6-day Ci/週の製造を可能とした。引き続き2012年6月NIAR内に第2の照射ターゲット処理施設を完成させ、両施設が共に稼働すれば合わせて1200 6-day Ci/週の製造量が見込まれる。ターゲット (HEU) 照射は3基の原子炉 (SM, RBT-6, RBT-10-2) を使用するが1基はバックアップ用である。今のところロシアの⁹⁹Mo製造では原子炉燃料、ターゲットともにLEUへの切り替えは出来ていない。

最近までロシアの⁹⁹Mo/^{99m}Tcの需要の大部分は

オブニンスクのカルポフ記念物理化学研究所(NIFKhI)から供給されていた(170 6-day Ci/週)が現在のところロシアのMo-99需要は限定的(約100 6-day Ci/週)であり新たに得られるNIARの⁹⁹Moは大部分を輸出に回すことができ、世界需要の15%をカバーすることが出来るという。

5.6 日本 米国に次いで世界第二位の⁹⁹Mo消費国であるが全量を輸入に頼っている。先の供給危機の後わが国は、内閣府の下に安定供給のための官民検討会を立ち上げ、今後の輸入困難事態に備えて可能な限り補完する態勢を整えるべく種々の製造技術について検討と情報交換を行っている。

- ・ **研究炉JMTR (原子力機構)** 高密度MoO₃ペレットによる⁹⁸Mo (n, γ) ⁹⁹Mo法。分離・抽出・濃縮技術、Moリサイクル技術等の開発に取り組む。規模は国内需要の20%を見込む
- ・ **発電炉BWR (日立GEニュークリア・エナジー)** 格納容器内で金属⁹⁸Moを放射化して⁹⁹Moを回収する。国内需要の100%、但し福島原発事故後の社会的状況から原子力発電所による医用RIの大量製造は当面困難。
- ・ **加速器 (原子力機構)** 高速中性子による¹⁰⁰Mo (n, 2n) ⁹⁹Mo反応を利用、国内需要の13%
- ・ **中型サイクロトロン (放医研)** による¹⁰⁰Mo (p, pn) ⁹⁹Mo法、国内需要の4%
- ・ **小型サイクロトロン (放医研)** による¹⁰⁰Mo (p, 2n) ^{99m}Tc反応による^{99m}Tcの直接製造、国内需要の2%

6. おわりに

2009年から2010年にかけての世界的な⁹⁹Mo供給危機から5年の歳月が経過しようとしているが、今日に至るも数基の古い原子炉に依存したウランの核分裂法による製造が世界市場で供給の主役であり続けている。その間にも加速器の利用など従来技術に囚われない多様な提案と研究開発が各国でなされているが、実用化して安定供給の一角を担うためには技術的にも経済的にも持続可能であることが実証されなければならない。実際の運用開始はその多くが2016年以降に設定されている。NEA/HLG-MSは安定供給の見通しを中長期的に展望する中で、新規のプロジェクトが予定通り進まない場合を想定した需要予測も行っている。

OECD/NEAレポートその他の海外情報を俯瞰すると新たな供給危機の再来が予見される。NRUが

2016年に、OSIRISも同じ頃に前後して永久停止されることが決まっているが両炉合わせて今日調達可能な量の1/4以上を占めているだけに相当な影響が懸念される。しかも第1表にある現役の主な原子炉サイトが照射ターゲットをLEUターゲットに切り替える目標の時期(2015年)とも重なるので、今後数年間の安定供給体制を如何に維持していくかが重要な課題となっている。

最後に、当事国の研究炉による(n, γ) ⁹⁹Mo法は、ウランの核分裂法に比べその地域分散性と既存施設一部変更の容易さから、差し迫った供給危機に対処するための短期的シナリオとして現実的な方向であることも銘記しておきたい。

参考資料

1. OECD/NEA, A Supply and Demand Update of the Molybdenum-99 Market, Paris, August 2012,
2. Anton Khlopkov et al. Ending HEU Use in Medical Isotope Production: Options for Russian - U.S. Cooperation, Center for Energy and Security Studies, February 24, 2014,
3. European Research Reactor Position Paper by CEA, IRN, NRG, RCR, SCK · CEN, POLATOM, and TUM: Scenario for Sustainable Molybdenum-99 Production in Europe, March 3, 2011
4. M.R.A.Pillai et al, Sustained Availability of ^{99m}Tc: Possible Paths Forward, J. Nucl. Med., 2013; 54:313-323
5. OECD/NEA/HLGMR, Medical Isotope Supply in the Future: Production Capacity and Demand Forecast for the ⁹⁹Mo/^{99m}Tc Market, 2015-2020, April 2014

著者プロフィール

1937年生まれ。1962年から1996年まで日本原子力研究所勤務。その間1978年原子力留学生としてANSTOのルーカスハイツ研究所に滞在。1991年より国際放射能計測委員会(ICRM)副会長を2期4年勤めた。退職後は1998年より国際技術協力員としてインドネシア原子力庁(BATAN)に駐在。着任早々ジャカルタ暴動に遭遇、BATAN職員の誘導で焼打ちにくすぶる街を抜け空港へ。危険を冒してくれた職員に今も感謝している。3年間駐在後2001年より原子力産業会議に在籍、アジア原子力協力フォーラム(FNCA)のプロジェクトリーダーとしてPZC型Tc-99mジェネレータの開発を担当。2009年より2013年日本原子力研究開発機構嘱託。JMTRによるMo-99国産化研究との関連でBATANの多目的炉を使う共同実験を支援した。

気象変動を抑えるために原子力エネルギーが必要

元・原子力委員 町 末 男



懸念される温暖化と気候変動

一昨日6月1日、まだ梅雨前だというのに、筆者の住む高崎市で気温が36度まで上がった。この日全国で熱中症のため入院した人は491人、亡くなられた人が1人、4人が重体だという。

一方、僅か4か月足らず前の2月には、高崎でこれまで降った事もない70センチもの大雪が降り、多くの温室やカーポートが壊れて多額の被害が出た。まさに異常な気象である。異常気象の被害は日本だけではない。昨年11月フィリピンレイテ島での風速80メートルもの巨大台風で死者5千人以上の方々が亡くなっている。

国連の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)最新の4次報告(13年9月27日公表)は95%の確率で地球温暖化は人類の活動から排出される炭酸ガスなど温暖化ガスの増加によるものであり、このままでは2100年までに4.8℃もの温度上昇になると懸念を表明している。多くの専門家が2050年までに炭酸ガス排出を90年のレベルから50%減らさないと破壊的な気候変動が起こると警告している。早急な排出削減努力が求められている。



南太平洋の島ツバルは温暖化による海面上昇のため、潮位が高い時には道路まで海水がきて住民は困っている

温暖化ガスの排出削減の国際社会の努力

温暖化ガスの排出削減に向けて、京都議定書に次ぐ新しい国際的枠組みの検討が進んでいる。来年パリで予定されている21回国連気候変動枠組条約締結国会議COP21では、各国の削減目標を示した国際取り決めが合意される。2020年から発効する新しい枠組みにはすべての条約締結国が参加し、一定の合意された削減量を達成する義務を持つ。中国、インドなどの途上国には削減義務がなかったこれまでの「京都議定書」に較べると大きく改善されているので、削減の実現効果が期待される。

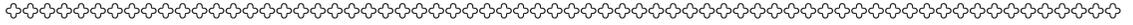
昨年ポーランドでのCOP19の会議で、日本は2020年の炭酸ガス排出量を2005年から3.8%減らすと述べている。これでは1990年に較べ3%増加となり、これまで鳩山元・首相などが約束してきた1990年比25%削減と比べると大きな後退だが、原子力発電がすべて止まっており、多量の炭酸ガスを発生する石炭と天然ガス火力をフル稼働している事から止むを得ない発言となった。

一方、米国のオバマ大統領は、これから米国が世界の炭酸ガス削減の先頭に立つと述べており、昨日6月2日には環境保護局が米国火力発電の炭酸ガス排出量を30%減らす事を目指す規制案を提出し、削減のための原子力発電利用の重要性についても述べている。

気候変動の危機を回避するために、世界は一致して努力している。このため、再生エネルギーの拡大も大事だが、削減効果が大きく経済性も優れている事が明らかな原子力発電の安全な利用が世界の大きな流れになっている。

日本も新しい安全基準に従って安全を確認した原子力発電所の再稼働を1日も早く実現し、炭酸ガス排出削減に動き出すべきである。

(2014年6月3日稿)



最近の放射線計測技術



高橋 浩之*



1. はじめに

放射線計測は、原子力システムの根幹を担う重要な技術分野であるが、その技術自身は常に進歩を続けている。福島第一原子力発電所事故を受けて、環境中の放射線や食品のモニタリングは大変重要になっている昨今であるが、放射線の応用は多岐にわたっている。核医学診断などは体内の放射能計測として重要な応用である。空港の手荷物検査、核物質・放射性物質の計測は、テロ対策など、セキュリティに関連して今後開発が必要となるものである。このように現代の放射線計測では、多彩な応用分野に応じて発展した多様な技術が存在する。ここでは、放射線の計測原理からはじめ、今後放射線モニタリングにおいて普及してくると考えられる新たな放射線計測技術に焦点をあてて、全体を眺めることとしたい。

2. 放射線計測におけるさまざまな計測原理

放射線と物質の相互作用には、電離・励起・発熱などがあるが、今、適当な電場を与えると、電離により生成した電荷に対して、電場により受ける力は正電荷と負電荷に対して、それぞれ逆方向に働くので、これらを引き離すことができる。放射線の電離作用により生成した電荷を用いるには、検出器体積中に電場を導入することが不可欠であるが、絶縁体

以外では、与えた電場に応じた暗電流が流れ、放射線入射による電流か、暗電流かの区別がつきにくくなる。気体を用いることで、絶縁性は保たれ、検出が可能となるが、高抵抗の半導体を用いることも可能である。一方、電荷を計測するのではなく、発光を計測原理とする場合はシンチレーション検出器である。適当な光検出器との組み合わせで高い検出効率を実現することができる。

2.1 比例計数管の最近の進展

電離箱において、さらに強い電場を与えると、信号が再び大きくなる比例領域に入る。この領域においては、入力信号の大きさとその比例性が成り立つ。比例領域を超えてさらに電場を強くすると、比例性が少しずつ失われてくる。この領域を制限比例領域と呼ぶ。比例計数管は、比例領域でのガス増幅を応用した計数管である。一般に、細いワイヤからなる陽極線を用いて電気力線を陽極に集中させ、局所的に強い電場を陽極線近傍に生成することがよく行われているが、最近、これに置き換わるものとして、微細加工を用いた比例計数管であるMPGD (Micro Pattern Gas Detector) の進展が著しい。MPGDはILLのA. Oedが最初にストリップ電極のものを考案したが^[1]、CERNのF. Sauliらはカプトン箔に無数の小さな穴をあけ、箔の両面に電極を蒸着したGEM (Gas Electron Multiplier) というものを提案した^[2]。GEMの両面に高電圧を印加

* Hiroyuki TAKAHASHI NPO法人放射線安全フォーラム 副理事長／東京大学大学院工学系研究科 教授

すると、カプトン箔は誘電体であるため、穴の中で電場が強く、電子雪崩が生じる。本構造は非常に簡単であり、また、電子は穴を通過するため、原理的に多段構造を取ることで増幅度を非常に高くとることができる。最近東大とHoyaガラスでカプトンの代わりにガラス基板を用いたGlass GEMが開発され^[3]、一枚のGlass GEMでもガス増幅度 3×10^4 程度までの高い値が得られている。図1は開発されたGlass GEMの写真であり、図2はAr/CO₂混合ガスを用いて測定したガス増幅

度の値である。1万を超える高い値が得られており、波高分析とイメージングの双方を同時に可能とする検出器を作ることができる。

2.2 シンチレータと光検出器

シンチレータの特性としては、発光量とその入射エネルギー依存性、発光波長、減衰時間、安定性(含、耐潮解性)、原子番号、密度、放射線損傷(耐放射線性)、温度特性、コストなどがあるが、 γ 線の計測に用いられるシンチレータは、一般的には原子番号が大きく高密度であることが望ましい。最近PET用

にセリウムドープ型の酸化珪素シンチレータが開発されており、Lu₂SO₂Ce (LSO)、LYSO、PrをドープしたLuAG^[4]などが高い性能を示しているが、Luを主要元素として含むシンチレータでは、Lu-176が 3×10^{10} 年程度の半減期をもつ放射性核種として存在している(存在比2.6%)ため放射能計測には適当でない。一方、国産のGAGG^[5]やGSOなどのGdベースのシンチレータは、高い密度と大きな原子番号を示すため、 γ 線放射能計測への利用が考えられる。また、光検出器も光電子増倍管以外に、APD(Avalanche Photodiode)、ガイガーモードで利用するAPDを多数並列に動作させる原理によるSiPM^[6]、MPPCなどの利用が進展しつつある。SiPMは温度特性があまりよくないものの、温度特性の補償や過電圧

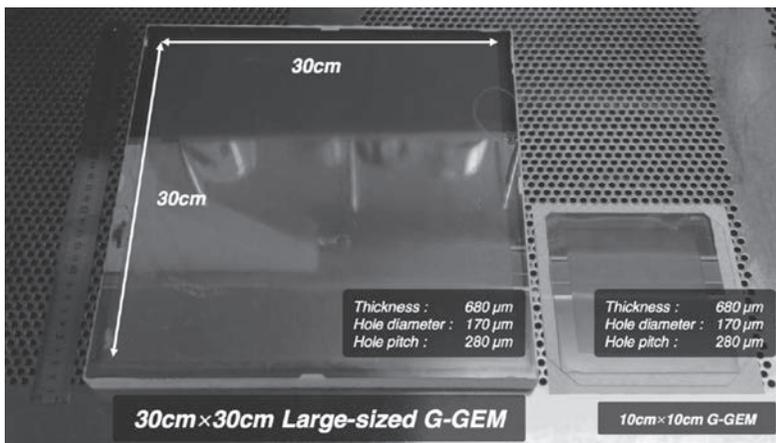


図1 Glass GEM検出器の例

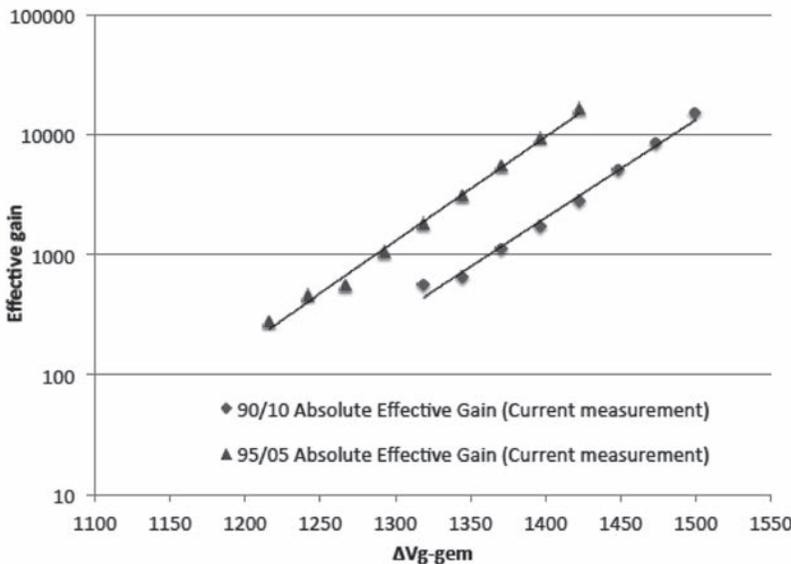


図2 Ar/CO₂混合ガスを用いて測定したGlass GEM検出器のガス増幅率

を用いて温度特性を改善する手法なども開発され、広く用いられつつある。

2.3 半導体検出器

単一半導体では、半導体産業で培われた高い結晶製造技術により、 α 線・ β 線・X線計測においては、シリコン半導体、 γ 線計測にはゲルマニウム半導体が主に用いられている。

ゲルマニウム半導体検出器は、低温での動作が必須であり、若干制約はあるものの、シリコン半導体検出器と同様に両面にストリップを形成したものや、ピクセルを形成したものが製作されている。カリフォルニア大学・ローレンス・バークレー国立研究所では、高いエネルギー分解能が要求されるコンプトンカメラなどの応用に供給されるガンマ線イメージング用のゲルマニウム検出器を開発しているが、ゲルマニウム結晶の表面にa-Siによるブロッキング層を形成して、読み出しを行うことで暗電流を十分に低く抑えることのできる高い抵抗値を実現している^[7]。

単体の半導体は選択の余地が少ないため、近年では化合物半導体検出器が注目を集めている。特に γ 線測定においては原子番号が大きく、効率が高い利点と常温あるいはペルチェ冷却程度で動作する簡便性を追求して開発が進められている。現在普及または開発の進んでいる化合物半導体検出器としては、CdTe、CdZnTe、HgI₂、TlBrなどが知られている。CdTeは原子番号が大きく、バンドギャップエネルギーも1.52eVと大きく、室温動作が可能である。移動加熱法（THM）により生成される結晶は均質で性能がよく、Clをドーピングした高抵抗の材料として供給されているが、常温ではややリーク電流が大きいいため、エネルギー分解能に制約を受ける。より高いエネルギー分解能を得るには、ショットキー接合が用いられるが、その場合、長時間動作により顕著な偏極が生じ、これを抑えるために高いバイアス電圧と冷却が必要となるが、宇宙研では、これとシリコン検出器を組み合わせることで高性能

コンプトンカメラの開発を行っている。CdTe検出器はこれまで日本のAcroRad社が良質の結晶を供給してきたが、最近ドイツのSiemens傘下に移った。CdZnTe検出器はCdTeよりバンドギャップが大きく、抵抗値も高いため、ショットキー接合を必要とせず高いエネルギー分解能が得られる。本検出器は高圧ブリッジマン法で製造されてきたが、結晶の品質がインゴット中で一様でなく、大きなばらつきがあることが問題となっていた。しかし、最近、カナダのRedlen Technologies社などでTHM法によりCdZnTe結晶を生成することが行われはじめ、結晶の品質が大幅に向上している。一方、これらの化合物半導体検出器全般に言えるのは、電子の移動度にくらべて正孔の移動度が非常に小さく、その結果として電荷収集量も正孔の方が小さくなるという点である。このため、単純なプレーナー型の検出器構造では、放射線が検出器内部のどの位置で電荷を生成したかに応じて、信号の大きさが異なって計測されてしまうという問題が生じる。この問題に対処するためには、検出器内部にグリッドを配置し、電子の成分のみを選択的に計測してやればよい。ただ、真空や気体中であればグリッドを配置するのは容易であるが、固体内部に生成するのは難しいため、電位をわずかに変えたストリップ電極を検出器表面に交互に配置し、一方のストリップ電極に電子を誘導することで、実質的にグリッドの役割を果たすコプレーナーグリッド方式が用いられ^[8]、1-2%程度のエネルギー分解能が得られている。

TlBr検出器は、密度が7.56 g/cm³と高く、原子番号も大きいいため、CdTe検出器よりもガンマ線の検出効率が高い。また、バンドギャップが2.68eVと高く、高い抵抗値を示すため、室温動作の可能な半導体である。本検出器に関しては、移動度はそれほど高くないものの、東北工大で開発されてきた帯域精製法により、良質の結晶が育成されたことから実用化に向

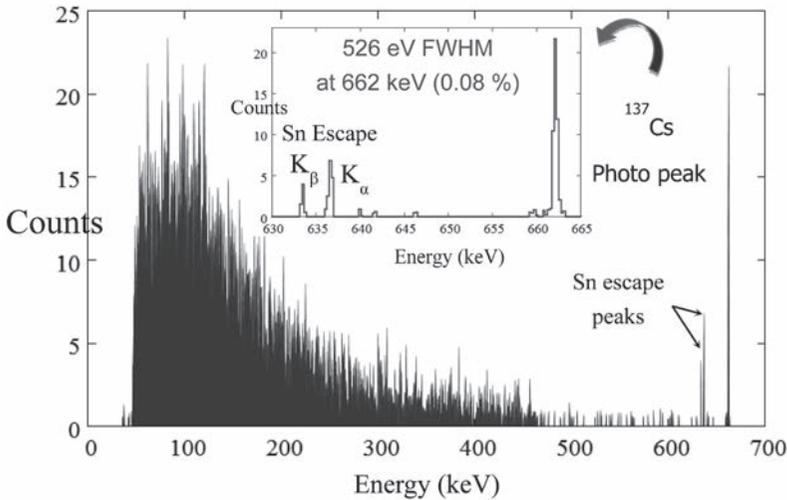


図3 超伝導転移端センサ (TES) ガンマ線検出器で計測した ¹³⁷Cs線源のガンマ線スペクトル

けて弾みがついた。TlBrではイオンの蓄積による偏極の問題が知られているが、電極材料をTIとして、バイアス電圧を反転させて可逆動作を可能とすることや、ペルチェ冷却などを用いて低温で動作させることによりイオンの動きを止めることなどが試みられ、実用化に向けた研究が進められている。

2.4 極低温検出器

電荷を読み出す方式としては、さらに、超伝導状態におけるクーパ対を放射線のエネルギーで準粒子に変換する原理を用いた超伝導トンネル接合素子 (STJ)、放射線入射による温度変化を計測原理とするマイクロカロリメータとしては、超伝導状態と常伝導状態の中間に素子をバイアスして用いる超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor: TES)^[9] などが、100keVに対して100eV、662keVに対して500eV程度のエネルギー分解能を実現する高分解能計測を可能とする技術として成熟しつつある (図3)。

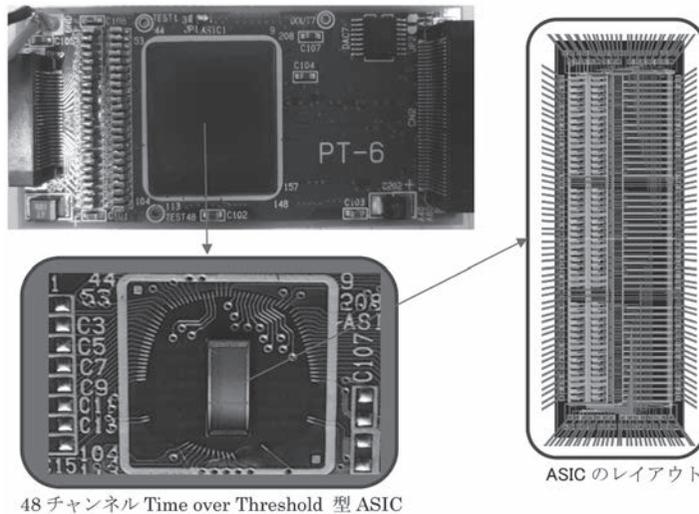
3. 信号読出しエレクトロニクス

放射線計測においては、多種多様の計測器

を用いることができるが、放出される放射線の種類とエネルギー、放射能の強さ、試料の形状などに応じて適切な信号読出し技術を用い、計測を行うことが必要である。

特に放射線により生じる個々のパルスの分析までを行おうとする場合には、微小な信号を扱うために、低雑音のエレクトロニクスが必要となる。検出器の静電容量に比例して、読出し回路の雑音は大きくなるために、高

感度計測を行うためには複数のチャンネルに分割することが望ましいが、コンパクトに、実装することや、コストの面から、これまでは制約があった。最近、特定用途向けの集積回路 (Application Specific Integrated Circuit: ASIC) を用いることで、これに対するブレークスルーが達成されつつある。ASICを用いることにより多素子化とイメージングも可能になるので、今後、新たな観点から、放射線モニタリング、放射線防護用の計測器も見直していく必要があるものと考えられる。ASICの利用においては、アナログデジタル (A/D) 変換器が回路規模が大きいため、ボトルネックとなっているが、最近では、A/D変換器を必要としない時間幅信号を用いた信号処理技術^[10-11]が発展してきており、放射線検出器にASICを直結させて、波高値情報をパルス幅にエンコードしたデジタルパルス信号を得ることができるようになってきた。これを用いることで大幅にコンパクト化したイメージングスペクトロスコープシステムを実現することができる。図4はこのようなASICを用いた多チャンネル信号読出しモジュールの例である。



48チャンネルTime over Threshold 型ASIC

図4 48チャンネルTime over Threshold 型ASICとその実装例

4. まとめ

現代の放射線計測においては、多彩な応用分野に応じて多様な技術が発展してきている。本稿では、最近の放射線計測技術を概観し、進展のめざましい領域を中心に紹介した。これらを本格的に応用した放射線モニタリング、線量計測の出現が期待されるところである。

参考文献

[1] A. Oed, Nucl. Instr. and Meth. A263 (1988) 351-359.

[2] F. Sauli, et al., Nucl. Instr. and Meth. A386 (1997) 531-534.

[3] H. Takahashi, Y. Mitsuya, T. Fujiwara, T. Fushie, Nucl. Instr. and Meth. A724, (2013) 1-4.

[4] K. Kamada, K. Tsutsumi, Y. Usuki, H. Ogino, T. Yanagida, and A. Yoshikawa, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, no. 3, (2008) 1488-1491.

[5] T. Yanagida, K. Kamada, Y. Fujimoto, H. Yagi, T. Yanagitani, Optical Materials, Volume 35, Issue 12, (2013) 2480-2485.

[6] A. N. Otte, J. Barral, B. Dolgoshein, et al., Nucl. Instr. and Meth. A545, No.3, (2005) 705-715.

[7] M. Amman, P.N. Luke, S.E. Boggs, Amorphous-semiconductor-contact germanium-based detectors for gamma-ray imaging and spectroscopy, Nucl. Instr. and Meth. A579 (2007) 886-890.

[8] P. N. Luke, E.E. Eissler, IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-43 (1996) 1481-1486.

[9] S. Hatakeyama, M. Ohno, R. M. T. Damayanthi, H. Takahashi, Y. Kuno, K. Maehata, C. Otani, and K. Takasaki, Development of Hard X-Ray and Gamma-Ray Spectrometer Using Superconducting Transition Edge Sensor, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, vol. 23, No. 3 (2013).

[10] K. Shimazoe, H. Takahashi, B. Shi, Dynamic Time Over Threshold Method, IEEE Trans. On Nucl. Sci. vol. 59 No. 6 (2012) pp. 3213-3217.

[11] K. Shimazoe, T. Orita, Y. Nakamura, H. Takahashi, Time over threshold based multi-channel LuAG-APD PET detector, Nucl. Instr. and Meth. A731 pp. 109-113 (2013).

著者プロフィール

1987年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了
 1989年 東京大学工学部助手
 1993年 東京大学工学系研究科講師
 1996年 東京大学工学系研究科助教授
 2000年 東京大学人工物工学研究センター助教授
 2005年 東京大学工学系研究科教授、現在に至る
 2012年よりNPO放射線安全フォーラム理事

▶▶▶ D-シャトル モニタリングサービスのご紹介◀◀◀

以前、FBNewsNo.445（2014年1月号）で住民用モニタリングサービス「D-シャトル」についてご紹介をさせていただきました。D-シャトルは、電池駆動式の半導体積算線量計で1年間の連続稼働が可能です。お客様にD-シャトルを1年間ご使用いただき、弊社にて測定結果報告書を作成いたします。

今回は、ご使用後のD-シャトルを回収し、再びお客様へ送付するまでの弊社工程についてご紹介させていただきます。



D-シャトル本体

【D-シャトル受入後の工程】

1. ご返却いただいたD-シャトルを管理機（専用のパソコン）にセットし、記録された線量データの抽出を行います。
2. 抽出したデータを基に「D-シャトル報告書」を作成いたします。（図1）



D-シャトル管理機（専用パソコン）

報告書では、ご使用いただいた期間の積算線量や月別の積算線量等をご確認いただくことができます。

（報告書については、改良のため軽微な変更がある場合がございますのでご了承ください）

3. 報告書の作成後、D-シャトルの電池交換および外観に破損等が無いか確認を行います。
4. D-シャトルの計量確認を行います。
5. 管理機にD-シャトルを接続し、パソコン画面上に正常表示されることを確認します。

以上の工程を行い、検査に合格したD-シャトルと測定結果報告書をお客様にお届けいたします。

今後もお客さまに安心をお届けできるよう更なる品質向上に努めて参ります。弊社モニタリングサービスをご愛顧くださいます様よろしくお願ひ申し上げます。

（線量計測技術課）

〒111-1111
〇〇〇〇〇〇〇〇T1-1

千代田 太郎 様

積算計ID番号：3802686

D-シャトル報告書

千代田 太郎 様 株式会社千代田テクノ
東京都文京区湯島1-7-12

積算期間：2013/03/19 ~ 2014/05/22
 積算線量：0.965 ミシーベルト(mSv)

○ 年間の月別積算線量を表示しております。

※積算線量の値には、自然放射線の値が含まれております。

月別積算線量一覧		ミシーベルト (mSv)	
2013年3月	0.030	2013年11月	0.071
2013年4月	0.070	2013年12月	0.073
2013年5月	0.078	2014年1月	0.073
2013年6月	0.071	2014年2月	0.060
2013年7月	0.073	2014年3月	0.073
2013年8月	0.073	2014年4月	0.060
2013年9月	0.060	2014年5月	0.042
2013年10月	0.058		

積算番号：131201-AAAAA-00001
AAAAA-1000000000001 1/2

図1：D-シャトル報告書サンプル

ACE GEAR Q&A

放射線業務従事者個人管理システム

モニタリングサービスと併せてご利用いただいております「放射線業務従事者個人管理システム (ACE GEAR)」の操作につきまして、お客様より、多くお問い合わせをいただく内容とその対応方法についてご紹介いたします。

【お問い合わせの内容】

ACE GEARにガラスバッジ測定結果データを取り込む時や、情報の参照を行った時「現在他の端末で更新処理中です。」のメッセージが表示され処理ができなくなりました。

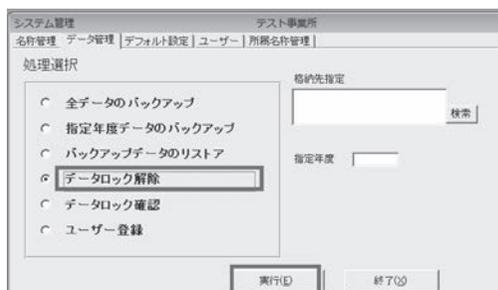


【不具合の原因】

ACE GAERの画面右上にあります「×」ボタンでシステムを強制終了してしまった場合、発生します。

【対応方法】

メインメニュー「システムの管理」－「データ管理」タブ－「データロック解除」を選択後「実行」ボタンを押下してください。処理後は不具合から復旧いたします。



公益財団法人原子力安全技術センターからのお知らせ

★講習会について★ ※○印は日付未定（平成26年 5月30日現在）

講習名／月	8月	9月	10月	11月	12月
登録定期講習	25：東京	5：京都 27：大阪(医)	17：東京 31：大阪	10：東京 14：名古屋 17：仙台 20：札幌 27：広島 28：福岡	8：東京
放射線取扱実務者研修会			8：東京		
医療放射線従事者のための放射線障害防止法講習会	30：大阪	○：東京			○：東京
放射線安全管理講習会				25：東京 I 28：仙台	9：名古屋 10：大阪 15：福岡 18：東京 II
医療機関のための放射線安全管理講習会				17：岡山 22：東京	

★出版物について★

最新放射線障害防止法令集（平成25年版）、記帳・記録のガイド（2012）、放射線施設のしゃへい計算実務（放射線）データ集等、発売しております。（放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルは、現在改訂作業中です。）

★講習・出版物の詳細、お申込みについては、公益財団法人原子力安全技術センターのHPをご参照ください。

URL：http://www.nustec.or.jp/ メールアドレス：kosyu@nustec.or.jp 電話：03-3814-5746

サービス部門からのお知らせ

ガラスバッジのラベルを変更しました

平素より弊社のモニタリングサービスをご利用くださいまして、誠にありがとうございます。

このたび、ガラスバッジのラベルの材質を従来の光沢紙ラベルからPETラベルに変更いたしました。

一部のお客様よりいただいておりますガラスバッジの擦れによるラベル印字の消えやラベルの剥がれなど不具合のお声を受けまして、ラベルの改良をいたしました。PETラベルは従来のラベルより水濡れや擦れなどについて耐性が向上しております。

これからもお客様からのお声を聴きながら、より良いモニタリングサービスをご提供できるよう努めて参りますので、ご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。



編集後記

●今月号の巻頭写真は尾瀬のニッコウキスゲが掲載されております。本号をお届けの時期には今年もこのユリに似た黄色い花が一面に咲き、見頃になっておりますでしょうか？子供たちも夏休みに入ったころですね。私もかつてこの時期をワクワク楽しみにしていたころを思い出しております。

●さてこの子供たち次世代を担う若い人たちの教育に関連して東京大学、NPO法人REHSE、富山高等専門学校先生方に「産学連携で次世代層リスク教育に関する新たな活動と挑戦」と題して寄稿いただきました。その中で、熱中することは楽しい。熱中して取り組むと、特に若者はぐいぐいと伸びる。側面から支援していて、彼らの熱心さと成長は感動するほどであった、と述べられております。この事業に非常に手ごたえを感じられていることが伝わるとともに、これからもどんどん若い世代へ、新たな学びの場を提供していくことが重要であることもわかりました。

●つぎにRIシリーズの第4弾として「世界のMo-99供給の現状と問題点」を日本原子力開発機構の源河次雄様に寄稿いただきました。核医学診断で重要な^{99m}Tcの先駆体である

⁹⁹Moについて2009年から2010年にかけて供給危機があったことや米国に次いで世界第2位の消費国である我が国が全量を輸入に頼っており安定供給のため種々の検討や情報交換がなされていることがわかります。医療用RIの製造も社会的状況により発電炉の利用が厳しい状況ですが、早期に安定供給の確立が望まれます。

●NPO法人放射線安全フォーラム/東京大学の高橋浩之先生に「最近の放射線計測技術」を寄稿いただきました。新たな放射線計測技術に焦点をあてて、種々の計測原理や検出器の進展などを記載いただいております。環境、材料、食品、個人線量など様々な場で放射線計測が重要になってきている現在、計測技術分野のさらなる発展を期待し、弊社でのモニタリングサービスなどへの実用化が進んでいければと思います。

●今年の夏は、北日本では冷夏となる一方、西日本では猛暑になるとの予想です。読者の皆様くれぐれもお体ご自愛ください。

(Y. Y)

FBNews No.452

発行日/平成26年8月1日

発行人/山口和彦

編集委員/佐藤典仁 安田豊 中村尚司 金子正人 加藤和明 大登邦充 加藤毅彦

本名瀬一美 篠崎和佳子 土屋敦史 林直樹 福田光道 藤崎三郎 丸山百合子

発行所/株式会社千代田テクノル 線量計測事業本部

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4階

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)