

ISSN 0367-6110

Vol. 58

No.3 2023/9

HOKBAQ 58 (3) 115 - 195 (2023)

保

健

物

理



JAPANESE JOURNAL OF HEALTH PHYSICS

日本保健物理学会

JAPAN HEALTH PHYSICS SOCIETY

<http://www.jhps.or.jp/>

# 保健物理

第 58 卷 3 号 (2023 年 9 月)

## 目 次

### 巻 頭 言

原子力災害医療と 6E-based Medicine ..... 山下俊一 (117)

### ●第 1 部：和文●

#### 解 説

ウラン含有廃棄物の取扱いに関する人文・社会科学的視点からの考察  
..... 保田浩志, 齋藤龍郎, 麓 弘道, 菅原慎悦, 土田昭司, 笠井 篤, 古田定昭 (120)

#### レポ ー ト

高濃度空气中放射性物質のモニタリングのための可搬形β線ダストモニタの開発  
..... 佐川直貴, 藤澤 真, 細見健二, 森下祐樹, 高田千恵 (135)

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討 WG」活動報告  
—第 1 分科会 エックス線利用上の安全規制と現場管理—  
..... 五十嵐悠, 榎本 敦, 小嶋光明, 小田啓二, 高橋賢臣, 飯本武志 (141)

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討 WG」活動報告  
—第 2 分科会 エックス線被ばく事故における線量評価の課題—  
..... 秋吉優史, 小田啓二, 笠井 篤, 古渡意彦, 阪間 稔, 浜田信行, 福士政広 (151)

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討 WG」活動報告  
—第 3 分科会 情報の発信と水平展開の観点から—  
..... 笠井 篤, 川島恒憲, 辻本 忠, 中村美和, 橋本 周, 山口一郎 (163)

### ●第 2 部：和文情報●

#### 報 告

第 1 回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同シンポジウム印象記  
..... 山田椋平, 玉熊佑紀, 桑田 遥, 三枝裕美, 渡邊裕貴, 廣田誠子, 金 千皓, 蔡 宇 (169)

#### 話 題

ICRU 国際シンポジウム「福島復興と放射線計測」印象記 ..... 加藤昌弘 (178)

MELODI ワークショップ 2023 「放射線によって誘発される循環器疾患に関する動向」 ..... 浜田信行 (182)

#### 情報のページ

編集委員会議事録 ..... (194)

編集後記 ..... (195)

日本保健物理学会編集委員会 E-mail: hobutsu@capj.or.jp

委員長 細田正洋

副委員長 鈴木 晃 島田洋子

委員	玉熊佑紀 (幹事)	五十嵐隆元	岩岡和輝	加藤昌弘	川端方子	真田哲也
	高原省五	平尾茂一	前田 剛	吉田 晃	Sergei TOLMACHEV	

# Japanese Journal of Health Physics

Vol. 58, No. 3 (September 2023)

## CONTENTS

### Foreword

Nuclear Disaster Medicine and 6E-based Medicine ..... Shunichi YAMASHITA (117)

### ● Part 1: Japanese Articles ●

#### Review

Investigation on the Management of Uranium-Containing Wastes in View of Humanities and Social Sciences  
..... Hiroshi YASUDA, Tatsuo SAITO, Hiromichi FUMOTO, Shin-etsu SUGAWARA,  
Shoji TSUCHIDA, Atsushi KASAI and Sadaaki FURUTA (120)

#### Reports

Development of a Portable  $\beta$ -ray Dust Monitor for Highly-concentrated Airborne Contaminants  
..... Naoki SAGAWA, Makoto FUJISAWA, Kenji HOSOMI, Yuki MORISHITA and Chie TAKADA (135)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures

—Subcommittee 1: Regulations and Management for Safety Use of X-rays—

..... Yu IGARASHI, Atsushi ENOMOTO, Mitsuaki OJIMA, Keiji ODA, Masaomi TAKAHASHI and Takeshi IIMOTO (141)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures

—Subcommittee 2: Dosimetric Issues on X-ray Exposure Accidents—

..... Masafumi AKIYOSHI, Keiji ODA, Atsushi KASAI, Munehiko KOWATARI, Minoru SAKAMA,  
Nobuyuki HAMADA and Masahiro FUKUSHI (151)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures

—Subcommittee 3: How to Roll Out Accident Prevention Initiatives to Stakeholders?—

..... Atsushi KASAI, Tsunenori KAWASHIMA, Tadashi TSUJIMOTO, Miwa NAKAMURA,  
Makoto HASHIMOTO and Ichiro YAMAGUCHI (163)

### ● Part 2: Japanese Information ●

#### Topics

Impressions of the 1st Joint Symposium of Japan Health Physics Society and Japanese Society of Radiation Safety  
..... Ryohei YAMADA, Yuki TAMAKUMA, Haruka KUWATA, Yumi SAIGUSA, Yuki WATANABE,  
Seiko HIROTA, Qianhao JIN and Yu CAI (169)

Impression on ICRU Symposium Revitalization of Fukushima and Radiation Measurement ..... Masahiro KATO (178)

MELODI Workshop 2023 “Updates on Radiation-Induced Circulatory Diseases” ..... Nobuyuki HAMADA (182)

**Information** ..... (194)

#### Editorial Board E-mail: hobutsu@capj.or.jp

Editor-in-Chief Masahiro HOSODA

Deputy Editor-in-Chief Akira SUZUKI Yoko SHIMADA

Yuki TAMAKUMA (Scientific Secretary)	Takayuki IGARASHI	Kazuki IWAOKA	Masahiro KATO
Masako KAWABATA	Tetsuya SANADA	Shogo TAKAHARA	Shigekazu HIRAO
Tsuyoshi MAEDA	Akira YOSHIDA	Sergei TOLMACHEV	

**Journal Title History** Japanese Journal of Health Physics, from 2002  
Journal of Health Physics, from 1995 to 2001  
HOKEN BUTSURI, from 1966 to 1994

## 巻頭言



# 原子力災害医療と 6E-based Medicine

山下 俊一\*<sup>1</sup>

東日本大震災に引き続き発災した東京電力（株）福島第一原子力発電所事故（福島原発事故）対応では、本学会会員各位のご尽力に心から感謝とお礼を申し上げます。特に、事故後の「暮らしの放射線 Q&A」では、混乱の中で責任あるご対応を頂き誠に有難うございました。この度、編集委員会委員長横山須美先生からのご依頼で、防災月間のタイミングで本誌へ寄稿する貴重な機会を頂き重ねて感謝申し上げます。

はじめに、人生の転換点は幾度となく訪れ、常に剣ヶ峰を歩んでいることを普段意識することは少ないようですが、日常生活はありとあらゆるリスクに囲まれています。私自身は、長崎市で生まれ、幼少時は付近の防空壕を遊び場として育ち、教会のアンジェラスの鐘の響きの下で、永井隆博士の如己堂を中心に原爆遺構と潜伏キリシタンの痕跡が残る環境の中で学生生活を送り、その後医師としての経歴を有しています。研究生活（内分泌学・甲状腺学）では、1980年から90年代はじめにかけて放射性同位元素をトレーサーとして利用する *in vitro* や *in vivo* の実験に勤しんできました<sup>1)</sup>。

私の人生が放射線と名のつく道に導かれたのは、母校の長崎大学で原爆後障害医療研究施設（現在は研究所）の教授に選任されたことによります。恩師の故長瀧重信第一内科教授のご指導により、チェルノブイリ原発事故後の海外医療協力から、カザフスタンのセミパラチンスク核実験場周辺での JICA 地域医療改善計画に参画し、その流れから原子力災害医療へも足を踏み入れることになりました。特に、JCO 事故後の原子力安全委員会での専門的助言などでは、国内の三次被ばく医療体制の整備にも携わり、2005年から2年間 WHO ジュネーブ本部で放射線科学官として、REMPAN という緊急被ばく医療の国際ネットワークや医療被ばくの課題に取り組むこととなりました<sup>2)</sup>。

その後、福島原発事故後の混乱と混迷に遭遇しましたが、多くの検証結果や今なお続く諸課題については周知のことだと言えます。経験と実験結果（検証）から客観的なエビデンスに基づく真理探究の道を歩む本学会の会員にとり、放射線防護の基盤となる LNT モデルの解釈と説明責任は極めて重要ですが、危機管理の原理原則も交えて、以下6つの E の視点から一般医療と原子力災害医療の相違について共考したいと思います。

第一に現代医療に求められるのは Evidence-based Medicine ですが、この客観的事実に基づく医療現場へのアプローチそのものが難しいのです。なぜならば、医学の進歩は元来 Experience-based Medicine と呼ばれるように経験と失敗の繰り返しに裏打ちされてきたからです。すなわち、医療提供者による試行錯誤の結果、後出しジャンケンではありませんが、患者さんへの反省や改善点が多く、日々の医療現場はリスクの塊そのものであり、これらの成功や失敗事例の経験が医学、そして医療の進歩を支えています。また喫緊の課題の新型コロナウイルス対応でのワクチン問題も、mRNA ワクチンの生体内人工抗原強制発現による免疫能獲得や増強という大規模な実験にも相当する

\*<sup>1</sup> 福島県立医科大学理事長特別補佐・副学長

Experiment-based Medicine そのものなのです。もちろんこれら医療には莫大な研究資金と開発人材が必要となりますし、何事も強固な財政基盤や企業としての成功などが求められることとなります。特に創薬事業や医療機器の開発では Economy-based Medicine が欠かせません。

さて、上記の医学や医療の考え方やアプローチは、科学技術の進歩に身を置く本学会会員には当然なものとして受け入れやすいのではないのでしょうか。しかし、福島原発事故に遭遇した現場では、その混乱と混迷、特に、指揮命令系統の不徹底や責任回避行動への不信感だけではなく、国際的なコンセンサスへの疑心暗鬼、さらに心理的ダメージに伴う恐怖や不安、不満と怒り、最悪の状況を危惧した絶望感、あるいはイデオロギーの対立から偏見や先入観なども加味され、様々な感情が交錯することも明らかになりました。実際には、無益無用な被ばくをさせられた上に、避難を余儀なくされたことで将来の放射線リスクを背負われたと思う被災者らにとり、「覆水盆に返らず」は許されざる状況であり、であればこそ原状回復を目指す活動も激化したのです。まさにリスク認知の多様性も含めて Emotion-based Medicine に変容した現場での住民対応は困難を極め、人の言動は常に論理的判断を基準とするものでは無いということも明白となりました。専門家さえもが自説に拘泥したり、逆に何がコンセンサスなのかに迷い、社会的見解とのギャップに悩んだりすることも多くあります。すなわち、不確定、不確実な将来のリスク予測に関して、専門知の社会貢献の意義やその価値が問われることになりました。

以上5つのEを頭文字とする医療現場での考え方やアプローチは、特殊災害の一つである原子力災害医療の分野でも同様だと考えられます。すでに、福島原発事故前とその後の国内体制も再整備され、また対応策の内容も変化しています。(独)放射線医学総合研究所が(国研)量子科学技術研究開発機構(量研)の一部門の下の放射線医学研究所と改組再編されていますが、原子力規制委員会の指名による基幹高度被ばく医療支援センターとして、他の5つの大学にある高度被ばく医療支援センター並びに4つの大学の原子力災害医療・総合支援センターの中心的、指導的な役割を担う位置づけとなっています<sup>3)</sup>。しかし、重要な点は原発事故対策そのものの諸課題と同様に、原子力災害医療も誰のための医療対策なのか、そして発災時の迅速かつ適切な公衆衛生的な対応がどうあるべきかが問われています。当然、高線量被ばく患者への診断治療では包括的かつ先進的な専門医療が求められますが、公衆被ばく対応では医療よりもそのリアルタイムでの線量推計の重要さと同時に、防護の考え方である LNT モデルに従った放射線健康リスクの適切な説明と一般公衆の理解に向けた努力が必要とされます。

今回の福島事故を経験した放射線防護に関わる会員の皆様方は、すでに LNT モデルの妥当性とその課題についても矛盾点を見出されておられるかと思えます<sup>4)</sup>。その上で防護量と実際の健康リスクを与える健康影響量との間にギャップが存在することも理解されるでしょう。ご存知のように、福島原発事故後は、数字や単位の持つ意味を ICRP はじめ国際的なコンセンサスに従い、集団リスクの観点から被災者へ説明し理解を得ることは至難の業でもありました。これらの経験から得た一つの教訓が、個々人の異なる認知下にある放射線リスクにどう立ち向かうかということです。特に、「覆水盆に返らず」をありのままに受入れる心境にはなれない中で、それでも放射線リスクコミュニケーションを続けなければならない事故後の状況では、Ethics-based Medicine という倫理的、そして人間の尊厳を中心に考える医療アプローチが必要となります。すなわち、医療倫理での単に患者さんに害を成さないというだけではなく、恐怖や不安が渦巻く原子力災害医療の場面では、弱者の立場での寄り添い医療の実践となり、看護師や保健師、臨床心理士、放射線技師、薬剤師など多くの臨床現場の力が必要となります。しかし、そのリソースの活用は限られていることは、福島原発事故や今回の新型コロナウイルスでの医療現場の崩壊の危機からも自明です。限界や制約がある中で、多様性を尊重しながら弱者の視点から宗教や哲学、そして自然科学や人文社会科学などを包含した中で、一人ひとりに寄り添いながら放射線リスクとの共存に向けた努力が求められます。これはある意味、線量に束縛されないという「Beyond millisievert」という考え方にも共通しますが、救済医療の精神に通じるとも言えます。

以上、福島原発事故直後から 6E-based Medicine を実践してきた原子力災害医療の専門家や関係者は福島のもので、そして日本の至宝とも言えます<sup>5,6)</sup>。事故から 12 年半が経過し、浜通りの浪江町には新たな福島国際研究教育機構 F-REI

が発足し、将来にわたる復興の中核拠点になることが期待されていますが、科学技術力・産業競争力の強化に力点が置かれており、6E-based Medicine の継承・発展への貢献は未知数です<sup>7)</sup>。であればこそ、「福島を悲劇を奇跡に」という現場視点での原子力災害医療の展開を図ることこそが、弱者視点での防災につながる生きた教訓ではないかと確信されます。原子力防災の正しい情報を世界に発信し、そして人材育成の研修教育の原点が事故現場である福島の被災地にあります。翻って、原子力防災と原子力災害医療の最前線を経験した知恵と技術を継承し、日本こそが世界の放射線防護文化の醸成に向けての先導的な役割とその使命を果たすことが期待されます。

福島原発事故を体現した本学会の今後の発展を祈念すると同時に、原子力災害医療におきましても引き続きのご指導とご協力をどうぞ宜しくお願い申し上げます。

山下 俊一（やました しゅんいち）

1978年長崎大学医学部卒業，1990年長崎大学医学部教授，2005年WHOジュネーブ本部放射線科学官，2009年長崎大学大学院医歯薬学総合研究科長，2011年福島県放射線健康リスク管理アドバイザー，内閣官房原子力災害専門家チーム，福島県立医科大学副学長，2013年長崎大学理事・副学長，2018年長崎大学名誉教授，福島県立医科大学副学長，2019年量研高度被ばく医療センター長，2021年量研放射線医学研究所所長，2023年福島県立医科大学理事長特別補佐・副学長。

#### 参 考 文 献

- 1) S. YAMASHITA; Always embracing new challenges in my life from Nagasaki onward, *Endocr J.*, **70** (2), 129–134 (2023).
- 2) <https://www.who.int/groups/rempan>
- 3) <https://www.qst.go.jp/site/qms/20523.html>
- 4) E. J. CALABRESE; The linear No-Threshold (LNT) dose response model: A comprehensive assessment of its historical and scientific foundations. *Chem. Biol. Interact.*, **301**, 6–25 (2019).
- 5) A. HASEGAWA, K. TANIGAWA, A. OHTSURU, H. YABE, M. MAEDA, et al.; Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima, *Lancet*, **386** (9992), 479–488 (2015).
- 6) A. OHTSURU, K. TANIGAWA, A. KUMAGAI, O. NIWA, N. TAKAMURA, et al.; Nuclear disasters and health: lessons learned, challenges, and proposals, *Lancet*, **386** (9992), 489–497 (2015).
- 7) <https://www.f-rei.go.jp>

## 解説

ウラン含有廃棄物の取扱いに関する  
人文・社会科学的視点からの考察保田 浩志<sup>\*1, #</sup>, 齋藤 龍郎<sup>\*2</sup>, 麓 弘道<sup>\*3</sup>, 菅原 慎悦<sup>\*4</sup>,  
土田 昭司<sup>\*4</sup>, 笠井 篤<sup>\*5</sup>, 古田 定昭<sup>\*6</sup>

(2023年4月18日受付)

(2023年8月7日採択)

## Investigation on the Management of Uranium-Containing Wastes in View of Humanities and Social Sciences

Hiroshi YASUDA,<sup>\*1, #</sup> Tatsuo SAITO,<sup>\*2</sup> Hiromichi FUMOTO,<sup>\*3</sup> Shin-etsu SUGAWARA,<sup>\*4</sup>  
Shoji TSUCHIDA,<sup>\*4</sup> Atsushi KASAI<sup>\*5</sup> and Sadaaki FURUTA<sup>\*6</sup>

Uranium waste, which is one of the wastes containing radioactive substances of natural origin, is generated in association with the use of nuclear power generation. While there have been long discussions about handling and disposal of the uranium wastes for last 50 years in Japan, its clear vision including a specific disposal site has not yet been received. For improving this situation, the authors perceived that it is necessary to refocus this issue from the view of humanities and social sciences, rather than that of natural science and engineering and have had in-depth discussions in a specialized study group established in the Japan Health Physics Society. This commentary provides an overview of the two-year discussions in that group.

**KEY WORDS:** uranium waste, NORM, radioactive, humanity, social science.

## I はじめに

ウランは、地球の地殻やマントルに広く存在する自然起源の放射性核種で、その半減期は、<sup>238</sup>Uで約45億年、<sup>235</sup>Uで約7億年と長く、壊変によってさまざまな子孫核種 (Ra, Rn, Bi, Po 等) を生み出しながら、安定元素の鉛 (Pb) になる。現在、わが国を含む多くの国で、自然界にあるウランを集めて、濃度を高めた<sup>235</sup>Uが起こす核分裂連鎖反応を用いたエネルギー生産、すなわち

原子力発電が行われている。その過程において、ウランの製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工等に伴い、ウラン及びその子孫核種によって汚染された「ウラン廃棄物」が発生する。ウラン廃棄物には、一般に、産業廃棄物または放射性廃棄物として処分されるものや、クリアランスされた後再利用される資材等も含まれる。

このウラン廃棄物をどのようなカテゴリーで取扱いどう処分するかについては、わが国のみならず欧米等でも長く議論が行われてきた<sup>1)</sup>。例えば、米国では、低レベ

\*1 広島大学原爆放射線医科学研究所；広島県広島市南区霞1-2-3 (〒734-8553)

Research Institute for Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University; 1 Kasumi 2-3, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 734-8553, Japan.

\*2 (国研) 日本原子力研究開発機構バックエンド統括埋設事業センター；茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49 (〒319-1112)

Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office, Japan Atomic Energy Agency; 4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1112, Japan.

\*3 日本検査(株)；東京都中央区八丁堀2-9-1 (〒104-0032)

Japan Inspection Co. Ltd.; 2-9-1 Hatchobori, Chuo-ku, Tokyo 104-0032, Japan.

\*4 関西大学社会安全学部；大阪府高槻市白梅町7-1 (〒569-1098) Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University; Hakubai-cho 7-1, Takatsuki-shi, Osaka 569-1098, Japan.

\*5 元日本原子力研究所  
Former official of Japan Atomic Energy Research Institute.

\*6 古田技術士事務所；岐阜県多治見市小田町 (〒507-0023) Furuta Consulting Engineer Office; Odamachi, Tajimi-shi, Gifu 507-0023, Japan.

# Corresponding author; E-mail: hyasuda@hiroshima-u.ac.jp

ル放射性廃棄物の中にウラン廃棄物という区分は存在せず、ウラン鉱さいは、放射性廃棄物として区分されているものの、副生成物（残渣）として通常の原子力産業の廃棄物とは区別して処分される一方、廃棄劣化ウランは独自の流れ（unique stream）として別に扱われる等、通例の低レベル放射性廃棄物に対する措置とは異なる対応がとられている。また、フランスでは、ウラン鉱さいの堆積場は、その総放射能インベントリを判断基準として原子力関連施設には分類されておらず、一般の有害廃棄物処分場の一形態として取り扱われている。

わが国においては、当初ウラン廃棄物は低レベル放射性廃棄物に分類されていたが、原子炉由来の低レベル廃棄物とも TRU 廃棄物（超ウラン元素を含む廃棄物）とも異なる区分で検討が進められ、その処分に係る方針は不明瞭なままであった（Fig. 1）。しかし、近年、原子力規制委員会において本件についての集中的な審議が行われ、2020年12月には原子力規制庁から「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」<sup>2)</sup>が提示された。そこでは、以下のような認識が記されている。

- ・ウラン廃棄物を人工起源核種として取り扱うことは妥当である一方、天然起源核種としての性格を併せ持つことを考慮することも可能。
- ・ウラン濃度を当初から十分低くする条件で、ウラン廃棄物を第二種廃棄物埋設の対象とする方向で検

討。

また、これらの認識に至るまでの考察の過程として、ウラン廃棄物埋設地の直上に居住する人が受ける線量を数十万年の時間スケールで評価した結果等が示されている（Table 1）。この試算結果によると、ウランを埋設してから数万年～20万年の時間が経過すると、子孫核種特にラドンの線量寄与が顕著に高まることが分かる。具体的には、流出を考慮した場合は約4万年後に年間の被ばく線量は1.3 mSv/y、保守的な流出を考慮しない場合（「ウラン流出なし」シナリオ）は約20万年後に5.9 mSv/yになると推定されている。ちなみに、米国では、軍事利用向け高レベル放射性廃棄物処分場の連邦規則制定において線量評価の期間を最大1万年としており、欧州等でも浅地中処分の評価ではこれに準じた対応が採られている<sup>1)</sup>。今般原子力規制委員会が埋設後数十万年にわたる線量の予測を行い、そのピークが1万年を超える時期に現れると明示したことは、現世代が行う放射性廃棄物の処分によって遠い未来に増加しうる将来世代の潜在被ばくの問題を明確化すると共に、この問題に対するわが国の慎重な姿勢を示したと言える<sup>3)</sup>。

一方、政府機関での検討と並行する形で、（一社）日本保健物理学会では、2017～2018年度に「自然放射性核種を含む廃棄物の放射線防護に関する専門研究会」を組織し、ウラン鉱さいを含む自然放射性物質の取扱いに

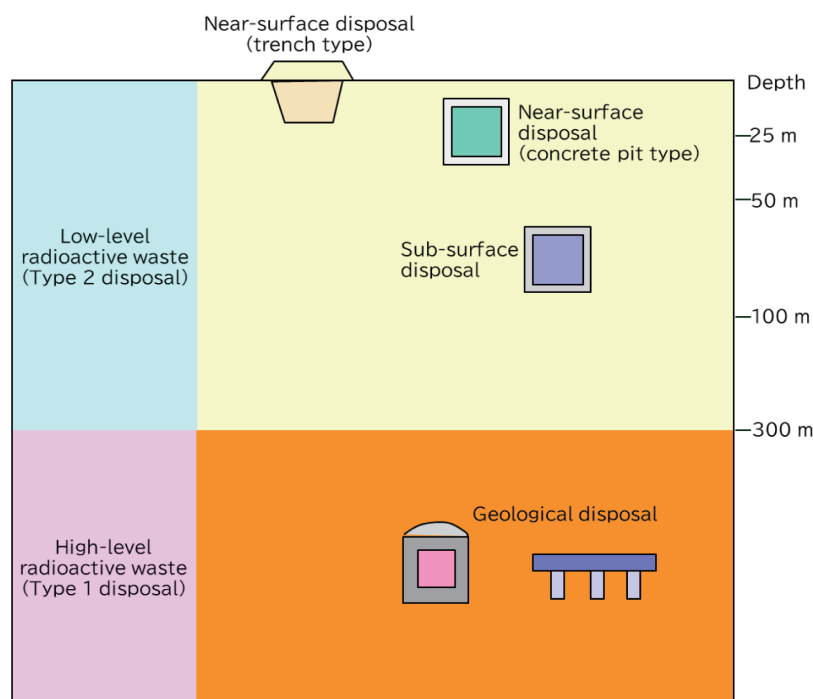


Fig. 1 Methods of radioactive waste disposal; how to manage the uranium waste has been unclear for long time in Japan.



**Table 1** Predicted peak annual doses and those timings of appearance from 5% enriched uranium when the total concentration of  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  &  $^{238}\text{U}$  was 1 Bq/g at the time of disposal.<sup>2)</sup>

	Predicted peak annual dose for different scenario		
	Exposure from uranium and its progenies in the instant radiative equilibrium	Exposure from progenies except radon	Exposure from radio-nuclides including radon
With conservative discharge	0.010 mSv/y (at <1000 years)	0.18 mSv/y (at about 40,000 y*)	1.3 mSv/y (at about 40,000 y*)
Without conservative discharge		0.82 mSv/y (at about 200,000 y*)	5.9 mSv/y (at about 200,000 y*)

\* The timing when the peak dose rate appears.

係る考え方や超長半減期の核種がもたらしうる被ばくのリスク等について議論を行い、社会に受容されるウラン廃棄物の処分方法等の提示を試みた<sup>4)</sup>。同専研では、取り上げた主な事項を以下に記す。

- ・ 計画被ばく状況と現存被ばく状況の考え方
- ・ 除外、規制免除及びクリアランスに関する線量基準
- ・ 超長期の時間スケールと不確実性の取扱い
- ・ 安全評価におけるリスク論的考え方
- ・ ラドンの取扱い
- ・ 化学的毒性の取扱い

これらの論点に関する議論を経て、同専研では、遠い将来増加するかもしれない潜在被ばくへの対応を将来世代に託すことについては、現世代が現時点で真摯な対応をすることが何より肝要との見解を示す一方、将来世代に受容される処分方法の確立には、理工学の視点に立った数値的予測に基づく考察だけでなく、人文・社会科学の視点を含めたより幅広い視野で深化した議論をすることが必要と結論付けた<sup>4)</sup>。

この結論を受ける形で、筆者らは、2020年度に（一社）日本保健物理学会に「人文・社会科学的視点から考察する自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会」（以下「本専研」という。）を新たに立ち上げ、2年近くにわたり人文・社会科学的な議論に重点をおいた活動に取り組んできた。ここで、「人文・社会科学」とは、人間の内面（感情や思考）や行動、それらが社会にもたらす影響の分析・解明を行う学問の総称であり、より具体的な分野としては、哲学、心理学、社会学、文化人類学、政治学、歴史学、経済学、法学、言語学、文学、経営学等が挙げられる。一方、「理工学」は、自然の原理を客観的に捉えたり、その原理を設計や製造に応用する分野で、物理学、化学、生物学、地球科学、数学、工学等がこれに含まれる。なお、古代ギリシャ文明を源流とするヨーロッパの学問体系（リベラル・アーツ）においては、人文・社会科学と理工学は一体を成すものとして、

長く相互依存的 / 補完的な関係にあった。両者の分離が進んだのは、産業革命を経て自然科学の諸分野において専門分化が顕著になった19世紀以降である。なかでも、工業製品を生産するための技術の開発に主眼をおく工学分野において乖離が大きくなった。

本専研では、上に述べたような認識をメンバーと共有したうえで、特に世代間倫理の問題について人文・社会科学的な視点から解決の道を探る必要があるという問題意識を持って、議論を深めてきた。本専研での審議で取り上げた主要なテーマを以下に記す。

1. ウラン廃棄物処分の現状と残る課題
2. ウラン廃棄物処分に関わる倫理的な問題
3. 超長期評価の信頼性をどう確保するか

本報では、これらのテーマに沿って議論した内容を概説し、その議論を経て導かれた見解について報告したいと思う。

## II 議論の概要

### 1. ウラン廃棄物処分の現状と残る課題

本専研では、まず、ウラン廃棄物の濃度に応じた処分方法に係るオプションについて、特に、十分に少ないウラン量（天然起源のウラン親核種である  $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{238}\text{U}$  の総計が平均 1 Bq/g）を超える濃度のウランについて、国内及び海外（米国、英国）で採用または検討されている方策についてレビューを行った。以下にその概要をまとめる。

国内においては、ウラン含有濃度が 1 Bq/g を下回る汚染物は、クリアランス制度による確認測定と評価により規制除外された場合、再利用もしくは、一般産業廃棄物処分場に受け入れられる可能性がある。国内の放射性廃棄物の処分オプションには、濃度及び核種に応じて、トレンチ処分、ピット処分、中深度処分もしくは地層処分がある。ウラン廃棄物をピットまたはトレンチ処分するためには、廃棄物中のウランの総放射線量 (Bq) を

放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設し、または設置する物の総重量 (t) で除して得た値が1を超えないこととされている<sup>5)</sup>。ウラン廃棄物は、この条件を満たす濃度までは、ピットまたはトレンチ処分が可能と想定される。

これを超える濃度のウラン廃棄物については、中深度処分もしくは地層処分のいずれかの方法で処分されることになる。ここで中深度処分とは、地上から深さ70m以上の地下深部に廃棄物を埋設処分する方法であり<sup>6)</sup>、低レベル放射性廃棄物のうち「放射能レベルの比較的高い廃棄物」に適用される。中深度処分では、以下に掲げる3つのシナリオに基づき、埋設廃棄物の公衆への影響評価の基準を満たすことが要求される<sup>7)</sup>。

- ・ 自然事象シナリオ
- ・ ボーリングシナリオ
- ・ 廃棄物埋設地と公衆の接近を仮定したシナリオ

自然事象シナリオでは「最も厳しいシナリオ」と呼ばれる科学的に合理的な範囲で想定される最も線量評価上保守的な経路の組み合わせでの被ばく影響評価が要求される。一方、様式的な短絡経路を設けるボーリングシナリオでは、地表からボーリング孔が貫通した区画に含まれる放射エネルギーが最も多くなる場合の当該損傷区画を選定する。当該シナリオでは、掘削によって地表と廃棄物を短絡する経路が形成されたとしても、その影響が及ぶ廃棄物に含まれる放射性核種の量が限定され、埋設した廃棄物全体に及ぶことなく生活圏への放射性核種の移行量が抑えられるよう、廃棄物埋設地の内部を人工バリアで区画することが要求され、廃棄物埋設地内の区画の生活圏への放射性核種の移行量が抑えられる。また、廃棄物埋設地と公衆の接近を仮定したシナリオでは、廃止措置の開始後から数十万年を経過するまでの間において、海水準変動に伴う侵食の影響を受けるおそれがある場所に廃棄物埋設地を設置する場合には、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、または設置された物が混合したもの（混合土壌）と公衆との接近を仮定した設定に基づき、処分場に受け入れ可能な放射性核種の濃度を規制している。この予測においては、中深度処分の廃棄物埋設地においては70メートル以上の深度が確保されるため、仮に10万年以降に侵食の速度や著しい侵食を生じる位置が変化したとしても、ただちに急激な深度の減少が生じることは想定されず、10万年を超えても地表と廃棄物層との隔離が確保されると考えられる。しかし、10万年以降における海水準変動に伴う侵食の影響を受ける可能性がある場合には、隔離

の見直しには不確実性があるため、長半減期核種の放射能濃度が制限されていることを確認する必要がある。

海外では、多くの国が、劣化ウラン等、高濃度のウランについては資源として保管している<sup>8)</sup>。米国では、WCS社アンドリュートキサス処分場への受入れを開始し、浅地中処分のための安全規制方針を策定中である<sup>9)</sup>。また、英国放射性廃棄物管理委員会 (CoRWM) は、分離ウランが廃棄物と宣言された場合の地層処分に関する勧告に劣化・天然・低濃縮ウラン (DNLEU) を含めた<sup>10)</sup>。その一方で、委員会はこの物質の危険性が比較的低いことを認識しており、英国原子力廃止措置機関 (NDA) は、DNLEUの浅地中処分オプションとして、3つの概念を検討し、浅地中処分を地層処分の代替手法となりうるかについて評価した<sup>11)</sup>。このNDAによる安全評価報告では、氷期の反復とその後の大規模な人間侵入に対して脆弱であるとし、浅地中処分は可能だが実行可能性はサイトに依存し、地層処分の評価も必要としている。

ここで注目すべき点は、これらの概念が「アクセスのしやすさ」、すなわち、人間による処分場への接触・侵入のしやすさを評価軸としたことである。これにより、意図的であるか否かにかかわらず、人間侵入に起因する放射線防護機能や移行抑制機能の低下が評価結果に影響することが明示された。こうしたことから、英国は、処分方針に関して米国より慎重であるとみなせるだろう。

日本国内の規制の考え方は、英国NDAの結論に整合するものであり、将来の超長期にわたる時間経過による中深度処分場の覆土や処分深度を確保することによる被ばく防護性能が喪失したと仮定した潜在被ばく評価を行う方針が示されている<sup>6)</sup>。国内のトレンチ・ピット処分において処分場平均ウラン濃度を1 Bq/g未満に抑えることは、潜在被ばく評価を利用した濃度規制の導入と見ることができ、時間経過による不確実性を低減するための考え方と言えるだろう。一方で、想定すべき時間幅が非常に長く予測の不確かさが極めて大きいことから、混合土壌の考え方が十分に保守的であるか、ラドン対策やインベントリを含めた計算条件や仮定の妥当性（さまざまな観点から見て納得が得られるようなものであるか）、放射線防護における知識継承の位置づけ、また、知識継承をより持続的にするための方法についての考え方の整理などが、超長期評価の不確かさを低減するために必要と考えられる。

さらに、将来世代の人々を潜在的なラドン被ばくから

防護するには、管理期間（トレンチ処分で50年、コンクリートピットで300年）を過ぎた後においてもウラン埋設量等の情報を後世に伝えることのできる、長期にわたって効果が期待される情報伝達の方策についても検討・具体化されることが望まれる。こうした方策は、ウラン平均濃度が地殻存在度平均に近い1 Bq/g程度となる処分場では念のための措置と考えられるものの、放射能濃度がより高い廃棄物の処分においては、一層重要さが高まるだろう。

## 2. ウラン廃棄物処分に関わる倫理的な問題

### 2.1 放射線防護の原則とウラン廃棄物処分の考え方

現在、日本における放射線防護に係る考え方は、国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告<sup>12,13)</sup>を基盤としている。ICRPは、現在の倫理価値に至るまで、以下のような変遷を辿ってきたとみなすことができる。

- ・ 初期：徳の倫理 (virtue ethics), 放射線の健康影響がX線やラジウム利用医療従事者やダイアルペインターに限定されていた時代
- ・ 中期：功利主義の倫理 (utilitarian ethics), 放射線影響をリスク/ベネフィットで議論していた時代
- ・ 現在(チヨルノーベリ事故以降): 義務論 (deontology) を基盤として議論している時代

ここで「功利主義」は、行為の正しさをその行為の帰結(のみ)から判断する立場を意味し、帰結主義や結果主義とも呼ばれる。この考え方を分かりやすく表現するのに、「最大多数の最大幸福」というフレーズがよく用いられている。これに対し、「義務論」では、ドイツの哲学者イマヌエル・カント(1724-1804)やスコットランドの哲学者W. D. ロス(1877-1971)の考え方に代表されるように、行為の帰結よりも、理性から導かれる道徳的義務に合致しているかどうかによって行為の善悪を判断する。またカントは、人を単なる手段として扱ってはならず、同時に目的として扱うこと、すなわち人を自由な意志をもつ相手として扱い、その人の意志を尊重することの重要性を強調した。放射線防護における個人の線量制限や、意思決定プロセスにおけるステークホルダー参加の重視は、上記のような義務論的な考え方に支えられていると言える。なお、ICRPは、放射線防護体系の倫理基盤についてまとめた報告書(Publication 138)<sup>14)</sup>のなかで、4つの中核的な倫理価値として、「善行・無危害」、「慎重性」、「正義」及び「尊厳」を挙げている。

ICRPは、最新の基本勧告となる2007年勧告(Publication 103)<sup>13)</sup>において、以下の3つを基本原則と

している。

- ・ 正当化
- ・ 防護の最適化
- ・ 線量限度の適用

ここで、「正当化」とは、放射線被ばくの状態を変化させるいかなる決定も害より便益を大きくすべきであるという原則を意味する。「防護の最適化」とは、被ばくする可能性、被ばくする人の数、及びその人たちの個人線量の大きさは、すべて、経済的及び社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきであるという考え方で、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の原則とも呼ばれる。「線量限度の適用」とは、患者の医療被ばくを除く計画被ばく状況においては、規制された線源からのいかなる個人への総線量も、委員会が勧告する適切な限度を超えるべきでないとする考え方で、具体的な個人の線量限度値として、一般公衆については1 mSv/年、職業人については100 mSv/5年かつ50 mSv/年が勧告されている。

上記のような放射線防護を支える倫理的考え方の変化は、放射線と社会や人々との関わり方が時代とともにより広がりを持つようになり、それに伴い便益や害の捉え方、すなわち正当化の概念がより多様化してきたことを示している。例えば、放射線被ばくによる便益が害よりも大きいために必要な条件は、初期の徳の論理の時代では、直接放射線を取り扱う作業者の被ばくの健康影響と職業的便益との比較であった。中期の功利主義の倫理においては、被ばくを受ける公衆全体と受益者全体との比較あるいは相殺が行われた時期があった。チヨルノーベリ事故以降においては、被ばくを受けるステークホルダーにもたらされる便益が正当化できるか、また、事故時に生じるリスクと電力や医療、科学技術面な受益とが正当化できるかが、多様なステークホルダーの立場ごとにそれぞれ問われるようになってきたと言えるだろう。

さて、ICRPは、人が放射線により被ばくする状況を、以下の3つに分類している。

- ・ 計画被ばく状況
- ・ 緊急時被ばく状況
- ・ 現存被ばく状況

ここで、「計画被ばく状況」とは、計画的に管理できる平常時を指し、被ばくが生じる前に防護対策を計画でき、被ばくの大きさや範囲を合理的に予測できる状況を意味する。上記の線量限度はこの計画被ばく状況に対して適用される。「緊急時被ばく状況」とは、放射線事

故や核テロ等の非常事態を指し、急を要しかつ長期的な防護対策も要求されるかもしれない不測の状況を意味する。「現存被ばく状況」は、自然放射線の高い場所や事故後の復旧過程を指し、管理についての決定がなされる時点ですでに被ばくが発生している状況を意味する。緊急時被ばく状況及び現存被ばく状況に対しては、線量限度ではなく参考レベルが基準値として用いられ、線量限度を超えた値（緊急時被ばく状では～100 mSv/年、現存被ばく状況では～20 mSv/年）が採られることも許容されている。

一方、放射性廃棄物処分に係る公衆被ばくの防護は、一般に線量限度よりも低い線量拘束値によって最適化される。しかしながら、ウラン廃棄物処分に伴う潜在被ばくについては、遠い将来に公衆が受ける被ばく状況がどの区分になるかは現状では不明瞭であり、生じうる被ばくのリスクを正確に予測評価することが困難であるため、上記の基本原則（正当化、最適化、線量限度）を十分に満たすことは容易ではない。これを実現するために、

- ・ 説明責任
- ・ 透明性（情報公開）
- ・ ステークホルダーの参画

が一層必要とされている。

ウラン廃棄物処分においては、初めの1000年程度は周辺に与える線量は低いが、1万年から数十万年の間に子孫核種が徐々に増え、放射平衡に達した後はその比較的高い線量レベルが続くと予測される<sup>2)</sup>。また、それらの放射性核種には、閉じ込めや被ばく影響の評価が技術的に難しい放射性ガスであるラドンが含まれる。この被ばくを計画被ばく状況とみなすならば、放射線防護の三原則のうち「線量限度の適用」の原則に照らして、数十万年後に基準（一般公衆について1 mSv/年）を満たしているかどうかの確認が必要となる。ウラン廃棄物の埋設処分にあって、この確認を実施し、数十万年後の被ばく線量を評価する方法や、数十万年間ウランと子孫核種を閉じ込めておく方策、さらに、その線量を線量限度、あるいは線量拘束値以下に確実に抑えるための考え方については、日本保健物理学会の専門研究会などで繰り返し行われてきたが<sup>4)</sup>、関係者の十分な合意をうるには至っていない。

## 2.2 人文・社会科学が必要とされる背景

わが国ではしばしば、正当化、すなわち被ばくと便益との比較を行うことについての考え方を検討することが、通俗的な意味での功利主義、つまり目先の経済的合

理性を重視する考え方と混同されてきた。しかしながら、正当化の原則が持つ本来の意味は「害よりも便益が大となるべきである」というもので、安易に費用対効果（最適化）の検討に入るのではなく、それに先立つ概念として、十分な議論を必要とするものである。一般に、放射線防護の考え方を実践する場合、具体的な指標として線量の基準値が定められ、これを下回るように運用がなされる。例えば、わが国では、それぞれの状況について、線量限度から定められた線量の基準値に対して、それよりもどこまで下げることができるかという観点から、ALARAの原則が認識されている<sup>15)</sup>。しかしながら、本来は、線量限度を守った上でALARAを考えるのではなく、最初の段階である正当化の過程にも用いるべき考え方としてALARAを取扱うのが適切であろう。

これまでのステークホルダー間の対話では、放射性廃棄物処分に係る説明は恒久的な閉じ込めの技術に焦点を当てており、その妥当性についての議論は数百年程度の近未来を想定していた。一方、数十万年という、人類史の長さでは消滅しない放射能を持つ廃棄物の処分においては、将来世代が受ける被ばくの状況や線量等の意味合いに関する考察と共に、放射線防護の原理原則である正当化についての議論が一層重要となる。つまり、処分することによって主に現世代が受ける「便益」が、将来世代が受ける不確かな影響も含めた「害」よりも大きいと確実に言えるのか、処分しないという選択がどのような便益や害をもたらすのかといった点についての慎重な議論が求められる。そのうえで、将来世代の被ばくも含めて、経済的及び社会的な要因を考慮しつつ合理的に達成できる限り線量を低く保つための方策、すなわち人文・社会科学的な視点からの考察を含めた最適化についての具体的な議論が行われることが望まれる。遠い未来にもつながるこうした議論においては、唯一の正解となる最適解があるわけではなく、いろいろな社会的制約や技術的限界のもとで、さまざまな解が有りうる。その中からどれを選び取るかを、専門家や市民や行政官等の立場の異なる人々が、対話や学びの場を通して共に考え明確にしていく取組みが鍵になると考えられる<sup>16)</sup>。そして、超長期にわたる管理責任を伴うウラン廃棄物の処分においては、その取組みにおいて幅広い世代が共に参加することが重要になる。

数十万年後のウラン廃棄物処分場の状況を予測することは、特にそれが数メートル程度の深さの浅地中埋設処分である場合、実際に処分される土地の特性や利用形態にも強く影響されることから、非常に大きな不確かさを

伴う。こうした不確かな状況において個人について提示された線量基準を満たすためには、高い防護性能を持つ人為的な放射線防護策が必要と考えられるが、その性能が数十万年という長期間耐えうると想定するのは現実的ではない。ウラン廃棄物処分を検討する際のタイムスケールにおいては、人為的な防護性能が全て失われた状態を前提とすることが妥当と言える。すなわち、人為的な防護性能が全て失われた状態においても守られる基準が必要とされる。

その妥当性について、高レベル放射性廃棄物の埋設処分に用いられるガラス固化体との比較で考えてみる。ガラス固化体とウラン廃棄物には、放射能の寿命の長さや、発生元がウラン鉱石であること等の類似した特徴がある。原子力発電環境整備機構がまとめた「地層処分安全確保の考え方」<sup>17)</sup>によれば、地層処分されたガラス固化体は、10万年後、加工前の原料相当量のウラン鉱石の放射能まで減衰する。すなわち、ガラス固化体を人が手を加える前のウラン鉱石と同等の状態に戻すことが、地層処分の一つの目標であると言える。一方、ウラン廃棄物では、その長い放射能寿命、子孫核種の発生と増大、中でも放射性ガスであるラドンの発生がもたらす被ばくのレベルが当初定めた線量基準を上回る可能性があることなどに議論の余地がある。ウラン廃棄物が地層処分されたとして、10万年後の公衆が受ける被ばくが浅地中処分されたものと比べて減じるかは、10万年後の地層処分防護性能の状態や、10万年間にわたる核種流出がもたらす希釈の効果が不確かさであるため、はっきりと断定できない。超長期の時間経過に伴う不確かさが、放射性物質の総量や濃度などに係る情報伝達を難しくし、防護性能の劣化が全ての覆土や防護壁を失わせるという仮定のもとでは、10万年後の放射能レベルが埋設時よりも高くなりうるウラン廃棄物を高レベル放射性廃棄物と同じ考え方・方法によって地層処分することの妥当性に疑義が生じる。

これまでのウラン廃棄物処分に係る検討においては、主に理工学的アプローチに基づき、各シナリオに基づく線量予測が行われ、基準値との比較に基づいて安全性などについて評価されてきた。一方、超長期にわたるシナリオの妥当性やその不確かさへの対処、評価された線量の意味、ウラン廃棄物自体の位置付け、世代間倫理などについて、より慎重かつ多角的な視点からの議論が必要と認識されつつある。すなわち、人文・社会科学の視点を組み入れることによって、議論の中身をより豊かなものとし、当該問題に関する公共的な議論へと展開してい

くことが求められている。そして、これらの議論の過程を公開することにより、ステークホルダーの自発的な参加を促し、非専門家の意見を含む多くの視点や考え方を取入れながら、市民の大多数と共通的な基盤を形成していくことが望まれている。結局のところ、そうしたアプローチが、広く社会の合意を得てウラン廃棄物処分を実施するうえで、最短の道であると考えられる。

### 2.3 世代間倫理と持続性の問題

わが国では、当然のごとく、現在の世代も将来の世代も同一の法体系で安全が確保されるとして放射性廃棄物処分の議論がなされてきた。その源泉は、人類が生み出した人工放射性物質は比較的短寿命であり、いずれ消滅するという見通しと、その見通しに沿った倫理観であろう。しかし、ウラン廃棄物については、いずれ放射能はなくなるという仮定は成立せず、時間が経つほど被ばく線量は小さくなるという前提での議論に矛盾が生じる。すなわち、「将来世代の防護も現世代の防護と同じように配慮しなければならない」という考え方<sup>18, 19)</sup>を精緻に考察する必要性が出てきた。

現在の原子力利用に係る規制では、行政・専門家・市民・事業者・メディアが良好なコミュニケーションを通じて共通理解のもとに合意が形成される前提となっており、放射線防護の専門家は、この枠のなかで、放射線防護体系の基盤を成す普遍的な倫理観に基づいて他のステークホルダーとのコミュニケーションを深めようと努めている。しかし、遙か未来の社会におけるコミュニケーションは、現在と同じく行政・専門家・市民・事業者・メディアがステークホルダーで現在と同じ知的基盤に立って放射線被ばくの影響を理解し対処しているとは限らない。

現世代の我々は、そうした遠い未来に起こる変化を予測するのは困難であるという理由をもって、今の状況が続くという仮定に立って検討を進めている。この仮定を用いるにあたって留意すべきことは、将来世代であっても、専門家等により評価された放射線被ばくの影響は、関係するステークホルダー間の良好なコミュニケーションで合意され社会に受け入れられるものであると期待されるものの、その合意点は静的に固定されているのではなく、価値観・倫理観や状況の推移にともなって時代と共に変わるという点である。

その見通しに沿えば、現世代が将来起こりうる全ての問題を解決しようとするのはある意味傲慢であり、将来の世代に自由な選択肢を与え、現在とは異なる倫理観や価値観が主流となった未来の社会において、関係するス

テークホルダー間の議論で問題の解決が図られるべきであるという考え方も成り立つ。なお、処分場の定量的評価は1万年までという現在の方針については、米国のエネルギー省 (DOE)、環境保護庁 (EPA)、原子力規制委員会 (NRC) といった関連する政府機関の担当者が集まって、1万年を超える長期の影響について信頼性の高い定量的評価を行うことは困難であるとの認識に立って制定されたものであり<sup>1)</sup>、審議結果としての方針だけでなく、方針の背景にあるそうした認識も将来世代と共有し続ける努力が必要であろう。

この問題は、現世代と将来世代との間の廃棄物処分についてのリスクコミュニケーションであると捉えることもできる。確かに、現世代の私たちは将来世代の考えや意向を知ることにはできない。しかし、将来世代に対して現世代の考えや意向を伝えることは可能である。現世代が知り得ている放射性廃棄物についての知識・情報、それらに基づく現世代の認識と判断、現世代が放射性廃棄物について実際に為した対策とその対策に対する評価 (自負や反省を含む) を、隠すことなくすべて書き残し遠い未来へ伝えることを、将来世代に対するリスクコミュニケーションとして誠実に行う必要がある。それらの情報は、将来世代にとって、現世代が生み出した放射性廃棄物をより適切に取扱う助けになると考えられるからである。すなわち、現世代は、将来世代から正確で有益であると信頼される情報を将来世代に確実に伝える努力をするべきである。そのことによって、将来世代から現世代に対する信頼が得られると期待される。

「子どもは親を選ぶことができない」と言われるように、実際には後世代の者は前世代が残した遺産を、それが正の遺産であれ負の遺産であれ、すべて所与の条件として受け継がなければならない。そうであるからこそ、現世代が負の遺産となりうると判断する事象については、世代間倫理として、関連するすべての情報を誠実に将来世代に伝えなければならないと考えられる。そのことによって将来世代が取りうる選択の幅が広くなると期待できることから、将来世代を尊重することにつながるからである。

科学技術に関する情報は、一般に将来世代のほうが現世代よりも進んでいると期待される。そのため、科学技術に関する情報はあえて将来世代に伝える必要は低いのではないかとの考え方もあろう。しかしながら、リスクコミュニケーションとして将来世代に伝えるのは、現世代が選択した判断あるいは対策の根拠とした科学技術情報である。現世代が何を知っており、また、何を知って

いなかったかを将来世代に伝えておくことによって、現世代が為した判断と対策を将来世代が理解しやすくなり、将来世代が現世代の判断や対策の意味をふまえたより良い選択ができるようになると考えられる。

価値観や倫理観が、時代によって変化しながらも、長く後世に伝わる可能性はある。例えば、二千年以上前に成立した論語に代表される儒家の思想やユダヤ教の聖書の教えは、現代においても理解されており、これらを拠り所とする価値観や倫理観を持つ人々は現世代にも多くいる。普遍的な価値観・倫理観とまではいえなくとも、少なくとも、数千年にわたって受け継がれている価値観・倫理観は存在する。しかしながら、過去の文明社会の多くは遺跡だけを残して消え去り、そこで生きていた人々が何を大切に考えていたか等を正確に理解することは難しい (Fig. 2)。そうした価値観や倫理観は、単に文字あるいは記録として残しておくだけで後世に受け継がれるものではない。遙か昔の思想や教えを現世代の私たちが理解できるのは、その価値観・倫理観を支持する人々が幾世代にもわたって存在し続けてきたからである。

放射性廃棄物にかかる現世代の価値観・倫理観を将来世代に伝えて理解してもらうには、価値観・倫理観を記録として残すだけでは十分ではないであろう。少なくともその価値観・倫理観を理解できる人々が将来世代にも存在するように、現世代は次世代に働きかけてゆく必要がある。これは現世代の価値観・倫理観を将来世代に強制することではない。将来世代には現世代の価値観・倫理観を否定する自由がある。現世代の価値観・倫理観を将来世代が理解したうえで、受容するか否定するかの判断ができるように配慮することが、現世代の倫理的責任と言えるだろう。

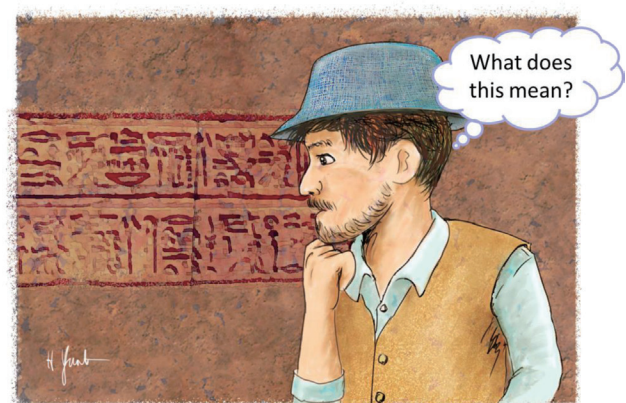


Fig. 2 Image of an archeologist looking a message at an ancient site.

### 3. 超長期評価の信頼性確保に向けて

#### 3.1 超長期評価の不確かさ

2020年に意見公募された新しいウラン廃棄物処分概念の特徴は以下のとおりである。

- ・ 定量的評価期間の設置：処分場がウラン廃棄物を閉じ込め公衆を守る被ばく防護性能の維持を保証し、規制できるのは1000年までである。
- ・ 処分場上限濃度の設置：処分場の公衆被ばく防護性能が年代経過によりやむを得ず失われた時に備え、低濃度のウラン廃棄物を天然賦存の土壤濃度程度に定め、超長期の地質・人為のイベントにかかわらず、事故時等の潜在被ばくの基準に照らし許容量の目安とする。

これらは、これまでの超長期評価の不確かさへの2つの考え方、処分場性能の維持に係る公衆被ばく評価と処分場潜在被ばく評価の発展的融合である一方、以下の課題を持つ。

- ・ 定量的評価期間の設置による、線量拘束値による評価から潜在被ばく評価への移行の考え方は被ばく防護の原則に照らして矛盾がないか。
- ・ 潜在被ばくが現実化した際の被ばく低減対策は、将来世代に依存することになる。このことについての後世への配慮をどうすればよいか。

本章では、この新しいウラン廃棄物規制の考え方の特徴を整理するとともに、人文・社会科学的観点に立ってその整合性について検討してみたい。

#### 3.2 評価期間の設定と将来世代の防護

原子力規制委員会は、浅地中処分の線量評価において信頼性を確保できる期間の目安を1000年と仮定し、それ以降の長期の評価においては不確かさが高まることから、自然事象シナリオにおいて考慮すべき評価期間の目安を「規制期間終了後1000年程度」としている。また、これを超える期間については、「明らかに保守的と考えられる設定の下で線量ピークまで計算し、その結果が自然事象シナリオの線量基準を著しく超えないこと」及び「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出を考慮しない等の明らかに保守的と考えられる設定で評価しても、ビルドアップやラドンの影響が顕著となる数万年以降の線量が著しく高くなることはないこと」を確認することにより、長期における評価の不確かさに対応するものとしている<sup>20)</sup>。

国際原子力機関（IAEA）は、長半減期核種を浅地中処分する場合、遠い将来の評価の不確かさが非常に大き

くなるため、定量的評価の時間軸を制限するかもしれないと述べている<sup>21)</sup>。その一方で、「しかしながら、そのようなすべてのケースにおいて、定量的評価期間を超えた影響について、セーフティケースでは適切な仕方でも対処されるべきである」との表現もある。その意味するところは、信頼性のある定量的評価を行いうるかどうにかかわらず、放射能のレベルが問題となる時間軸の全体にわたって安全についての考慮を尽くすべきであり、通常の定量的評価に限界がある場合には、それを補完ないし代替する方法によって長期の安全問題に向き合うことが要請されているものと解釈しうる。

例えば地層処分では、放射性物質が人工バリア及びその周辺の母岩という長期にわたって変化の極めて小さい領域に閉じ込められており、その領域が極端な外的擾乱から隔離されていることが10万年程度の長期の時間枠についても確実に予測できれば、人間活動や地表の生活環境の変遷についての将来予測は極めて不確実であっても、将来の生活環境に放射性物質の危険がもたらされないことを保証しうる、という考え方を練り上げてきた<sup>22)</sup>。

ウラン廃棄物処分においては、最も被ばく影響が出る時期が遠い将来（数万年～数十万年以降）と目されることから、工学システムの設計や定量的評価の長期的信頼性の限界という「技術側の事情」と「影響を受けうる遠い将来世代の防護の保証」とのギャップが特に大きくなる特徴がある。それにもかかわらず、評価側の技術的な理由、すなわち、数万年先の未来について信頼性の高い評価を行うことの困難さを根拠として、最も影響が出ると目される時期を評価の範囲外とするのは望ましい対応とは言いがたい。また、ICRPが述べている「将来における個人と集団が、今日とられた行動から現在の世代が与えられているのと少なくとも同じレベルの防護を供与されるべきである」という考え方<sup>18)</sup>に照らして、定量的評価が可能かどうかということを理由に現世代と同等レベルの防護が供与される世代とそうでない世代とを区分すること、すなわち、定量的評価期間を超えた遠い将来世代の防護のレベルや質を落とすことも許容されないと考えるのが適切であろう。

#### 3.3 「ウラン流出なし」シナリオとその意味

放射性廃棄物処分の評価では、被ばくシナリオを「自然過程」と「人間侵入」の2つに大別する考え方が確立されてきた。前者の「自然過程」シナリオに対しては、評価された線量（またはリスク）を線量拘束値（またはは

リスク拘束値)と比較することが求められている。一方、後者の「人間侵入」シナリオに対しては、現存被ばく状況における参考レベル(1-20 mSv/y)や緊急時被ばく状況における参考レベル(20-100 mSv/y)が用いられてきた。

「人間侵入」シナリオに拘束値を適用しない理由として、①「将来の人の行動の種類または確率を予測する科学的根拠は乏しいまたは存在しないから」、②「定義によって、侵入事象は防護の最適化の一部として設置されているバリアの一部またはすべてをバイパスするから」の2点が指摘されている<sup>21)</sup>。処分システム的设计によって本来であれば機能し続けることが合理的に期待される防護を、敢えて無効化することを仮定したシナリオだからこそ、拘束値を目安とした最適化とは別枠で考慮することが正当化されうる。

ウラン廃棄物処分の放射線防護が問題になる超長期的な時間軸においては、処分施設の人工構築物(コンクリートピット等)は徐々に機能を失い、計算上ピーク線量が出現する時期(数万~数十万年以降)には機能していないと考えられる。加えて、天然バリアとしての数m程度の厚さを持つ覆土層もまた、10万年以降の超長期においては自然現象や人間・動植物等による擾乱によって失われると考えられる。実際、原子力規制委員会の提示した試算では覆土層が完全に失われたものとして評価が行われている。すなわち、ウラン廃棄物の浅地中処分では地層処分の場合と異なり、超長期ではバリアが維持されないことを前提として処分システムが構築されていると言える。一方、最適化にあたり「人間侵入」シナリオを線量拘束値(またはリスク拘束値)の適用枠外に置く理由が、本来期待されるべきバリアを敢えて無効化して考えるからという点にあったことを踏まえると、「ウラン流出なし」シナリオで得られる線量を、線量拘束値ではなく、現存被ばく状況における参考レベルと比較してよいとする論拠についての疑問が生じる。

### 3.4 ウラン流出の希釈・分散戦略としての位置づけについて

ここで、「浅地中処分場の持つ閉じ込め性能の限界による、結果的な被ばく防護性能としてのウラン流出」という戦略を軸に、長期評価の意味合いについての思考実験をしてみたい。この戦略では、埋設時の廃棄物のウラン濃度制限とともに、処分施設周辺土壌の働きによるウランの長期にわたる緩慢な自然流出を、処分システムを構成する設計上の機能として位置付けている。すなわち、

自然によるウラン流出の働きを織り込んだ形で処分概念を構築している。

この考え方に立てば、自然によるウラン流出は(その程度が問題にはなるものの)本来期待される機能となり、超長期の線量評価の意味も、地層処分などと同様に「システムの頑健性の指標」として捉えられるかもしれない。また、ウラン流出という機能を敢えて無効化して考えるシナリオは、「人間侵入」シナリオ相当すなわち線量拘束値(またはリスク拘束値)の適用枠外として考えることが正当化されうるだろう。いささか極端な例だが、処分施設の制度的管理期間の終了後、人間の土地利用によって処分施設の周囲に堅固な地中壁が設置され、自然によるウラン流出という本来期待される機能が発揮されなくなる場合がこれに相当するだろう。原子力規制庁の示した「ウラン流出なし」シナリオも、同様な形で位置付けられるかもしれない。もちろん、こうしたシナリオを線量拘束値を用いた最適化のプロセスから外してよいとするためには、ウランの自然流出という機能が阻害されるような可能性をできるかぎり低くする対策を適切に実施した上で、という条件が付されるべきであり、その結果、より深い深度での処分につながる可能性もある。ただ、地層処分のような非常に深い場所では、物質の動きが極めて緩慢であるため、ウランの自然流出を機能の一環として位置づけるならば、却って望ましくないかもしれない。ウランの自然流出という機能が有効に働くようにするために、外部からの擾乱の受けやすさと自然流出の速度を可能な限り定量化したうえで、防護の観点から両者が最適化されるように深度の決定や処分施設を設計することが重要であろう。

なお、実際にウラン流出を設計上の機能と位置付けるには流出速度の不確実性やウランの化学毒性等の考慮すべき課題が多いことから、ここではあくまでシナリオの整合性を検討する思考実験の一例として示したものである。

### 3.5 ウランを「自然」に還すことについて

原子力規制委員会はウラン廃棄物処分における「十分に低い放射能濃度」として、ウランの天然賦存性に依拠した地殻分布の変動範囲上限濃度である1 Bq/gを提案している<sup>2)</sup>。しかし、これが線量限度に基づくものか参考レベルに基づくものかは、必ずしも明確ではない。埋設処分をする時点の濃度基準に親核種(<sup>238</sup>Uや<sup>226</sup>Raなど)で1 Bq/gであるとする、放射平衡条件では、主にラドン(222Rn)の寄与により、処分場の防護機能である覆土の性能



劣化等が起こらないとしても、一般公衆の線量限度である  $1 \text{ mSv/y}$ <sup>17)</sup> を超える可能性がある。こうした容易に行える予測にもかかわらず  $1 \text{ Bq/g}$  が基準値とされている背景には、この程度の低いウラン濃度であれば（自然流出を考慮した場合の）遠い将来の人や環境への影響と、元の天然賦存のウランによる影響とが同程度に収まるだろうという考えがうかがえる。対象となる個人の被ばく評価に比べ、濃度による規制には不確実性の低減が期待できるだろう。

しかしながら、長期評価において、遠い将来世代にとっては自然由来と廃棄物由来のラドンが区別できないだろうという理由で、まとめて現存被ばくとして扱ってもよいものだろうか。ウランを「自然」に還する努力を行い、その結果として生じうる被ばくが「自然」と「人為」の識別が不能な程度であれば、遠い将来世代に許容されるだろうか。放射線防護体系の根底を成す考え方がこの数十年の間に大きく変遷してきた事実を鑑みても、そうした現世代の論理をもって是非を判断するのは適切でないと考えべきではないか。

リスク社会学では、科学技術の発展とともに「天災」とされていた事象が「人為」の所産として認識されるようになると、誰がその責を負うのかが社会的・政治的焦点になりやすいと指摘されている<sup>23)</sup>。気候変動に対する技術的解決の一方策として提案されている気候工学のように、「人為」と「自然」の区別が曖昧化すると、逆に責任の範囲や帰属先の確定をめぐる激しい政治的論争をもたらす、そうした論争自体が将来世代にとっては大きな負担となりうる<sup>24)</sup>。遠い未来において人類がより高度な科学的知識を有していると仮定すると、将来世代がラドン被ばくに対処しようとする際、ラドンの起源について可能な限り特定をし、その責任主体を明確化しようと試みるであろう。そして、ラドンの一部が遠い過去に実施された廃棄物処分に由来すると知ったとき、将来世代の人々は「本来は自分たちに帰されるべきではない負担を強いられている」と考える可能性がある。そうした考えを持たれないためには、実施する処分方法が現世代が採りうる最良の手段であることを明確にし、それを未来へ伝える必要があるだろう。

また、原子力規制庁の評価では、遠い将来のラドンによる潜在被ばくを評価し、WHO 及び ICRP の基準（参考レベルとして一般住居環境で上限  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ 、これは年当たり  $10 \text{ mSv}$  の被ばく線量に相当<sup>25, 26)</sup>）と比較して、その適切性を判断する目安としている。他方で、特に欧州を中心としてラドン被ばくへの注目が高まりつつあ

り、職業被ばくに関する規制においてラドン被ばくの考慮を検討している国が現れているほか、一般の住居等についてもラドン被ばくについての注意喚起を促すべきかどうかといった議論が行われている<sup>27)</sup>。特に、地質や密閉性の高い住居が多い北欧諸国などでは、現在も受容しがたいほど高いレベルのラドン被ばくが起きており、リスクを低減する必要性が社会的に認識されつつある状況と言えるだろう。

あるレベルのリスクが社会的に現存しているからといって、それが社会的に容認されているとは限らないという批判は、リスク認知研究の分野では古くから存在する<sup>28)</sup>。身近な例を挙げれば、わが国における自動車による交通事故死者数は昭和 40 年代に年間 17,000 人近くにまで達していたが、自動車利用が禁止されていなかったからといって、その高いリスクが社会的に受容されていたわけではなく、交通安全に関するさまざまな施策が行われ、交通事故を減らす努力が今日まで続けられている。一方で、現在の民主的な社会において全ての市民に大きな手間や費用のかかる対応を強制することは適切ではなく、追加的な防護策を実施するために正当化についての説明を行うこと自体の倫理的な難しさなどもあり<sup>29)</sup>、被ばくの問題をめぐる議論では一筋縄ではいかない。

### 3.6 将来世代の被ばく低減対策への依存

本専研においては、処分場の防護性能が不確実となる期間がウラン半減期よりも早く到来することから、それ以降の現存被ばく状況への対策は将来世代に依存することとなり、遠い将来世代に対して放射性廃棄物の存在や処分・管理に係る考え方を確実に伝えるためにはどうすればよいか、といった問題提起がなされた。しかし、従来の放射性廃棄物処分の原則に照らして考えるならば、管理期間が終了した以後においては処分システムの機能によって安全が達成される保証が得られることが前提であり、遠い将来の人間による能動的な被ばく低減対策を安全機能の一部として組み込むことはできないはずである<sup>30)</sup>。実際、他の放射性廃棄物の処分概念は、いずれもこの原則を満たすような形で構築されている。例えば短寿命核種の浅地中処分は、制度的管理が数十～数百年程度は有効であり続けるという前提で設計されるが、同時に、管理期間中に放射能が十分減衰し、期間終了時には人間侵入や擾乱を受けたとしても問題ないような程度の被ばくしか起こらないことが保証される必要があり、またそうなるようなインベントリの廃棄物のみが受け入れを許可されることとなる。

言い換えると、将来世代の能動的対応の必要性がないような形で処分概念を構築することが必要であり、処分方法をいったん決めた後でその必要性が生じた場合には、処分方法の選択の妥当性自体を再検討することが求められる。逆に、管理期間終了後の長期的な被ばく対策を安全対策の構成要素として認めるならば、高レベル放射性廃棄物の地層処分の必要性を裏付ける論理に対して大きな影響を及ぼすことになる。地層処分の選択に係る倫理的議論では、“rolling present”という、責任を次世代へ引き継いでいく考え方に基づく長期貯蔵（制度的管理）よりも、廃棄物の発生者である現在の世代が責任をもって処分する方が、将来世代に不当な負担をかけず倫理的であるとの主張が長くなされてきた<sup>31)</sup>。もしウラン廃棄物の浅地中処分が遠い将来世代の能動的な対応を前提とするのであれば、上記の倫理的正当化の判断が変わる可能性が出てくる。

ウラン廃棄物処分が将来世代の被ばく低減対策に依存しなければならないのであれば、処分概念自体を再考する必要があると考えられる。もちろん、そのような再考（受け入れ可能な濃度基準の再設定や、より深い深度での埋設処分オプションの検討等）を行った上でもなお、さまざまな観点から見て浅地中処分が最も合理的な取り組みであると言える可能性もある。ただし、その場合には、廃棄物処分の原則から見て例外的な処分概念がなぜ正当化するのかを、説得力のある論拠とともに丁寧に示すことが必要となる。

なお、安全確保に不可欠な要素の一つとしてではなく、処分システムの受動的な安全機能の働きをより確実なものとするために、記録保存やモニメントの設置といった手段を検討することは、上記の倫理的判断を覆すものではない。ただし一般的な浅地中処分では、能動的管理が行われるのは操業段階のみであり施設閉鎖後は間接監視期間へと移行していくが、この段階では処分施設に対して直接的に手を加える能動的管理ではなく、モニタリングや土地利用制限といった“watchful care（注意深い監視）”が行われるものとされる<sup>21)</sup>。仮に、ウラン廃棄物処分において、施設が閉鎖されてから長期間を経た後に覆土の修復を実施するような場合は、間接的な監視である watchful care の範囲を超えられ、この点でも議論が必要になるとと思われる。

### 3.7 必要な取組み

原子力規制委員会の提案したウラン廃棄物の浅地中処分の考え方には、減衰や閉じ込めに期待できないという

廃棄物の特性に鑑みて、前述の「技術側の事情」と「影響を受けうる遠い将来世代の防護の保証」とのギャップを乗り越えようとする工夫が随所に見られる。定量的評価期間とそれ以降の期間との区分や、複数のシナリオによる潜在被ばく評価など、いずれもさまざまな考慮の結果導かれており、通常の評価が成り立たないほど超長期の時間軸における遠い将来世代の防護を何とか保証しようとする努力が行われた結果と言いうる。

一方で、その根本にある戦略の一層の確立と言語化が必要と思われる。例えば、先述したように、「ウラン流出なし」シナリオの評価に現存被ばく状況の参考レベルを用いることの妥当性など、既存の放射性廃棄物処分の考え方とは十分に整合しない点も見られる。また、明文化はされていないものの、現在の考え方の背後にあると思われる、ウランを「自然」に還すという考え方は、ウラン廃棄物の特性を踏まえて新たな戦略を示していると思われる一方、ラドン被ばくをめぐる「自然」と「人為」の識別などの点で、将来世代にとっての負担を増すことになるとの見方も成り立つ。この点に係る検討においては、人文・社会科学的な視点からの考察がより重要な意味を持ってくる。そうした幅広い分野にまたがる議論を通して、シナリオの位置づけや比較に用いるべき基準が明確となり、より一貫した処分概念の構築に寄与するであろうし、また社会的な合意形成期を促すものと期待される。

## III ま と め

本報は、2020～2021年度に（一社）日本保健物理学会に設置された「人文・社会科学的視点から考察する自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会」での議論の概要をとりまとめたものである。その議論においては、超長期の管理が必要となりうるウラン廃棄物の取扱いに関して、その処分量や処分方法等の技術的側面に関する理解を深めるとともに、処分に関して現世代に広く許容される判断根拠や、それをいかに将来世代へ伝達するか等について、人文・社会科学的な視点を重視した意見交換を中心に行った。そして、今後取り組むべき課題として、以下に述べるような認識を共有した。

- ・ウラン廃棄物の管理に関する現行制度や、処分するウランの量や埋設方法等に係る情報伝達の仕組みは、技術的困難を伴う十万年オーダーの超長期にわたる防護性能の維持という、高レベル放射性廃棄物処分にも共通する課題を克服しようとする取組みであり、現世代の責務として、これに最大限の努力を

することが求められる。

- ・ 人類史の観点等から推測されることとして、こうした法制度やその基盤となる考え方は、特別の配慮をしない限り、遠くない未来に不明瞭となり、将来世代に理解されなくなると考えるのが自然と考える。また、ウランの用途や土地利用形態等の変化に応じて、将来世代が廃棄物処分施設の解体や移動を希望する可能性も考慮する必要がある。
- ・ 今後の課題として、将来世代が地殻の平均濃度を超える状態で埋設するウラン及びその子孫核種の存在とそのリスクを確実に理解したうえで処分場所や管理方法を自らの判断と技術で柔軟に変更しうる方策について、人文・社会科学的な視点を広く取り入れた議論を行い、それによって得られた知見を反映させたウラン廃棄物処分の具体的方法を明示する努力が望まれる。

筆者らは、上記の認識が学会員と広く共有され、今後高レベル放射性廃棄物にも考察の対象が拡がり、地層処分を含む放射性廃棄物処分問題全体について早急に解決の道筋が示されることを望み、それに貢献したいと願っている。

## 謝 辞

本報の内容は、2020～2021年度に（一社）日本保健物理学会の「人文・社会科学的視点から考察する自然起源放射性物質含有廃棄物の取扱い専門研究会」で議論した内容をとりまとめたものである。そこでの議論や学会の集まりでの報告においては、多くの専門家等から有益な指摘や助言をいただいた。特に、本専研の会合において、次に挙げる方々（五十音順、敬称略）から、演者や指定発言者、オブザーバー等として関連の情報やご助言をいただいた：大森宏貴（中部電力（株））、草尾豊（（株）千代田テクノル）、栗原晃一（三菱重工業（株））、栗原千絵子（（国研）量子科学技術研究開発機構）、小西恵美子（鹿児島大学）、下道國（元藤田保健衛生大学）、杉山大輔（（一財）電力中央研究所）、瀬川嘉之（高木学校）、谷幸太郎（（国研）量子科学技術研究開発機構）、玉越武（中部電力（株））、三ヶ尻元彦（（株）ワカイダ・エンジニアリング）、山口一郎（保健医療科学院）、山口文恵（（国研）日本原子力研究開発機構）、山本正史（（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター）。本学会企画委員や理事会の皆様にも大変お世話になった。ここに記して関係者への謝意を表す。

## 利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。

## 参 考 文 献

- 1) H. FUMOTO; Radioactive waste disposal —uranium as natural radioactive substances in waste disposal—, *Radioisotopes*, **66**, 641–693 (2017) (in Japanese).
- 2) Nuclear Regulation Authority (NRA); Concept of Regulations Concerning Clearance and Disposal of Uranium Waste, Gen-Ki-Ki-hatsu No. 2103109 (2021a) (in Japanese).
- 3) H. YASUDA, H. FUMOTO and T. SAITO; Growing need for humanities and social science studies in uranium waste disposal, *ATOMOS*, **63**, 610–614 (2021) (in Japanese).
- 4) T. SAITO, S. KOBAYASHI, T. ZAITSU, M. SHIMO and H. FUMOTO; Activity report of the task group of radiation protection about wastes containing natural radioactive nuclides. *Jpn. J. Health Phys.*, **55**, 86–91 (2020) (in Japanese).
- 5) Nuclear Regulation Authority (NRA); Requirements in Regulatory Standards Concerning Clearance and Disposal of Uranium Waste, Gen-Ki-Ki-hatsu No. 21031011 (2021b) (in Japanese).
- 6) Nuclear Regulation Authority (NRA); Regulations Concerning the Operation of Type 2 Waste Disposal of Nuclear Fuel Materials or Materials Contaminated by Nuclear Fuel Materials, Prime Minister's Office Ordinance No. 1, Article 1–2, Paragraph 2, Item 3 of 1988 (2021c) (in Japanese).
- 7) Nuclear Regulation Authority (NRA); Interpretation of the Regulations on Standards for Location, Structure and Equipment of Type 2 Waste Disposal Facilities, Article 12, Paragraph 1, Item 8 (2021d) (in Japanese).
- 8) Nuclear Decommissioning Authority (NDA); Geological Disposal: Investigating the Implications of Managing Depleted, Natural and Low Enriched Uranium through Geological Disposal. Report no. NDA/RWM/142, ISBN 978-1-84029-534-4 (2016).
- 9) Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ); Radioactive Material License R04100 for Waste Control Specialists, Andrews, Texas (2015).
- 10) Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM); Managing our radioactive waste safely: CoRWM's

- recommendations to Government. CoRWM Document 700 (2006).
- 11) A. BATH and D. READ; Integrated Project Team on Uranium: Phase 2 Task RUP-3.2A: Conceptual model of far-field uranium transport. Galson Sciences Ltd Report 1207-RUP-3.2A-1 Version 2.1 for RWM, October 2015.
  - 12) International Commission on Radiological Protection (ICRP); 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, **21** (1–3) (1991).
  - 13) International Commission on Radiological Protection (ICRP); The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, **37** (2–4) (2007).
  - 14) International Commission on Radiological Protection (ICRP); Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. *Ann. ICRP*, **47** (1) (2018).
  - 15) Nuclear Regulation Authority (NRA); Formulation of Regulatory Standards for Intermediate-depth Disposal—Concept of Application of ALARA to Near-surface Disposal and Concept of Human-cause Event Scenario for Intermediate-depth Disposal—, Material for 69th Nuclear Regulation Authority Meeting (2018) (in Japanese).
  - 16) S. MATSUOKA, M. SAKAMOTO, K. JURAKU, T. TERAMOTO and N. AKIMITSU; Disaster countermeasures linked to the future—for the collaboration of science, politics and society (Mirai he tsunagu saigai taisaku—Kagaku to seiji to shakai no kyodo no tame ni), Yuhkakusha Publishing Co. Ltd., Tokyo (2022) (in Japanese).
  - 17) Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO); Concepts for ensuring the safety of geological disposal of radioactive wastes (2017). Available at: <https://www.numo.or.jp/topics/201818060816.html>, accessed on 10 April 2023 (in Japanese).
  - 18) International Commission on Radiological Protection (ICRP); Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure”, ICRP Publication 82 (1999).
  - 19) International Commission on Radiological Protection (ICRP); Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122. *Ann. ICRP*, **42** (3) (2013).
  - 20) Nuclear Regulation Authority (NRA); Assessment Period for Near-surface Disposal, Gen-Ki-Ki-hatsu No. 21031010, (2021b) (in Japanese).
  - 21) International Atomic Energy Agency (IAEA); The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA, Vienna (2012).
  - 22) S. MASUDA; Geological Disposal of High Level Radioactive Waste Deep Underground, Radioactive Waste Management Funding and Research Center (2016) (in Japanese).
  - 23) U. BECK; Risk Society—Towards a New Modernity, Sage: London (1992).
  - 24) B. SZERSZYNSKI, M. KEARNES, P. MACNAGHTEN, R. OWEN and J. STILGOE; Why solar radiation management geoengineering and democracy won't mix, *Environ. Planning A*, **45**, 2809–2816 (2013).
  - 25) World Health Organization (WHO); WHO Handbook on Indoor Radon, A Public Health Perspective, ISBN 978-92-4-154767-3 (2009).
  - 26) International Commission on Radiological Protection (ICRP); Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, *Ann. ICRP*, **40** (1) (2010).
  - 27) M. L. B. NOVILLA, J. D. JOHNSTON, J. D. BEARD, L. L. PETTIT, S. F. DAVIS and C. E. JOHNSON; Radon awareness and policy perspectives on testing and mitigation, *Atmosphere*, **12** (8), 1016 (2021).
  - 28) B. FISCHHOFF, P. SLOVIC, S. LICHTENSTEIN, S. READ and B. COMBS; How safe is safe enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits, *Policy Sciences* **9**: 127–152 (1978).
  - 29) D. OUGHTON, G. MESKENS, R. GEYSMANS, T. PERKO and P. MIHOK; Ethical Challenges in Social Science Research related to Radon and NORM, Presentation at RICOMET 2021 (2021).
  - 30) International Atomic Energy Agency (IAEA); Disposal of Radioactive Waste Specific Safety Requirements, Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna (2011).
  - 31) Organisation for Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the NEA RWMC (1995).



保田 浩志 (やすだ ひろし)

専門分野は放射線・放射能の線量測定評価。京都大学工学部卒，工学博士。科学技術庁放射線医学総合研究所（当時），文部科学省研究振興局，国連科学委員会（UNSCEAR）事務局等での勤務を経て，2015年10月より現所属（教授）。趣味は絵を描くこと。

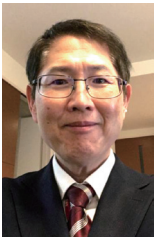
E-mail: hyasuda@hiroshima-u.ac.jp



土田 昭司 (つちだ しょうじ)

専門分野はリスクコミュニケーション，安全社会心理学。東京大学文学部卒。大阪大学人間科学部，明治大学文学部，関西大学社会学部を経て，2010年4月より現所属（教授・学部長）。趣味はクラシック音楽と山歩き。

E-mail: tsuchida@kansai-u.ac.jp



齋藤 龍郎 (さいとう たつお)

専門分野は放射性廃棄物処分，自然放射性核種，ウラン環境動態。（国研）日本原子力研究開発機構所属。

E-mail: saito.tatsuo@jaea.go.jp

笠井 篤 (かさい あつし)

専門分野は放射線防護・被ばく線量評価，日本の原子力研究開発創成期から日本原子力研究所で原子力安全性研究を行ってきた。TMI事故，チェルノブイリ原発事故，福島原発事故の調査等に取り組んだ。国際原子力機関（IAEA），国連科学委員会（UNSCEAR）の委員も勤めた。元日本原子力研究所主任研究員・研究室長。

E-mail: kasaiat@h7.dion.ne.jp



麓 弘道 (ふもと ひろみち)

専門・関心分野は放射性廃棄物処分，原子力発電利用に伴うリスクの社会受容性，核燃料製造，核燃料サイクル。

E-mail: h.fumoto@nihonkensa.co.jp



古田 定昭 (ふるた さだあき)

専門分野は放射線防護，特に環境放射線や NORM からの防護。名古屋大学工学部卒，工学博士。動力炉・核燃料開発事業団（当時）入社後，大洗，人形峠，東海の各事業所での放射線管理業務に従事し，2021年4月より現所属。趣味は旅行。

E-mail: s\_furuta@hotmail.com



菅原 慎悦 (すがわら しんえつ)

専門・関心分野は，リスク・ガバナンス，科学技術社会論。東京大学大学院工学系研究科卒，博士（工学）。（一財）電力中央研究所での勤務を経て，2019年9月より現所属（准教授）。

E-mail: s\_suga@kansai-u.ac.jp

## レポート

高濃度空气中放射性物質のモニタリングのための  
可搬形β線ダストモニタの開発佐川 直貴\*<sup>1, #</sup>, 藤澤 真\*<sup>1</sup>, 細見 健二\*<sup>1</sup>, 森下 祐樹\*<sup>2</sup>, 高田 千恵\*<sup>1</sup>

(2023年3月29日受付)

(2023年5月29日採択)

## Development of a Portable β-ray Dust Monitor for Highly-concentrated Airborne Contaminants

Naoki SAGAWA,\*<sup>1, #</sup> Makoto FUJISAWA,\*<sup>1</sup> Kenji HOSOMI,\*<sup>1</sup> Yuki MORISHITA\*<sup>2</sup> and Chie TAKADA\*<sup>1</sup>

Measurements of radioactivity concentrations of airborne dust are important because they are used to protect workers from intakes and to assess internal exposure doses. Therefore, we developed a portable β-ray dust monitor by using an ultra-thin plastic scintillator, which is designed for continuous monitoring of highly-concentrated airborne contaminants ( $> 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>, equivalent to 30 times larger than the derived air concentration of <sup>90</sup>Sr) such as a decommissioning work in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. From the performance test results, it is evaluated that the developed portable β-ray dust monitor is functional in continuous monitoring with an airborne concentration of 1 Bq/cm<sup>3</sup>.

**KEY WORDS:** portable dust monitor, β-ray detector, plastic scintillator, high counting rates.

## I 緒 論

放射線作業において、内部取り込みの防護対策（呼吸保護具の選定）や内部被ばく線量の評価を行うためには、作業環境中の空气中放射性物質濃度の測定が重要となる。このうちダスト（粉じん）状の放射性物質は一般に、ダストモニタと呼ばれる専用の測定装置内に空気を吸引し、専用のろ紙（以下「空気ろ紙」という。）上に捕集されたダストの放射能を測定することにより監視される。特に、作業者に呼吸保護具の着用が必要となるような空气中放射性物質濃度の高い作業環境下（以下「高

濃度環境下」という。）においては、十分な精度と即応性をもつダストモニタでの測定によりその濃度の経時変化を連続的に監視することが作業の安全確保のため非常に重要となる。

東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）の廃炉作業においては、作業の進捗により作業環境が刻々と変化する高濃度環境下となることが想定される。市販されている半導体検出器を用いた可搬形β線ダストモニタの測定上限は $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>程度<sup>1)</sup>であるため、1Fで想定される高濃度環境下への適用には限界があると考えられる。 $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>の測定上限は空气中に含まれる放射性物質が全て<sup>90</sup>Sr（1Fの廃炉作業で想定される放射性同位体の中で放射能割合が大きく、β・γ線放出核種の中で実効線量への寄与が大きい重要な核種<sup>2)</sup>）であると仮定すると、<sup>90</sup>Srの空气中濃度限度（ $3 \times 10^{-4}$  Bq/cm<sup>3</sup>）の約30倍相当まで測定可能であることを意味するが、今後1Fでの廃炉作業が本格化するにあたって、 $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>を超える高濃度環境下が増加すると想定される。また、市販

\*<sup>1</sup> (国研) 日本原子力研究開発機構放射線管理部: 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33 (〒319-1194)

Radiation Protection Department, Japan Atomic Energy Agency; 4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

\*<sup>2</sup> (国研) 日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター: 茨城県那珂郡東海村白方 2-4 (〒319-1195)

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Japan Atomic Energy Agency; 2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan.

# Corresponding author; E-mail: sagawa.naoki@jaea.go.jp

の半導体検出器を用いた可搬形 $\beta$ 線ダストモニタを高濃度環境下で使用した場合、短い捕集時間で、空気ろ紙上に測定上限相当の放射能が積算され、空気ろ紙交換に伴う欠測が頻繁に発生することが予想される。そのため、 $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>を超える高濃度環境下の任意の作業場所において十分な精度と即応性をもつ連続モニタリングが可能なる可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの開発が必要である。

本研究では1F作業環境中の $\beta$ 線放出核種に主眼を置き、超薄膜プラスチックシンチレータを用いることで、市販されている半導体検出器を用いた可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの測定上限より100倍高い高濃度環境下(1 Bq/cm<sup>3</sup>)での連続モニタリングを目標とした高濃度用可搬形 $\beta$ 線ダストモニタを開発した。その試作機について性能評価を実施した結果を報告する。

## II 高濃度用可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの試作機の設計・製作

目標とする1 Bq/cm<sup>3</sup>の高濃度環境下での連続モニタリングを可能とするためには、高計数率に対応可能で数え落としの少ない $\beta$ 線検出器を用いる必要がある。また、 $\beta$ 線検出器に入射する放射線の数制限する方法や $\beta$ 線検出器と放射線の反応数を減らす方法により、 $\beta$ 線検出器の効率を適度に抑制することも考慮する必要がある。

まず、高計数率下での数え落としに対する対策として応答速度の速い(放射線入力に対する応答パルスの減衰時間が短い) $\beta$ 線検出器をいくつか選択した。 $\beta$ 線検出器のタイプによる応答速度の違いをTable 1に示す。応答パルスの減衰時間がGM計数管などのガス検出器や半導体検出器では10 ns ~ 100  $\mu$ sのオーダーに対し、有機シンチレータは一般的に2 ~ 3 nsと非常に短い<sup>3)</sup>。有

機シンチレータの中でも汎用プラスチックシンチレータは、応答パルスの減衰時間が2.4 nsと非常に短く高計数率下での測定に適している。一般的な $\beta$ 線検出用として用いられるプラスチックシンチレータは100  $\mu$ m ~ 1 mm程度の厚さであるが、先行研究<sup>4)</sup>から、より薄いプラスチックシンチレータを使用し、適切な波高弁別レベルで動作させることによって、検知されるイベント数を制御し、高濃度環境下においてもプラスチックシンチレータの計数率を数え落としが問題となるレベル以下に抑えることが可能になるとともに $\gamma$ 線の高線量場においても影響を低減できると考えた。

次に、 $\beta$ 線検出器の計数率を抑制する対策を検討した。 $\beta$ 線検出器と反応する放射線の数抑制する方法としては、放射線をコリメートするか $\beta$ 線検出器の入射部面積を小さくし放射線の入射数を減らす方法が考えられるが、空気ろ紙上に捕集されたダストの放射能に偏りがあった場合に正しい測定が出来ない可能性がある。そのため、コリメータ等を使わずに空気ろ紙全体の放射能を測定できることが望ましい。薄いプラスチックシンチレータの場合、面積を広げるとむらなどが生じ製造の歩留まりが下がる可能性が考えられたが、先行研究<sup>4)</sup>から、ろ紙全体をカバーする大きさの製作は十分に可能との見通しを得た。

上記設計コンセプトに基づき50 mm × 50 mm、厚さ8, 22, 31, 及び55  $\mu$ mの4種類の超薄膜プラスチックシンチレータ(フジトク(株)製)を光電子増倍管と組み合わせ可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの $\beta$ 線検出器部分を試作した。試作した可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの $\beta$ 線検出器部分の構造及び測定系概要図をFig. 1に、写真をFig. 2に示す。空気ろ紙に捕集したダストを直接測定することによ

Table 1 Pulse decay time of  $\beta$ -ray detectors.

	Gas detector	Organic scintillation Counter	Semiconductor detector
Pulse decay time	50 ~ 100 $\mu$ s	2 ~ 3 ns	10 ~ 100 ns
For high-count-rate applications	×	◎	△

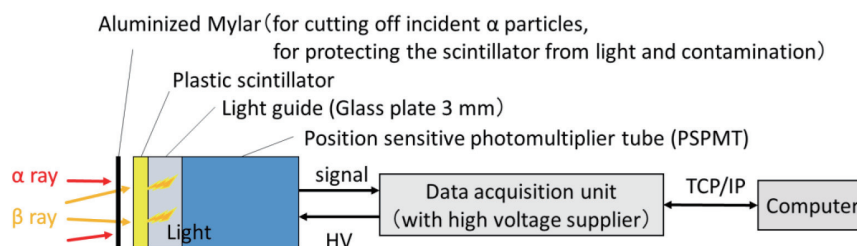


Fig. 1 Schematic of  $\beta$ -ray detection components of the prototype dust monitor.

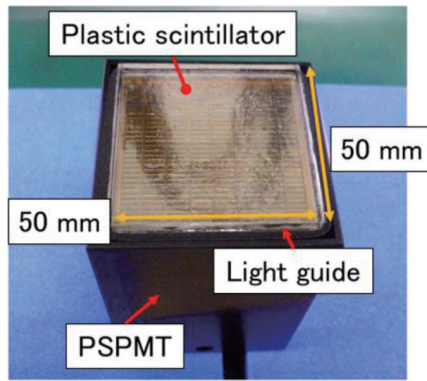


Fig. 2 The  $\beta$ -ray detector part (Ultra-thin plastic scintillator and PSPMT).

るプラスチックシンチレータの汚染防止、外部入射光による光電子増倍管の誤計数防止のための遮光、 $\beta$ 放射能測定妨害となる $\alpha$ 線の入射を抑制する目的として、約 $3.5 \text{ mg/cm}^2$ のアルミナイズドマイラ膜を $\beta$ 線検出器の入射面に配置した。なお、ここで使用する光電子増倍管(浜松ホトニクス(株)製 H12700A)は位置検出型光電子増倍管(PSPMT)と呼ばれる種類のもので、空気ろ紙上の放射能の位置分布(イメージング情報)を取得する機能を将来的に追加することを想定して選定した。ダスト捕集用の空気ろ紙については、入手性の良さ及び交換作業の手軽さを考慮して、筆者の所属する核燃料サイクル工学研究所の放射線管理で使用実績のある市販の空気ろ紙(ADVANTEC製 HE40-T丸型 $\phi 50$ )を採用した。

### III 性能評価

#### 1. プラスチックシンチレータの最適厚の評価

II章で適用した厚さ8, 22, 31及び55 $\mu\text{m}$ の4種類の超薄膜プラスチックシンチレータの中から、目標とする $1 \text{ Bq/cm}^3$ の空气中放射性物質濃度を連続モニタリングするために最適なプラスチックシンチレータの厚さを決定する必要がある。

JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>に基づき、試験には $^{36}\text{Cl}$ の標準面線源を使用し、厚さ8, 22, 31及び55 $\mu\text{m}$ それぞれのプラスチックシンチレータの機器効率を求めた。

厚さ8, 22, 31及び55 $\mu\text{m}$ それぞれの機器効率をTable 2に示す。目標とする $1 \text{ Bq/cm}^3$ の高濃度環境下で数え落としが問題となるレベル以下に抑えること及び作業環境中の $\gamma$ 線線量率が高い場合においても影響を低く抑えることができることを踏まえ、本研究では、最も薄い(機器効率が低い)8 $\mu\text{m}$ が適していると考えた。以

Table 2 Efficiency of the prototype  $\beta$ -ray dust monitor with different plastic scintillator thicknesses.

Scintillator thickness ( $\mu\text{m}$ )	Efficiency for $\beta$ rays (%) <sup>*1</sup>
8	1.16
22	14.5
31	16.1
55	25.7

\*1  $^{36}\text{Cl}$   $\beta$  source

降の試験は、厚さ8 $\mu\text{m}$ のプラスチックシンチレータを用いた可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの試作機に対して実施した。

#### 2. 計数率特性

JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>では、直線性は相対基準誤差がデジタル式の場合 $\pm (10 + \text{不確かさ})\%$ と規定していることから、試作した可搬形 $\beta$ 線ダストモニタの $\beta$ 線検出器の高計数率に対する直線性を確認した。

標準面線源( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ )を用いて約 $8 \times 10^3 \text{ cps}$ (放射能に換算すると約1 MBq)まで試験を実施できたが、さらに高計数率を実現するため、ランダムパルス発生器(ランダムな時間間隔でLEDを発光させ、模擬的な放射線入力信号を発生させる装置)を用いて標準面線源で再現できない $8 \times 10^5 \text{ cps}$ の高計数率(放射能に換算すると約100 MBq)を模擬した。Fig. 3に計数率特性試験の方法を示す。

試験の結果、Fig. 4に示す通り、本 $\beta$ 線検出器は $5 \times 10^5 \text{ cps}$ まで相対基準誤差が10%以内の直線性を有することが分かった。しかし、 $1 \times 10^5 \text{ cps}$ を超える領域においては、計数率に比例して光電子増倍管からのアナログ出力パルスのベースラインが低下する現象が見られた。この現象は、光電子増倍管からのアナログ出力パルスの波形にアンダーシュート部分があることが影響していると考えられる。ベースラインの低下は、LEDによる模擬入力試験のような光電子増倍管からのアナログ出力パルスの波高が常に一定値となる測定条件においては問題とならないが、 $\beta$ 線放出核種からの $\beta$ 線(連続エネルギースペクトル)のように光電子増倍管からのアナログ出力パルスの波高が変化する測定条件においては問題となる。Fig. 5に示すように、ベースラインの低下が起きると、波高の小さいパルスが後段回路にある計数計(カウンター)の閾値を超えられない事象が生じ、計数率が低下して定量性がなくなることが想定される。そのため、LEDによる模擬入力試験結果において $5 \times 10^5 \text{ cps}$



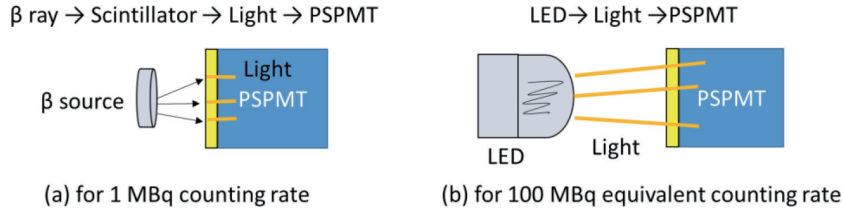


Fig. 3 Methods for the counting rate characteristic test.

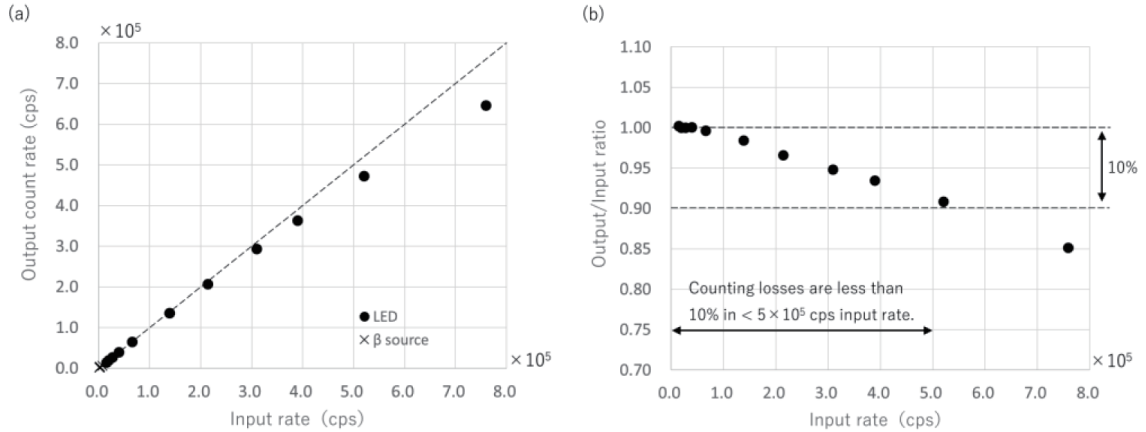


Fig. 4 Results of the counting rate characteristic test.

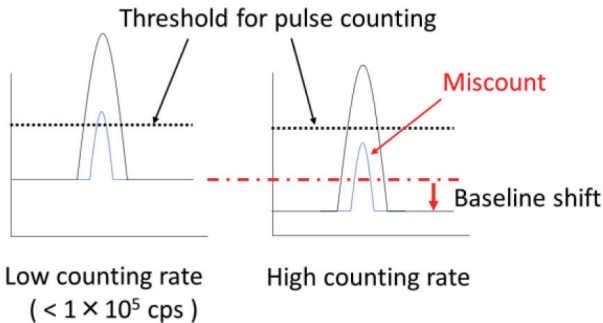


Fig. 5 Baseline shift of PSPMT's analog output pulses.

まで相対基準誤差が10%以内ではあったが、本β線検出器の計数上限は、ベースラインの低下が発生しない1×10<sup>5</sup> cpsまでと評価した。

3. β線エネルギー特性

シンチレータは放射線と反応して光を発するが、入射した放射線から付与されるエネルギーによって発光量が変化する。そのため、連続エネルギースペクトルを持つβ線を放出する核種を測定する場合、β線エネルギー特性（機器効率の変化割合）を把握する必要がある。

試作した可搬形β線ダストモニタのβ線検出器に対し、

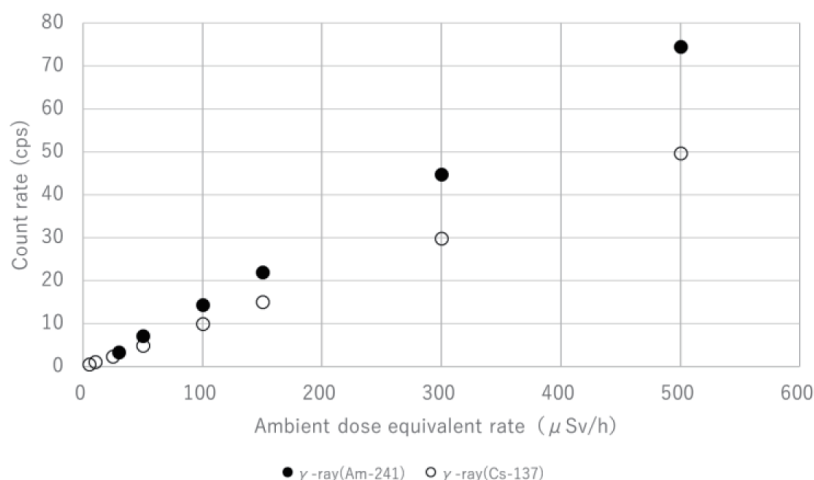
<sup>36</sup>Cl、<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y及びU<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の標準面線源を用いて、それぞれの機器効率を求めた。

Table 3に示す結果の通り、本β線検出器はβ線のエネルギーによって機器効率に変化し、エネルギー依存性が見られた。<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Yに対する機器効率が2.0%であり、<sup>36</sup>Clの機器効率よりも高いことから、<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Yの方が低い放射能で本β線検出器の計数上限1×10<sup>5</sup> cpsに達するが、次に示す考察から実用において問題はないと考える。

一般作業者に対する呼吸率が1.2 m<sup>3</sup>/h (20 L/min)<sup>6)</sup>であることをから、ダストサンプリングの流量として、通常は20 L/min以上が必要とされる。また、サンプリング期間中に空気ろ紙の目詰まり等により流量が経時的に低下するため、初期流量は高めに設定し、サンプリング終了時の流量が20 L/min以上となるように運用される。試作した可搬形β線ダストモニタについて、サンプリング期間中の平均流量を30 L/minと想定した場合、<sup>36</sup>Clに対して575分(約9.6時間)、<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Yに対して333分(約5.6時間)の連続モニタリングが可能であると試算される。これは、管理区域内での単位作業当たりの時間(午前、午後それぞれの作業時間として約4時間)と比較して、モニタリング時間としては十分な時間であると考えられる。

**Table 3**  $\beta$ -ray energy dependence of the prototype  $\beta$ -ray dust monitor.

Nuclide	Maximum $\beta$ -ray energy (MeV)	Efficiency (%)
$^{36}\text{Cl}$	0.71	1.2
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	2.28	2.0
Natural Uranium ( $^{234\text{m}}\text{Pa}$ )	2.27	1.9

**Fig. 6** Results of  $\gamma$ -ray irradiation test.

#### 4. 測定対象外の放射線による影響

1F 廃炉作業のように  $\alpha$  線、 $\beta$  線及び  $\gamma$  線が混在する作業環境で本可搬形  $\beta$  線ダストモニタの使用を想定した場合、JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>では、測定対象外の放射線による影響として、 $\beta$  線ダストモニタは“ $\alpha$  線の機器効率が  $\beta$  線の機器効率の 25% 以下”と規定しており、測定対象外の放射線の影響を評価する必要がある。試作した可搬形  $\beta$  線ダストモニタの  $\beta$  線検出器に対し、空気ろ紙上からの  $\alpha$  線に対する機器効率を求めた。

JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>に基づき、試験には  $^{241}\text{Am}$  の標準面線源を使用し、 $\alpha$  線の機器効率を求めた。

標準面線源 ( $^{241}\text{Am}$ ) の  $\alpha$  線に対する厚さ  $8\ \mu\text{m}$  のプラスチックシンチレータの機器効率は 0.04% であった。これは  $\beta$  線の機器効率 ( $^{36}\text{Cl}$  の 1.2%) に対し約 3.3% であり、JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>で規定される  $\alpha$  線の機器効率が  $\beta$  線の機器効率の 25% 以下を十分に満足していた。

その他、 $\gamma$  線の影響を評価するため、筆者の所属する核燃料サイクル工学研究所の計測機器校正施設で所有する照射装置を用い、 $^{241}\text{Am}$  (約 60 keV) 及び  $^{137}\text{Cs}$  (約 662 keV) の  $\gamma$  線照射試験を実施した。その結果、想定

している  $1\ \text{Bq}/\text{cm}^3$  の高濃度環境下における計数率 (最大  $1 \times 10^5$  cps) に対し十分に低い値であった。薄いプラスチックシンチレータを採用することで  $\gamma$  線感度が下がるため、厚さ  $8\ \mu\text{m}$  のプラスチックシンチレータは 1F 廃炉作業環境下において有効であると考えられる。照射試験結果を Fig. 6 に示す。

#### IV 結果のまとめ・考察

本研究では、1F 廃炉作業で想定される高濃度環境下 ( $1\ \text{Bq}/\text{cm}^3$ ) での連続モニタリングを目標とした高濃度用可搬形  $\beta$  線ダストモニタを開発し、試作機の性能評価を実施した。

厚さ  $8\ \mu\text{m}$  の超薄膜プラスチックシンチレータを適用することで、目標とした空气中放射性物質濃度  $1\ \text{Bq}/\text{cm}^3$  での連続モニタリング性能は、 $^{36}\text{Cl}$  に対して 575 分 (約 9.6 時間)、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  に対して 333 分 (約 5.6 時間) まで空気ろ紙交換を行わずに連続して実施可能になると評価した。また、厚さ  $8\ \mu\text{m}$  のプラスチックシンチレータは、空気ろ紙上の  $^{36}\text{Cl}$  の  $\beta$  線に対する機器効率が 1.2%、 $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線に対する機器効率が 0.04% であり、JIS Z 4316 (2013) 放射性ダストモニタ<sup>5)</sup>に規定される“ $\alpha$  線の機器効率が  $\beta$  線の機器効率の 25% 以下”を満足していた。 $\gamma$  線に対する測定への影響は、高濃度環境下にお

いて考慮する必要がない程度であった。

本研究で開発した高濃度用可搬形 $\beta$ 線ダストモニタは、今後、1Fで予定される高汚染のデブリ取り出し作業だけでなく、原子力施設の事故時において、通常の放出管理に必要なダイナミックレンジを大きく上回る場合の排気中放射性物質濃度の測定などにも適用できると考える。引き続き、PSPMTの放射線の入射位置情報の評価やさらにプラスチックシンチレータを薄くした場合の評価などを実施していく。

### 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、ご指導、ご協力いただいた東京電力ホールディングス（株）の方々から感謝申し上げます。

### 利益相反の開示

投稿の手引きの付録Dに示した利益相反に関する基準に基づいて、開示すべき利益相反状態はない。

### 参 考 文 献

- 1) Ministry of Economy, Trade and Industry (in Japanese). Available at: <https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2019/08/3-3-2.pdf>, Accessed 11 May 2023.

- 2) K. NISHIHARA, H. IWAMOTO and K. SUYAMA; Estimation of Fuel Compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant, JAEA-Data/Code 2012-018.
- 3) G. F. KNOLL; Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 2010.
- 4) Y. MORISHITA, K. HOSHI and T. TORII; Evaluation of an ultra-thin plastic scintillator to detect alpha and beta particle contamination, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 966 (2020) 163795.
- 5) Radioactive aerosol monitors, JIS Z 4316 (2013), Japanese Standards Association (in Japanese).
- 6) ICRP; "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection", ICRP Publication 66, Annals of the ICRP, Vol. 24, no. 1-3, 1994.

---

佐川 直貴（さがわ なおき）



2005年（国研）日本原子力研究開発機構へ入社。約9年間MOX（プルトニウム・ウラン混合酸化物）燃料取扱施設の放射線管理業務を経て、現在、放射線管理用機器の保守校正を担当。

E-mail: [sagawa.naoki@jaea.go.jp](mailto:sagawa.naoki@jaea.go.jp)

## レポート

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討WG」活動報告  
—第1分科会 エックス線利用上の安全規制と現場管理—五十嵐 悠<sup>\*1,2,#</sup>, 榎本 敦<sup>\*1,3</sup>, 小嶋 光明<sup>\*1,4</sup>, 小田 啓二<sup>\*1,5</sup>,  
高橋 賢臣<sup>\*1,6</sup>, 飯本 武志<sup>\*1,7</sup>

(2023年5月25日受付)

(2023年8月14日採択)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures  
—Subcommittee 1: Regulations and Management for Safety Use of X-rays—Yu IGARASHI,<sup>\*1,2,#</sup> Atsushi ENOMOTO,<sup>\*1,3</sup> Mitsuki OJIMA,<sup>\*1,4</sup> Keiji ODA,<sup>\*1,5</sup>  
Masaomi TAKAHASHI<sup>\*1,6</sup> and Takeshi IIMOTO<sup>\*1,7</sup>

Subcommittee 1 of the JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures has discussed issues based on field-specific perspectives from cases of X-ray accidents and troubles and their backgrounds, mainly positioned as proposals and recommendations to the Expert Group for solving the problems. As a result, it was agreed that it is extremely important to improve education and training, including the development of a safety culture, whether in the field of industry, research or medicine. Stakeholders closely related to X-ray generators are encouraged to refer this report to promote the safety level of environments for the use of the equipment. Experts should continue to develop the mechanisms of academic societies and strengthen their cooperation activities with other organizations and institutions to ensure that the stable, appropriate and effective use of X-rays can continue on the basis of an enhanced safety environment.

**KEY WORDS:** エックス線被ばく事故, エックス線利用, 安全規制, 放射線管理, エックス線作業主任者, 教育訓練, 電離則.

## I 緒 言

## 1. WG 設立趣旨, 体制及び活動方針

去る 2021 年 5 月 29 日に日本製鉄 (株) (兵庫) で発生したエックス線被ばく事故を受け, (一社) 日本保健物理学会は, 「被ばく線量評価, 放射線防護, 放射線安

\*1 (一社) 日本保健物理学会エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ第1分科会

Subcommittee 1, JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures.

\*2 (国研) 日本原子力研究開発機構大洗研究所放射線管理部; 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 (〒 311-1393)

Radiation Protection Department, Oarai Research and Development Institute, Japan Atomic Energy Agency; 4002 Narita-cho, Oaraimachi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan.

\*3 東京大学大学院医学系研究科放射線分子医学部門; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-0033)

Laboratory of Molecular Radiology, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo; 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan.

\*4 大分県立看護科学大学; 大分県大分市廻栖野 2944-9 (〒 870-

1201)

Oita University of Nursing and Health Sciences; 2944-9 Megusuno, Oita-shi, Oita 870-1201, Japan.

\*5 (一財) 電子科学研究所; 大阪府大阪市中央区北久宝寺町 2-3-6 (〒 541-0057)

Electron Science Institute; 2-3-6 Kitakyuhoji-machi, Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 541-0057, Japan.

\*6 大阪大学安全衛生管理部; 大阪府吹田市山田丘 1-1 (〒 565-0871)

Department for the Administration of Safety and Hygiene, Osaka University; 1-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan.

\*7 東京大学環境安全本部; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒 113-8654)  
The University of Tokyo; 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan.

# Corresponding author; E-mail: igarashi.yu95@jaea.go.jp

全を専門分野とする学会として、(1) 事故の背景、経緯とその対応に関する関係各所の情報を収集し、専門家の観点からそれらを分析する。(2) 事故の分析に基づいて教訓を整理し、安全文化の醸成に資する学会としての見解を発信する。(3) 放射線防護の分野を専門としない方のために、事故の概要を理解いただくため情報を発信する。(4) 対象とする事故の内容に留まることなく、エックス線の利用に関する広い視野での管理上の問題点、課題を整理し、学会としての今後の対応方針を明確にすることを目的とした、「エックス線被ばく事故検討WG」(以下、本WG)を設置し、議論を進めてきた。

#### WGメンバー

- ◎委員長, ○副委員長, ※幹事, ☆幹事補佐
- ◎飯本武志 東京大学
- 古渡意彦 (国研) 量子科学技術研究開発機構
- ※山口一郎 国立保健医療科学院
- ☆五十嵐悠 (国研) 日本原子力研究開発機構 (第10回会合より)
- 榎本 敦 東京大学
- 小嶋光明 大分県立看護科学大学
- 小田啓二 (一財) 電子科学研究所
- 川島恒憲 東芝エネルギーシステムズ(株)
- 中村美和 (公社) 日本アイソトープ協会
- 浜田信行 (一財) 電力中央研究所
- 福士政広 つくば国際大学
- 笠井 篤 元日本原子力研究所
- 辻本 忠 (特非) 安全安心科学アカデミー
- 橋本 周 (国研) 日本原子力研究開発機構 (放射線防護標準化委員長)
- 高橋賢臣 大阪大学 (放射線安全文化についての意識と実践に関する検討委員長)
- 秋吉優史 大阪公立大学 ((一社) 日本放射線安全管理学会推薦)
- 阪間 稔 徳島大学 ((一社) 日本放射線安全管理学会推薦)

2022年7月には本WGにおけるこれまでの検討内容をまとめ、「経過報告書」<sup>1)</sup>として公開した。経過報告書にて示されたいくつかの課題について、さらに議論を深めるため、本WGに、①エックス線利用上の規制と現場管理(第1分科会)、②エックス線被ばく線量の測定と評価(第2分科会)、③事故に関する情報の発信と教訓の水平展開(第3分科会)、の三つの分科会を設け、

より具体的な検討を進めた。

## 2. 第1分科会の体制およびまとめ方針

第1分科会では、(1) 分野や装置の特徴別に整理された代表的なエックス線事故・トラブル例の紹介、(2) 共通項目と分野特有の各視点での論点整理、(3) 課題解決に向けた日本保健物理学会を含む専門家集団への提案・提言、について議論した。

本稿では第1分科会における上記の成果についてまとめ、紹介する。

### 第1分科会メンバー・検討担当分野

五十嵐悠(研究所・総括補佐)、榎本 敦(大学医系)、小嶋光明(医療)、小田啓二(産業)、高橋賢臣(大学理工系)、飯本武志(総括)

## II 特徴的な想定外のエックス線被ばくの事例とその背景

### 1. 産業用エックス線装置

国内外のエックス線装置の近年の事故例は、厚生労働省「職場のあんぜんサイト」<sup>2)</sup>や2021年度に(一社)日本放射線安全管理学会で行われたInternational Nuclear and Radiological Event Scale (INES) 報告書等の海外事例の調査レポート等<sup>3)</sup>にまとめられている。それらの情報を整理すると第1表のようになる。

意図的に安全機能を解除しながら作業した例を除くと、大半は、「エックス線は発生していない」や「インターロック等の安全装置が働いている」と思い込んだ状態での作業中の被ばくであった。また、作業の種類の観点では、通常作業での事故は少なく、装置の「検査」や「事前確認」、及び「測定値に異常が見つかった時の操作」のタイミングであることがわかる。作業中に不具合(データの異常値など)が発生した際、技術者の気質として、簡単な調整操作で確認できる(あるいは直せる)と思いがちである。上述の事故例の原因分析と対策の詳細は後の節に譲るが、このような「技術者の過信」がトラブルの背景のひとつとして挙げることができる。また、各労基署からサーベイメータの携行が勧奨されているにもかかわらず、ガンマ線源を使用する事業場と比べると、その履行率は低いようであり、エックス線作業に伴う被ばくりスクへの配慮の低さ、つまり安全意識の低さの現れのひとつとして理解できる。

また、エックス線発生装置としては扱われないが、電子顕微鏡など、エックス線が二次的に発生する装置につ

第1表 国内外の엑스線装置の近年の事故例<sup>2,3)</sup>

国	状況	備考
日本	出荷前の回折装置の検査（漏洩線の測定）中。安全装置を解除した状態でシャッターを点検した。基準を超える漏洩線を認めたため、電源を切らずに照射経路に手を入れてしまった。	数 10 Gy（局所）
日本	透過試験装置による IC チップの検査作業中、能率を上げるため、インターロックスイッチを押さえながら内部で検査体を移動させた。	
ドイツ	坪量測定装置（厚さ計/密度計）のテスト中。防護用キャビネットの扉が開いた状態で作業を行ったが、ドア連動スイッチの不具合のため엑스線が発生していた。	線量計未装着 INES Rating 2
ドイツ	厚さ計のビームコリメータの調整作業中。ビーム内に手を入れてしまった。	リングバッジ、 個人線量計装着 INES Rating 2
スウェーデン	ポータブル装置を用いた配管検査作業中。既に엑스線が発生していたことを認識せずに、装置パラメータの調整を行った。	線量計未装着 INES Rating 2
日本	蛍光엑스線膜厚計の点検・校正中。異常値を認めたため、電源が入った状態で照射室内に入った。照射窓シャッターを閉めたと思い込んで付着物を除去した。	積算型線量計装着 INES Rating 3
フランス	厚さ計の엑스線発生装置の電源をオンにしたままメンテナンス作業を行った。	INES Rating 2

いては、その漏洩엑스線による被ばくについての実態は現時点では系統的には明らかになってはいない。

## 2. 研究用엑스線装置

大学などの研究機関においては、構造解析・試料分析・撮影・照射など目的に応じて様々なタイプの엑스線装置が存在している。工学系や理学系などでは結晶構造の分析に用いる엑스線回折装置や元素分析に利用する蛍光엑스線装置などがある<sup>4)</sup>。また近年では、屋外での撮影に適したポータブル엑스線カメラや元素分析に威力を発するハンドヘルド型蛍光엑스線装置なども活用されている。一方、医歯薬学系などでは엑스線 CT (Computed Tomography) 装置・엑스線透視撮影装置などの診断装置や治療を目的としたリニアック装置などの照射装置が大半を占める<sup>5-7)</sup>。

大学などの研究機関における엑스線被ばく事故の多くは、装置の欠陥や故障に起因するものよりもヒューマンエラーによるものが多い。ヒューマンエラーには、記憶・認知・判断・行動などのエラーに由来する「うっかり型」と安全よりも作業効率や成果を優先にして規則や手順から逸脱する「あえて型」などがある<sup>2)</sup>。前者には、作業者が試料の方に気を取られて엑스線装置の動作・状態確認を怠り、엑스線が発生していることやシャッターが開いていることを認識していないケースなどが含まれる。例えば엑스線回折装置においてサンプル交換時に管理区域内部に手を入れて指を被ばくした、あるいは試料撮影で軸合わせをする際に利用線錐の軸方向を覗き込んで眼を被ばくした例などがある<sup>8)</sup>。また警告灯、監視モニターや警告音などヒューマンエラーを抑止する機能が正常であっても、設計や設定が不適切な

ためそれらの機能が活かされていないケースもある。例えば小型엑스線カメラを置いたクリーンブースの最上部に警告灯を設置してしまったためにブースの周囲の第三者からは警告灯の点灯が確認できるものの、ブース内で作業する作業員本人からは엑스線の発生を確認できない不適切な設計の例や、엑스線 CT 室内で撮影準備を行っている作業員がいるにもかかわらず、別室の操作室にある監視モニターが操作担当者からは見えづらい位置に設置されていたことにより、操作担当者がモニター上に映る作業員の存在に気付かず誤って装置を稼働させてしまった結果、作業員が被ばくした例などがある。後者の「あえて型」の事例は前者と比較すると少数ではあるが、非定常的でチャレンジングな条件下で엑스線を発生させる際などに起こりうる。例えば、엑스線カメラによる撮影時に鮮明な画像を取得するために線量を定常時よりも高く設定したところ、線量計の警告音が発生したケースもある。研究機関ではしばしば엑스線取扱い経験の浅い学生が含まれることや共同研究・任期制など人の流動性が高いことも、安全文化の醸成・定着がしづらい一因であろう。

## 3. 医療用엑스線装置

現代医学では放射線の利用は必要不可欠なものである。特に엑스線 CT 装置は、体内のがん病変等を早期発見する役割を果たす手段として広く認識されている。また、日本では엑스線 CT 装置保有台数が世界一となり、医療被ばくへの関心が高まっている。

2001 年から 2004 年におけるわが国での放射線診療に関連した医療事故の概要を第2表に示す<sup>9)</sup>。患者の被ばく事故事例だけに着目すると、その要因は、装置のトラ

第2表 放射線診療に関連した国内の医療事故<sup>9)</sup>

発生年	事故内容
2001	ウェッジファクターの入力ミス, 過剰照射
2002	ウェッジファクターの入力ミス, 過剰照射
2003	治療担当医師と技師の線量評価の相違, 過剰照射
2004	照射野係数の入力ミス, 過小照射
2004	シャドウトレイがないのにあるとして計算, 過剰照射
2004	補正係数をルーチンの線量測定に使用, 過小照射
2004	ブーストとして 10 Gy/4 回追加予定が 10 Gy を 2 回追加した
2004	ウェッジファクターの入力ミス, 過剰照射

(注) 全てエックス線装置に関連した事故

第3表 医療関係の職種別年実効線量の分布<sup>10)</sup>

	線量範囲 (mSv)					年平均 (mSv)		
	0	~5	5~20	20~50	50~	実効線量	水晶体 等価線量	皮膚 等価線量
医師	68,601 人	16,927 人	873 人	17 人	0	0.26	0.84	0.96
診療放射線技師	17,650 人	17,739 人	532 人	9 人	0	0.62	1.26	1.44
看護師	50,760 人	10,324 人	53 人	0	0	0.1	0.49	0.53
その他	17,856 人	2,360 人	37 人	0	0	0.08	0.23	0.34

(注) (株) 千代田テクノルのデータに基づく

ブルによるものではなく、照射線量の誤認や診療放射線技師と放射線科医のコミュニケーションエラーなどのヒューマンエラーによるものであることがわかった。

一方、事故・トラブルではないが、参考までに医療従事者の職業被ばくについて令和3年(2021年)度の集計結果を第3表に示す<sup>10)</sup>。これによれば、医療従事者の職種別の年平均実効線量と水晶体や皮膚の等価線量は、診療放射線技師が最も高くなっていることがわかった。また、放射線診療に携わる医師と診療放射線技師については実効線量が20 mSvを超える者が数名いる。これはIVR(Interventional Radiology)やエックス線CT撮影時に放射線の発生源付近で患者の介助などを行うためであると考えられる。事故・トラブルとは別の観点ではあるが、関係者の被ばく線量が高めであることを念頭に置き、たとえばリアルタイムで個人モニタリングを行い、また必要に応じて業務内容や作業手順を見直すなど、過剰な被ばくを合理的に抑えるための防護の最適化にも配慮が必要であろう。

### III エックス線の被ばく事故や装置の不適切な管理に関連の深い現状

#### 1. 施設や装置の管理者に関する事項

エックス線装置の管理について「被ばく」の観点から大別すると、管理区域が外に広がる装置(以下、非密閉型装置)と、工業用・研究用などで多く使用される被ばくしないことを前提とした装置(以下、密閉型装置)に

区分することができる。また、医療用の装置を除く非密閉型装置では、国家資格であるエックス線作業主任者の免許取得者を選任して管理させることが法的義務であり、使用する労働者が受ける被ばくの低減や、定期的な作業環境測定が業務として行われている。密閉型装置については免許取得者による管理は法的には要求されていない。施設によっては装置管理者などの役職を作り密閉装置の定期的な漏洩線量測定やインターロックの稼働状況などの自主的な点検を行うこともあるが、基本的には施設側の判断に委ねられており、法令に基づくものではないため適切な知識や技術によって管理がなされているかについては不明瞭である。

昨今の最新型の密閉型装置では、装置メーカーらのたゆまぬ努力により安全性が向上し、基本的な使用方法では被ばくしない設計になっている。例えば市販のエックス線装置には、インターロック安全装置(装置扉やシャッターなどのガードが閉じていないとエックス線装置の高圧電源が入らない)やエックス線の発生時に点灯する自動警報装置(装置使用上の被ばく低減措置として、使用状態を関係者に周知させるための「警報装置」(労働安全衛生法(以降、労安法)電離放射線障害防止規則(以降、電離則)第17条))などが備え付けられている。それにより、かつては高い被ばくリスクを伴う試料交換やビームの位置調整など、身体の一部をエックス線発生領域に入れてしまうトラブルも、完全ではないがなくなってきており、被ばく防止について重要視する必要性その

ものが低減してきている。しかしながら一部の古いエックス線装置や自作の装置には、エックス線の照射下でインターロックを解除できるものや安全装置の装備そのものがないものがあり（試料の交換やビームの位置調整が格段に楽に、短時間でできる利便性は否定できない）、大学等の研究室ではいまだ現役として使用されている実態がある。これらの古い装置を実際に使用する際に、長年使用を続けてきたいわゆる熟練の管理者が指導を適切に行い、ユーザーに行き届いている場合には、被ばく等のリスクは低いと考えられるかもしれない。しかし、その熟練の管理者が定年退職や転職・転籍などによって管理の現場を離れ、引き継いだ管理者に対して安全対策に係る情報と技術の伝達が適切になされていない場合などに不具合が発生する可能性が高まる。特に、最新の安全性が高い密閉型装置の使用経験のみの管理者では、被ばくをするかもしれないという想定に至らない可能性もある。

## 2. 教育に関する事項

### (1) ユーザーに対する教育・訓練

エックス線装置を使用するユーザーへの教育としては、電離則の規定で「作業の方法」「装置の構造」「放射線の人体影響」「法令」を6時間で行うよう定められているものの、その対象は透過写真の撮影を業務とする場合にとどまっている（電離則第52条の5、昭和50年労働省告示第50号）。透過写真撮影でなくても自主的に安全衛生教育や装置などの使用に関する訓練をユーザーに課している施設も存在するが、その適切さ、有効性は定かではない。ここでは、一言で教育や訓練などと銘打っているものを、安全全般に関する項目について座学を中心に実施される教育と、使用する装置を目の前にして実施される訓練に区分して整理を進める。

エックス線装置を使用するユーザーに対しては二通りの教育・訓練が有効と考えられる。ひとつはユーザーを一堂に集合させて実施する、安全講習会型の教育などである。個々の機器に対応するような説明はなく、放射線の人体影響や緊急時の連絡先、一般的な事故・トラブルの事例や対応事項など、安全全般についての基本となる知識が伝えられる。また、被ばくのリスクを伴う非密閉型のユーザーに対しては、放射線の人体影響などについて詳細に説明する教育も必要であろう。もうひとつは、装置メーカーや装置管理者らによる実機を前にしての主に装置の使用方法に関する訓練である。ここでは、操作方法や試料交換方法、解析方法などの実験・研究または

解析業務などを行うために必要となる内容や、その装置についての特徴的な安全取扱い方法を学ぶことになる。これら二つの教育・訓練が確実に実施され、かつ機能すれば良いが、前述の通り具体的な法的要件がないことを背景に、教育・訓練が実施されるケースそのものが稀で、実施されていたとしてもその効果が不明である。特に密閉型の装置では、被ばく事故の想定が難しいことから、ユーザーにとっては事故・トラブルを自分事として認識することが難しいようである。また特に小規模な施設では、安全管理に従事する人材も十分ではないことが多く、教育・訓練の実施には至っていない可能性もある。

### (2) 装置管理者に対する教育

エックス線装置を管理する者への教育に関して、エックス線作業主任者においては労安法第19条の2で、能力向上のための教育が規定されているものの、実際にどのような教育が行われ、それが実効性を伴っているか、特に主任者ではない管理実務担当者などについての教育については、現状はよくわかっていない。例えば放射線の世界では、放射線施設管理を行う「放射線取扱主任者（以下、RI主任者）」のうち、選任された者には一定期間ごとの国が定める定期講習の受講が義務付けられている。その内容には「法に関する科目」「事故が発生した場合の対応」「安全管理に関する科目」が定められており、日常の安全管理に関する知識や技能に加えて、施設内での事故・トラブルに関する最新の知見や対応にも目が向けられている。この選任されたRI主任者への教育効果についてもその定量的な評価は現時点では見当たらないが、少なくとも放射性同位元素等規制法（以下、RI規制法）では管理者への教育が放射線を扱っていくうえで重要であると位置づけられている点は強調できる。

## 3. 安全規制の現状とその理解に関する事項

労安法では労働者が危険性や有害性が存在する作業を行う際に、危険や健康障害を防止するために必要な措置を講じるよう（法20条から25条）に事業者側に求めている。エックス線作業では、透過写真撮影業務に対して特別の教育が課されている。危険性や有害性がある業務を行う場合でも、法をはじめとした安全規制に定められている事項や、それが定められた経緯などをよく理解しており、さらにそれらを常に最新の情報に更新しておけば、事故災害に遭遇する可能性は十分に低減できると考えられている。しかしながら、II章で述べたように、事故・トラブルは安全規制に違反したことによって起こった事



例が必ずしも多いわけではなく、(結果的には違反になるのかもしれないが)「思い込み」や「記憶違い」そして「慣れ」などによる所謂「うっかり」に起因している事例が大半である<sup>2)</sup>。つまり、法令や安全規制等で求められている事柄を「うっかり」と忘却させずに意識し続けることのできる環境や組織文化の形成を目指すことになる。

また、エックス線のエネルギーが極度に低く、構造上、被ばくのリスクが全くない装置について、その届出に対する規制担当者の見解が分かれているケースや、規制担当者の中には密閉型装置を設置した建物の階下での漏洩線量の実測を事業者を求めるケースがあるなど、ステークホルダー間での法令の適用や現場管理のあり方に関する見解が一致していない状況も散見し、現場が混乱している場合があることも知られている。

さらには、エックス線機器と同様に様々な用途で使用頻度の高い電子顕微鏡機器では、電離則などの法令による縛りはないが、エネルギーが高い機器や古い機器などは副次的にエックス線が発生している機器も存在する。それら規制の範囲外に存在する機器などについても被ばく防止の観点からは、当然に、関係者は実態を認識しておくべきであろう。現存する法令だけにとらわれることなく、合理的な被ばく防止のための本質的な視点と対応が重要である。

#### 4. 安全文化に関する事項

エックス線を含む放射線の世界で「安全文化」という用語が使用されたのは、チョルノービリ原発事故の原因・対策をまとめた International Nuclear Safety Advisory Group レポート<sup>11)</sup>の中であり、ここでは「全ての事柄において安全を最優先させる」「組織と全構成員が共に安全に対して意識を持ち続ける」とされている。現在では様々な業界でも使用されるようになり、それを達成するための手段、例えば PDCA (Plan-Do-Check-Act) など多くの場面で実践されている。しかしながら、本質的な意味での安全文化が根付いていない業界、組織はいまだ多いであろう。例えば安全レベルの向上と維持を目的とした手法のひとつである PDCA は多くの企業・施設で活用、導入されているが、PDCA の手続きさえ実践しておけば安全になるのだという考えが基盤にある場合には、これは正に本末転倒である。PDCA は万能ではなく、別の手段が適切である場合もあり、重要な点は、個々人が現状を正しく認識して、自分のとる行動がどのように他事と連動するのか、どのような結末の可能性があるの

かなどを常に考え予測することにある。この構成員による個の経験を組織が適切に拾い上げ、ハード・ソフトの両面で安全を追求するシステムを構築、改善することを繰り返すことで、次第に安全文化が醸成された社会が形成されるものと推察する。

最近の安全文化醸成への動きとしては、事故・トラブルの情報はもちろんのこと、それらに至らなかったヒヤリハット情報を拾い上げ分析し、再発防止に役立てようという動き<sup>12)</sup>もある。これらを教材化し、それをを用いた教育・訓練の場で議論や意見交換などをすれば経験の共有につながり想像力が養えることになろう。前述した RI 規制法での「放射線取扱主任者定期講習」では事故・トラブルに関する対応科目で正にそれが実践されており、大変参考になる。

#### IV エックス線の安全利用を 安全管理の立場から支援するために

本章では本 WG 及び第 1 分科会でのこれまでの議論に基づき、エックス線利用の有効性をさらに多くの人々と共有すると共に、その安全な利用を促進、支援するための今後の検討ポイントを整理する。特に、専門家集団が念頭におくべきことを具体的にまとめ、(一社)日本保健物理学会としての検討方針や活動指針の具体案と位置付けて、整理する。

##### 1. エックス線の利用と安全管理に関する組織体制と責任の所在の明確化

エックス線装置の利用や管理の枠組みは、労安法や医療法等で規定されている。たとえば前者の労安法第 14 条では、エックス線作業主任者の職務は「労働者の指揮、その他の事項」とされ、現場作業員のリーダーとしての役割が規定されている。また、電離則第 47 条には「事業者は、・・・を行わせなければならない」とあり、管理者としての役割も明記されている<sup>13)</sup>。現場実態として、エックス線作業主任者に対してある意味、事業者に代わる実務管理のリーダーとしての役割が期待されているケースも多いようである。国家資格の課されるエックス線作業主任者には、エックス線に関するプロフェッショナルとして、その利用の理解や促進に資する環境安全の整備と維持についてのより強い権限が付与され、責任を伴うリーダーシップを担う役割が期待されることがあっても不思議ではない。労安法で規定されている他の作業主任者の役割とのバランス等も十分に考慮しつつも、たとえば、被ばく線量の評価や記録、緊急時の措置、特別

の教育、作業環境測定など、より専門性の高い安全管理上の実務とりまとめを、事業者に代わる役割としてルールの上で整備し、産官学民一体となって名実兼ね備えた安全管理と安全に関する取組みの推進責任者としての位置づけをしていくことも、今後は十分にありうる。

## 2. エックス線の安全な利用を推進し、適切な管理を実現するための教育・人材育成

電離則第52条の5では、ユーザーに対する特別の教育が「透過写真撮影の業務」に限って規定されている。本規則の制定当時に透過写真撮影での大きな被ばく事故が発生したこと<sup>13)</sup>がその背景にあるが、それ以外の装置利用についてのユーザー教育は、労安法第59条（具体的には労働安全衛生規則第35条）に規定されている一般的な安全衛生教育の読み方に任されているのが現状である。国際原子力機関（IAEA）のガイドラインでは管理区域内の業務につきすべてのユーザーに安全教育が求められ<sup>14)</sup>、たとえば米国でもそのような扱いになっている<sup>15)</sup>。IAEAの安全基準類を原則批准する姿勢をとるわが国としては、管理区域内あるいは周辺での業務を伴うすべてのユーザーに（法的な規定が必須であるかの議論は別に要するとして、少なくとも）実効的な安全教育が届く仕組みを早期に構築すべきと考える。その際には、教育をすべきユーザーの範囲、その内容と頻度の選定に関して、その安全上のリスクに基づく合理的な教育を目指すことはいうまでもない。大きな被ばくを伴った産業界での蛍光エックス線装置に関する事故の発生により、現行の特別教育の対象となっている「透過写真撮影の業務」以外の装置についても、そのリスクが小さくないケースがあることが改めて広く認知された。エックス線装置の場合には、他の電氣的や機械的な故障・異常のように、目視や音・熱などではユーザーが異変を感知できない事実を、改めて教育・訓練を通じて徹底すべきであろう。

教育はユーザーに留まることなく、エックス線作業主任者を含むエックス線装置やその利用者の安全管理に携わるすべての「管理者」に対しても重要である。たとえば、エックス線作業主任者に対しては、労安法第19条の2では、能力向上のための教育が規定されている。ただし、前項での論点で指摘した通り、この教育がすべての施設で実効的かつ確実に実施されているかについては疑問をもたざるを得ない現状から、エックス線作業主任者を除く、広義の「管理者」についてはなおさら、最低限の教育が行き届いているとは断言しにくい。前項で扱ったエックス線作業主任者（やその延長線上にある広

義の管理者）が社会や組織から期待されている役割を担うに相応しい教育機会が用意されることが望まれる。前出の通り、類似の資格としてRI規制法に基づくRI主任者があるが、彼らは規制当局への登録機関による時間数と科目が定められた定期的な法定教育の受講が義務づけられ、最新の法令や典型的な事故・トラブル例を学び直す機会をもっている。RI施設と比較して、極小規模の施設も多いエックス線施設の管理者に対して、このRI規制法に基づく管理者教育に関する国による支援の仕組みは大きな参考となるだろう。

エックス線装置のユーザー数や管理者数の観点では、医療分野はきわめて大きな関連業界である。近年の診療用放射線の防護の動向としては、管理者が確保すべき安全管理の体制の1つとして、医療法施行規則に診療用放射線に係る安全管理体制に関する規定が令和2年4月から施行された。同規則では、診療用放射線の利用に係る安全管理のための体制の確保に係る措置として、責任者を配置することや、診療用放射線の安全利用のための指針を策定すること、放射線診療に従事する者に対する診療用放射線の安全利用のための研修を行うことなどが規定されている。また、医学系、医療技術系、看護系大学等における学生への教育の中で、座学と現場実習を含む放射線（エックス線）管理学の教育を強化する動きを加速することも、安全レベルの情報には効果的と考える。直近には、医学教育モデル・コア・カリキュラム（令和4年度改訂版）が文部科学省から提示されており<sup>16)</sup>、「放射線の適切な利用、安全管理や被ばく低減の実行」等の項目が盛り込まれている。これらの動きは大変に心強く、業界をあげて協力、支援すべきであろう。

並行して、エックス線装置を使用する可能性のある医師や技師等に対する教育支援体制の強化も効果的と考える。ヒューマンファクターの観点から事故・トラブルを防止するためには、放射線診療を行う診療科の医師や、診療放射線技師、看護師等への放射線防護や管理に関する教育・訓練とともに安全手順の具体的な確認・見直し・周知をすることが必要である。例えば、1) 安全手順とチェックリストの作成を関係者（医師、技師、看護師など）全員により行い、見落としの防止や客観性を高める、2) 検査時は患者の確認や手順を複数人でチェックしながら行い、誤照射を防ぐ、3) 患者にも線量計を装着させ、被ばく線量を正確に把握すること等がその例である。また、2004年より認定が始まった放射線治療品質管理士の専従も望まれる。放射線治療品質管理士の主な役割は、放射線治療の質を向上させるためのマネジメント体制の

整備とPDCAサイクルの実施、機器故障や医療事故等発生時の対応と発生後のマネジメント体制の見直しなどであるため、放射線治療を安全かつ安心して実施することにつながると考えられる。

対象がユーザーであっても、管理者であっても、「うっかり型」の事故・トラブルを避けるための教育・訓練が鍵となろう。当初は緊張感を持ち安全に気を配りながら作業や管理に当たっていたが、何事も起こってこなかった状況に慣れることにより、安全対策よりも作業効率を優先し始める。そしてあるとき、低下した安全意識に偶々発生した、機器トラブルや情報伝達ミス、さらには思い込みなども重なり、事故・トラブルへと至るケースが知られている。その点が教育・訓練の強調点となろう。

### 3. エックス線装置の届出や点検等に関する法的位置づけの明確化

安全管理の観点から関連法令下で届出を要する機器についての、ステークホルダー（担当当局の異なる製造、販売、使用、規制等）間の共通理解が急務と考える。少なくとも、地域の労働基準監督署によって、届出の要否の判断が異なる状況は、地域をまたがるような大きな施設や組織にとっては困惑の元となるため、早期の問題解消が求められる。いくつかの施設では、自主的にその判断根拠を文書等で整備している例もあるので、その知見も参考になろう。学会や業界団体などで法令の解釈と適用に関する標準などを精査するのも有効だろう。

1メガ電子ボルト未満のエックス線装置は電離則の規定対象であるが、RI規制法の対象外になっている。RI規制法に基づくRI主任者の位置づけや、ユーザーや管理者への教育訓練の規定、予防規程の存在、学生への規制適用、等の観点で、電離則のみにかかるその領域のエックス線装置に対する規制の強度は結果的にかなり軽くなっている。グレーテッドアプローチ（等級別アプローチ）の観点を大切にしつつも、その領域の規制や管理について改めて見直すべき点がないかの丁寧な議論が必要である。

点検等に関しては、グレーテッドアプローチに基づく装置の点検のありかたについても、ステークホルダー間の共通理解が求められる。また、IAEAがガイドラインで作業規程の備え付けを求めており<sup>17)</sup>、たとえば米国でもそのような扱いになっている<sup>18)</sup>。国内事情に目を向けると、電離則の中に、加工施設等における作業規程（電離則第41条の11）、原子炉施設における作業規程（電離則第41条の12）、事故由来廃棄物等の処分の業務に

係る作業における作業規程（電離則第41条の13）が規定されており、エックス線に対して同様のものが必要となれば大いに参考になろう。

### 4. エックス線利用に伴う安全文化の醸成に関する支援の仕組みの構築

大きな被ばく事故にいたる可能性のある「あえて型」「うっかり型」の背景のみならず、昨今の装置の小型化や安全性能の向上もあり、エックス線利用の現場全体としての危機意識の低下につながっている可能性があるとの懸念が本WGの議論で指摘された。いま一度、ハイインリッヒの法則を念頭に置き、エックス線に関する事故・トラブルの事例を扱う、誰でも利用できる共同情報プラットフォームが整備されると良いだろう。厚生労働省の「職場の安全サイト」はこの目的に近いが、エックス線利用の観点では必ずしも現状のものは十分な内容にはなっていない。使用する機器の特性やトラブルシューティング・ヒヤリハット事例を多く集め、水平展開し、その背景や対応策を関係者が共有しておくことが事故・トラブルの予防に役立つであろう。また、現場レベルでは、マニュアルやガイドラインが整備されることもあろうが、ユーザーや管理者ひとりの判断による調整や修正を避け、熟練者やメーカーへの相談を経る手順も重要である。

本WGでは、リスクアセスメント（労安法第28条の2）やPDCAマネジメントシステム（RI規制法第38条の4）の導入の可能性も議論された。原子力施設や一部の化学物質の使用に関して、これらはすでに導入されたが、エックス線利用のどの部分がどのように馴染むかには、グレーテッドアプローチの観点でのさらなる議論を要する。

今後は、本稿で示した多くの論点につき、本WGを主催する（一社）日本保健物理学会や、分野に近い（一社）日本放射線安全管理学会等の学術団体の範囲に留まらず、エックス線装置の製造や販売に関連した業界や業界支援団体などのステークホルダーとも強く連携して、より具体的な情報を収集し、議論を深めていくことが望ましい。特に、第三者によるエックス線装置管理の指導・支援の枠組みの整備、不安全的状態（作業上のルールと実態の乖離）の解消方法、自主点検の際などでのハード面とソフト面の両方をチェックする仕組みの標準化、などの議論には、製造、販売のみならず、ユーザーとも強いパイプを有し、現場感覚に優れた各種支援団体には期

待が大きい。当 WG の約 1 年半にわたる活動の過程で、たとえば、厚生労働省からの通達を受けて（一社）日本非破壊検査工業会が教育コンテンツの策定及びその展開をするなど、業界を支援するサービスについて自主的に検討し、開発を進めている実態も明らかとなった。このような業界自らの動向は社会的にも高く評価されるべきで、産官学民の関係者がそれぞれの役割の視点で支援、連携協力して、安全のレベルが合理的に高められた環境で多種多様なエックス線装置が有効に活用されるよう、努力を継続すべきである。（一社）日本保健物理学会としては、今後も、理事会直下の臨時委員会や WG、放射線防護標準化委員会、企画委員会傘下の専門研究会などの仕組みを活用し、このような動きを強力にバックアップできるはずである。

## V 結 言

本分科会では、エックス線事故・トラブルの事例やその背景から分野別の視点に基づいた論点を整理し、課題解決のための方策を検討し、主に専門家集団への提案・提言をまとめた。

代表的なエックス線事故・トラブルの事例の紹介では、産業用、研究用、医療用の 3 分野に分けてその背景を整理し、また、被ばく事故や装置の不適切な管理に関連の深い現状として、「施設や装置の管理者に関する事項」「教育に関する事項」「安全規制の現状とその理解に関する事項」「安全文化に関する事項」について議論を深めた。その結果、分野の別なく、安全文化の醸成をも観点に含めた教育・訓練の強化がきわめて重要との見解で一致した。

第 III 章と第 IV 章には、本 WG または第 1 分科会での議論を通じて知り得たさまざまな課題やその解決に向けての方策の案がまとめられている。エックス線装置に関するステークホルダー（規制当局関係者、製造関係者、販売関係者、使用者、業界支援者など）に本稿を参考いただき、より良い装置利用のために、適切な環境の整備を推進していただきたい。また、特に（一社）日本保健物理学会のみならず、関連の分野に造詣の深い（一社）日本放射線安全管理学会を含む専門家集団は、本稿をさらなる考察のきっかけと位置づけ、より高められた安全環境の基盤の上に、安定的で適切かつ有効なエックス線の活用につき、関係者すべてが自信をもって継続できるよう、今後も学会等のもつ仕組みの利用やその他組織・機関との連携活動を強化していくべきである。

## 参 考 文 献

- 1) 日本保健物理学会；エックス線被ばく事故検討 WG 経過報告書。Available at: [http://www.jhps.or.jp/upimg/files/progress\\_report.pdf](http://www.jhps.or.jp/upimg/files/progress_report.pdf), Accessed 30 Apr 2023.
- 2) 厚生労働省；職場のあんぜんサイト。Available at: [https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen\\_pg/SAI\\_FND.aspx](https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/SAI_FND.aspx), Accessed 30 Apr 2023.
- 3) 角山雄一, 佐瀬卓也, 山口一郎, 保田浩志；海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集, 日本放射線安全管理学会誌, **20**, 68–73 (2021).
- 4) 電子科学研究所；“エックス線取扱の基礎”, (2007), 電子科学研究所, 大阪.
- 5) 青柳泰司, 安部真治, 小倉泉, 根岸徹, 沼野智一；“放射線機器学 (I)”, (2015), コロナ社.
- 6) 齋藤秀敏, 福士政広, 藤崎達也, 布施拓, 橋本光康, 浦橋信吾, 入船寅二, 井上一雅, 三枝健二；“放射線機器学 (II)”, (2017), コロナ社.
- 7) 林恵利子, 小池裕也, 木村圭志, 飯本武志, 小佐古敏荘, 中西友子；研究用エックス線装置の分類安全管理方法に関する考察, *Radioisotopes*, **58**, 195–207 (2009).
- 8) 小西恵美子, 吉澤康雄；研究用 X 線装置および電子顕微鏡の放射線管理—人事院規則改正を中心として—, 保健物理, **17**, 495–504 (1982).
- 9) 放射線治療品質管理機構；2001 年–2004 年に公表された放射線治療における誤照射事故の調査報告のまとめ。Available at: [https://www.qcrt.org/common/pdf/accident\\_report.pdf](https://www.qcrt.org/common/pdf/accident_report.pdf), Accessed 30 Apr 2023.
- 10) (株) 千代田テクノロ；FBnews No. 549. Available at: [https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/FB549\\_202209web2.pdf](https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/FB549_202209web2.pdf), Accessed 30 Apr 2023.
- 11) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Safety Culture, Safety Series No. 75-INSAG-4, IAEA, Vienna (1991).
- 12) 鈴木智和；RI 施設における法令報告に至らない事故トラブル情報の共有, 日本放射線安全管理学会誌, **20**, 78–80 (2021).
- 13) 中央労働災害防止協会；“電離放射線障害防止規則の解説”, (2022), 中央労働災害防止協会, 東京.
- 14) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Radiation Safety of X Ray Generators and Other Radiation Sources Used for Inspection Purposes and for Non-medical Human Imaging, IAEA Safety Standards Series No. SSG-55, p. 27, IAEA, Vienna (2020).

- 15) Occupational Safety and Health Administration; Occupational Safety and Health Standards Ionizing radiation 1910.1096 (i) (2). Available at: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1096>, Accessed 30 Apr 2023.
- 16) 文部科学省；医学教育モデル・コア・カリキュラム令和4年度改訂版. Available at: [https://www.mext.go.jp/content/20230207-mxt\\_igaku-000026049\\_00001.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20230207-mxt_igaku-000026049_00001.pdf), Accessed 30 Apr 2023.
- 17) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Radiation Safety of X Ray Generators and Other Radiation Sources Used for Inspection Purposes and for Non-medical Human Imaging, IAEA Safety Standards Series No. SSG-55, p. 30, IAEA, Vienna (2020)
- 18) Occupational Safety and Health Administration; Occupational Safety and Health Standards Ionizing radiation 1910.1096 (i) (3). Available at: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1096>, Accessed 30 Apr 2023.

## レポート

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討WG」活動報告  
—第2分科会 エックス線被ばく事故における線量評価の課題—秋吉 優史<sup>\*1,2</sup>, 小田 啓二<sup>\*1,3</sup>, 笠井 篤<sup>\*1,4</sup>, 古渡 意彦<sup>\*1,5,#</sup>,  
阪間 稔<sup>\*1,6</sup>, 浜田 信行<sup>\*1,7</sup>, 福士 政広<sup>\*1,8</sup>

(2023年5月10日受付)

(2023年8月10日採択)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures  
—Subcommittee 2: Dosimetric Issues on X-ray Exposure Accidents—Masafumi AKIYOSHI<sup>\*1,2</sup>, Keiji ODA<sup>\*1,3</sup>, Atsushi KASAI<sup>\*1,4</sup>, Munehiko KOWATARI<sup>\*1,5,#</sup>,  
Minoru SAKAMA<sup>\*1,6</sup>, Nobuyuki HAMADA<sup>\*1,7</sup> and Masahiro FUKUSHI<sup>\*1,8</sup>

The JHPS Working Group for Discussion on X-ray Exposure Accidents summarized the background of the X-ray exposure accident happened in Himeji, Hyogo in May 2021. The working group paid attention to the viewpoint of fostering a further awareness of the need to the radiation safety culture and discussed issues identified to contribute to the prevention of possible future X-ray accidents as one of the goals. The article introduces an example to apply the dose estimation method using a Monte Carlo simulation discussed in the working group. The authors summarized other methods of dose estimation, the technical limitations and the challenges of each method. The authors believe that these summary for dose estimation method will be informative and helpful to overcome the future issues in this area. The authors also considered that information on the energy distribution of low-energy X-rays in the body of an exposed patient is important for radiation emergency medicine and radiation protection purposes and that individual and environmental monitoring of low-energy X-rays is still challenging.

**KEY WORDS:** エックス線事故, 線量評価, モンテカルロシミュレーション, 線量換算係数, 低エネルギー X線.

\*1 (一社) 日本保健物理学会エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ第2分科会

Subcommittee 2, JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures.

\*2 大阪公立大学工学研究科量子放射線系専攻; 大阪府堺市中区学園町1-1 (〒599-8531)

Osaka Metropolitan University, Graduate School of Engineering Division of Quantum and Radiation Engineering; 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan.

\*3 (一財) 電子科学研究所; 大阪府大阪市中央区北久宝寺町2丁目3番6号 (〒541-0057)

Electron Science Institute; 2-3-6 Kitakyuuhojimachi, Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 541-0057, Japan.

\*4 元日本原子力研究所

Retired, Japan Atomic Energy Research Institute.

\*5 (国研) 量子科学技術研究開発機構; 千葉県千葉市稲毛区伏見4-9-1 (〒263-8555)

National Institutes for Quantum Science and Technology; 4-9-1

Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

\*6 徳島大学大学院医歯薬学研究部保健科学部門放射線科学系放射線理工学分野; 徳島県徳島市蔵本町3-18-15 (〒770-8509)  
Department of Radiation Science and Technology, Division of Radiological Sciences, Institute of Biomedical Sciences, Tokushima University Graduate School; 3-18-15 Kuramoto-cho, Tokushima-shi, Tokushima 770-8509, Japan.

\*7 (一財) 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部生物・環境化学研究部門; 千葉県我孫子市我孫子1646 (〒270-1194)  
Biology and Environmental Chemistry Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI); 1646 Abiko-shi, Chiba 270-1194, Japan.

\*8 つくば国際大学診療放射線学科; 茨城県土浦市真鍋6-20-1 (〒300-0051)

Department of Radiological Technology, Tsukuba International University; 6-20-1 Manabe, Tsuchiura-shi, Ibaraki 300-0051, Japan.

# Corresponding author; E-mail: kowatari.munehiko@qst.go.jp

## I 緒 言

エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ(以下、「検討WG」という。)設置のきっかけとなった事故は、2021年5月29日に日本製鉄(株)(兵庫県姫路市)で発生したエックス線被ばく事故であり、2名の作業者が年間の被ばく線量限度の数倍から数十倍に及ぶ大量の被ばくをした可能性がある<sup>1)</sup>。2023年1月の報道によると、「工業用のエックス線装置の電源を切るなどの安全対策をせずに、30代の男性社員に点検作業をさせ、急性放射線皮膚炎などの重傷を負わせた」とのことであった(産経新聞2023/1/20 22:02)。事故時の被ばく線量は事故の影響、対応、対策の基礎になるという観点から、可能な限り事故当時を再現することによって正確な線量評価が行われなければならない。しかしながら、本稿執筆時点の2023年4月において、今回のエックス線事故における作業者の被ばく線量のみならず、被ばく源であるエックス線メッキ膜厚計の仕様、被ばく事故当時の管電圧・管電流・遮へいの状況等の被ばく線量再構築に不可欠な詳細情報は公表されていない。今回の事故における被ばく源はエネルギーの低いエックス線であることから、被ばく線量は被ばく者の姿勢及び被ばく当時の遮へいの有無に大きな影響を受ける。そのため、被ばく時の正確なスペクトル、エックス線源と被ばく者の位置関係、着衣も含めた遮へいの状況等の被ばく線量評価に必要な情報が得られない場合、設定した条件の差が最終的な被ばく線量評価結果に大きな違いを生み、正確な被ばく線量を求めることはできない。

放射線防護上の線量評価では、将来計画されている放射線作業が、法令の線量限度を下回り安全な作業が実施できることを担保すること、現在行われている放射線作業が放射性同位元素等規制法及び電離放射線障害防止規則を逸脱せず、許可の通りに実施されていることを担保すること、並びに緊急時モニタリングのような災害時の環境放射線・放射能の測定に主眼が置かれる。一方で、被ばく医療のための被ばく者の線量評価は、被ばく患者のトリアージ、及び高線量被ばくを受けた患者への迅速な治療開始に資することを最優先とする。そのため、被ばく者の線量評価は、生物学的・物理学的線量評価の複数を組み合わせ、治療方針決定に不可欠な線量情報を与えるものでなければならない。被ばく患者の治療に資する線量評価では、急性放射線障害の前駆症状を見るほか、組織反応の有無等を迅速に判断して治療方針を計画することから各組織・臓器の吸収線量を最優先に評価するこ

ととなる。また、被ばく者の線量評価においては、入射放射線のエネルギーも重要であり、今次エックス線事故での被ばく源となったエックス線メッキ膜厚計のように、エックス線管電圧が比較的低いエックス線装置からのエックス線の透過力も線量評価上の課題となる。

本稿では、検討WGの議論のうち、特に第2分科会の検討事項である被ばく事故時のエックス線被ばく線量評価における課題と検討事項について整理する。検討WGは2021年7月14日の設置後、2023年3月末の活動完了までに24回会合を開催した<sup>1)</sup>。検討WGでは、契機となった被ばく事故の内容に留まることなく、エックス線の利用に関する広い視野での管理上の問題点、課題を整理し、学会としての今後の対応方針を明確にすることを目的に活動した。活動では、事故の背景、経緯とその対応に関する関係各所の情報を収集して、放射線防護を専門としない方へ事故概要を理解いただくような発信、及び専門家の観点から分析して安全文化の醸成に資する有益な教訓を発信することも目的とした。2022年7月には検討WGにおける検討内容をまとめ、「経過報告書」<sup>2)</sup>として公開した。経過報告書にて示されたいくつかの課題について、検討WGに、①エックス線利用上の規制と現場管理(第1分科会)、②エックス線被ばく線量の測定及び評価(第2分科会)、並びに③事故に関する情報の発信と教訓の水平展開(第3分科会)に係る三つの分科会を設け、より具体的な検討を進めた。第2分科会では、種々の線量再構築手法の中でも、放射線輸送シミュレーションによる被ばく線量評価について紹介があった。第2分科会の議論では、シミュレーションによる線量評価のみならず、どのような評価手法を取りうるか、生物学的・物理学的線量評価の各手法の技術的な限界、及び各手法の課題についての整理が有効であることが確認されており、本稿ではそれらの議論について述べる。また、被ばく者が放射線業務従事者である場合、装着している個人線量計の指示値の扱いについて注意が必要である点について取り上げる。さらに、低エネルギーエックス線の場合、生物学的効果比(RBE)が通常的光子の場合の1とは異なり大きくなることが報告されており、この影響についても概説する。

## II 方 法

### 1. エックス線被ばく事故時の被ばく線量評価における課題の抽出

検討WG第2分科会の議論では、エックス線被ばく事故時の被ばく者の被ばく線量の評価における課題を具

体的に抽出した。さらに、各課題の検討について、現状を俯瞰し、事故のみならず平素より放射線管理、線量評価等に従事する研究者・技術者が引き続き取り組むべきことを具体的にまとめた。

今回のエックス線事故は、放射線を体の外から受けることによる被ばくであるため外部被ばくに分けられる。被ばく者の状況については、「急性放射線皮膚炎などの重傷を負わせた」との報道があり、手指や身体の一部に極端に被ばくした局所被ばく状況である可能性が示唆されるものの、被ばく状況に係る詳細な情報は公開されていない。事故に関する公開情報の入手が難しいなか、検討WGでは、契機となった当該エックス線事故のみに留まらず、エックス線の利用に関する広い視野から検討を進めた。本稿においては、エックス線被ばく事故時の被ばく者自身の線量評価に係る課題、及びエックス線装置使用における個人・作業環境の測定・線量評価についての検討内容を紹介する。

## 2. エックス線被ばく事故における各課題の検討

エックス線被ばく事故における線量評価については、検討WG各委員により以下の点が課題として挙げられた。

- 1) 被ばく状況に関する情報不足に起因する被ばく線量評価の困難さ
- 2) 低エネルギーエックス線被ばく時の人体中での線量分布
- 3) 線質によるRBEについて
- 4) エックス線装置からのエックス線計測上の課題
- 5) 線量換算係数の課題

1) の被ばく事故に関する情報入手の困難さについて、エックス線被ばく事故に限らず、放射線事故・原子力災害に関する放射線情報は事故情報そのものについても取得が困難である。検討WG第2分科会においては、被ばく医療に従事する者及び放射線管理担当者が、被ばく者の線量を推定するために必要なエックス線事故時の線源及び被ばく状況等に正確な情報を迅速に入手することが難しい、という点は課題であると改めて認識した。

2) 低エネルギーエックス線被ばく時の人体中での線量分布は、今回検討対象となったエックス線被ばく事故の被ばく源が低エネルギーエックス線であることに起因する課題である。被ばく源が低エネルギーエックス線の場合、被ばく者が全身に均一にエックス線の被ばくを受けたとしても、透過力が低いため、体内では不均一な線量分布が生じることが考えられたためである。検討WG

第2分科会では、放射線輸送シミュレーションを用い、全身被ばく状況であっても体内に極端な線量の勾配が生じうる状況について検討した。

3) 線質によるRBEの違いは、2) で挙げた課題と同様に被ばく源が低エネルギーエックス線であることから検討が必要であると認識された。

4) エックス線装置からのエックス線計測上の課題について、検討WGでは、エックス線装置からのエックス線がパルス状に放射されていること、及び個人被ばく線量評価測定に供する個人線量計の応答が低エネルギーエックス線による被ばく線量評価に合致していない場合があること、が課題となることが指摘された。

5) で挙げた線量換算係数は、作業環境モニタリング時の周辺線量当量（または方向性線量当量）についての課題である。工業・原子力分野で使用されるサーベイメータは、診断領域で使用されるエックス線よりも高いエネルギーを有する $\gamma$ 線を正しく測定するために設計・調整されている。その指示値は、1 cm 線量当量（率）で表示されるため、エックス線装置からのエックス線測定には適していない。この点を考慮して検討を進めた。

## III 各課題の検討結果及び今後の課題

### 1. 情報不足に起因する被ばく線量評価の困難さ

#### 1.1 検討結果

被ばく事故における被ばく者の線量は、被ばく者の治療方針を決定するために重要であるのみならず、放射線事故のインパクトを評価する上でも一つの指標となりうる。しかしながら、被ばく者の被ばく線量は、事故発災後に評価することになるため、事前に被ばく線量を予測することは不可能である。このように、事故時の被ばく線量を正確に再現する困難さは、被ばく事故の状況を完全に再現できない点によるところが大きい。

今回のエックス線被ばく事故に限って言えば、被ばく源となったエックス線装置の仕様、被ばく事故当時の管電圧・管電流・遮へいの状況、被ばくした作業者の姿勢等、被ばく線量再構築に不可欠な詳細情報は公表されていないため、線量を再構築することは極めて困難である。この点から、線量評価に関連する線源や周辺の線量率、並びに被ばく者の位置に関する情報を容易に収集できる対策・機器の設置等があると有用である。特に、被ばく事故に伴う被ばく者の外部被ばく線量評価はいくつかの手法を用いて実施されるが、被ばく医療に資する線量評価の場合、生物学的線量評価の一つである染色体線量評価が標準的手法である。また、外部被ばく線量再構



築のため、被ばく状況の再現実験及び放射線輸送シミュレーションコードを用いる手法がとられる事例も見られる<sup>3,4)</sup>。その場合、線源との位置関係、被ばく時間、遮へいの状況（線源周辺の構造物、被ばく者の個人防護装備の装着状況、等）について、被災した当時の情報を正確に入手し、線量評価の時点で再現されなければならない。被ばく状況の調査時に、聞き取りのみ、被ばく者の立ち合いのない状態での現地視察のみでは、被ばくした当時の姿勢と位置関係を再現するのは困難な場合がある。加えて、被ばく状況に関する関係者の記憶が時間の経過に従ってあいまいになる場合がある。

検討WGで参考とした国際原子力機関（IAEA）で収集されている加盟国から報告された事故事例 IAEA-supported Nuclear Events Web-based System（NEWS）では、放射線業務従事者が誤って過剰被ばくする事例も紹介されている<sup>5)</sup>。個人線量計による放射線業務従事者のモニタリングは、日常的な作業における被ばく管理の目的で実施されるものである。多くの場合、放射線業務従事者の体幹部または腹部に個人線量計が装着され、場合によっては最も多く放射線にさらされるおそれのある部位がモニタリングの対象となる。一方で、通常のモニタリングは局所被ばく事故時の被ばく線量測定を想定してしない。このような事故の場合、被ばく者が装着している個人線量計からの指示値は、被ばく線量がどの程度であったかを示す有用な指標である。個人線量計の指示値は、一般には人体組織中1 cm 深さでの個人線量当量の単位（Sv）で表されるもので、全身に均一に（この場合は）エックス線を被ばくしたという仮定の下で実効線量の近似値として用いることが可能である。従って、被ばくによって被ばく者の装着する線量計より得られた指示値は、被ばく線量を記述するための臓器吸収線量（Gy）を直接与えるものではない。特に、被ばく事故が局所被ばくであった場合には、線量計を装着した部位に線量が集中する、またはその逆に線量計を装着していない部位に被ばくしたことがあることを考慮すると、線量計の指示値が被ばく線量の妥当な指標と言えない場合がある。上述のとおり、線量計指示値は個人線量当量（例えば  $H_p(10)$  等）で評価されるため、緊急被ばく医療で用いる線量の単位（Gy または Gy-Eq）、及び事故発災後の法令に基づく報告等に用いる放射線防護の単位（実効線量または等価線量：Sv）とて厳密な使い分けが求められる。

## 1.2 今後の課題

被ばく者の線量評価再構築のため、被ばく事故の状況

を完全には再現できない点によるところが大きい。今回のエックス線被ばく事故のように、作業者の不安全行動に起因することを想定することは、労働安全上重要である。その際、想定される事故による被ばく者の線量予測のため、種々のエックス線装置とそれを使用する放射線作業に対し、事前にどのような事故が不安全行動によって発生し、その事故でどの程度の被ばく線量に達するかについて評価する研究、及び被ばく線量推定を可能とするツールは有用であるといえる。また、低エネルギーエックス線による被ばく事故における、線量計の指示値と事故時の被ばく者の受ける線量との関係についての検討はほとんどないため、今後も継続した系統的研究が必要である。

## 2. 低エネルギーエックス線被ばく時の人体中での線量分布

### 2.1 検討結果

低エネルギーエックス線被ばく時の人体中での線量分布の検討は、被ばく源が低エネルギーエックス線に起因するものである。これは、低エネルギーエックス線の場合、被ばく者の全身に均等にエックス線を受けたとしても、透過力が低いために、体内で不均等な線量分布が生じることが考えられたためである。検討WGでは、放射線輸送シミュレーションを用い、全身均等被ばくの状況であっても被ばく者の体内における線量分布が不均一となりうる状況について検討を進めた。

放射線輸送シミュレーションは、近年の目覚ましい技術革新に相まって、机上のパーソナルコンピューターにおいても十分許容可能な時間内（数日以内）で十分実行できる。現在、素粒子物理から原子炉特性評価まで非常に広範な分野で放射線輸送シミュレーションコードの開発が進められている。上述のシミュレーションコードは、プログラム上で生成させた、線源としての放射線（荷電粒子、光子、中性子等）をモンテカルロ法で逐次シミュレーションするアルゴリズムで設計されている。これらの莫大な物理現象を計算機上で再現するための高性能なマイクロプロセッサが比較的廉価に入手できるようになり、この十年程度で市販のパーソナルコンピューターにおいても計算可能となった。検討WG第2分科会では、PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）コードを用い、エックス線装置による被ばく事象を想定し、被ばく者の被ばく状況を考慮したエックス線情報、被ばくした作業現場のジオメトリー情報（3DCAD データ等を導入する）、放射線治療の分野で一般的に使用される

人体組織ファントム情報を入力することにより、迅速かつ精度良い被ばく線量評価・線量再構築の可能性について紹介する。

### (1) 線量分布評価に用いた計算コード等

PHITSは、国産の放射線輸送シミュレーションコードであり、(国研)日本原子力研究開発機構を中心として、(一財)高度情報科学技術研究機構、高エネルギー加速器研究機構、九州大学等と協力して開発されている<sup>9)</sup>。同コードは、原子力・加速器施設の遮蔽計算から、近年は診療放射線技師や医学物理士などの医学応用分野に至るまで広汎に利用されており、2023年3時点で、国内外のPHITSユーザー数は5,000人に達している。PHITSは、中性子、陽子、重イオンを含む原子核、電子、光子などほぼすべての粒子・放射線の輸送を再現することができる。(電子、光子の輸送計算シミュレーションアルゴリズムには、開発や使用実績に優れているElectron Gamma Shower (EGS)が母体となって、PHITS計算コード記述に組み込まれている。)

検討WGの契機となったエックス線被ばく事故については、メッキ膜厚計の点検に従事していた成人男性2名が被ばくしたこと以外に、被ばく状況に関する公式な発表はない。従って、メッキ膜厚計のメーカー、型式、に加え、事故発生当時の運転状況、漏えいエックス線による被ばくか、エックス線管球からの直接エックス線による被ばくか、被ばく者2名の位置関係、被ばくした各作業者の姿勢に関する情報はない。そこで、第2分科会メンバー相互で事故経緯に関する公開情報を精査したうえで、検討WG第2分科会では、当該エックス線事故について事故状況を正確に再現した被ばく事故線量評価を行うのではなく、放射線輸送シミュレーションによりエックス線装置からの被ばく者の被ばく線量をどのように記述できるか、試験的な放射線輸送シミュレーションを行うこととした。

PHITSによる計算条件は以下の通りとした。今回の検討では、あるメーカー製メッキ膜厚計を想定した簡易なエックス線源を設定して、放射線輸送シミュレーション体系内に導入した。PHITSでは、電子をターゲットに衝突させてエックス線を発生させる現象も再現できるが、今回の検討ではメッキ膜厚計内のエックス線管内部の情報が得られなかったことと人体における吸収線量分布に着目する観点から、近似式によるエックス線分布の推定を行うこととした。線源条件は、診断エックス線装置からのエックス線スペクトルを解析的に推定でき

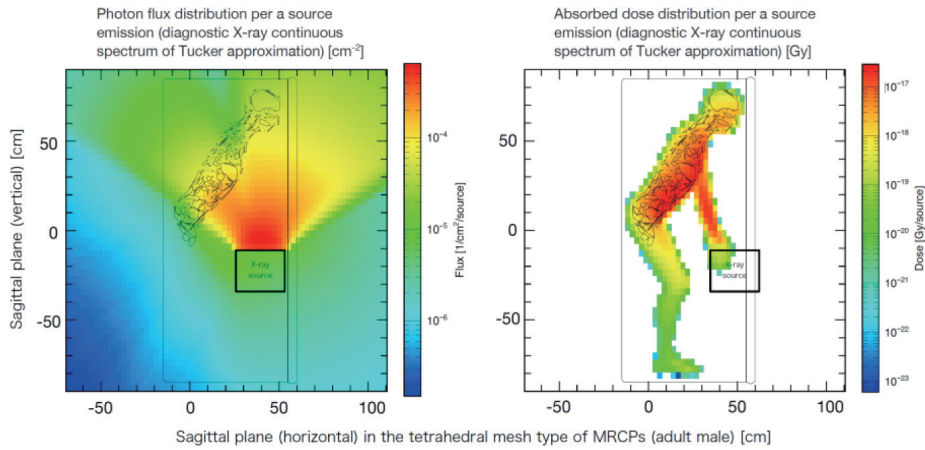
るTUCKERの近似式<sup>7)</sup>を用い、管電圧を120 kVに設定した。線源は、タングステンターゲットの角度は12度、アルミニウム固有フィルタ2.8 mm及び銅付加フィルタ0.3 mmの条件で推定した。

放射線輸送シミュレーションにおいて、被ばく者を模擬するために、人体を組織・臓器を含めて計算機空間内で詳細に模擬する人体ファントムが利用可能である。2023年3月時点で、国際放射線防護委員会(ICRP)が線量換算係数の評価に使用したボクセルファントム(ICRP Publication 110<sup>8)</sup>)や、最新の人体ファントムである四面体構造メッシュによる高精細人体ファントム(Mesh-type Reference Computational Phantoms, MRCPs)(ICRP Publication 145<sup>9)</sup>)等、成人男性・女性を模擬する人体ファントムはいずれも直立姿勢が標準である。本検討では、直立姿勢MRCPだけでなく、漢陽大学(大韓民国)のYEOMら<sup>10)</sup>によって近年開発された、5つの基本姿勢に対するMRCPsのうち、身をかかめる姿勢の人体ファントムをPHITS計算上へ取り込んで、放射線輸送シミュレーションが可能かの検証を行った。

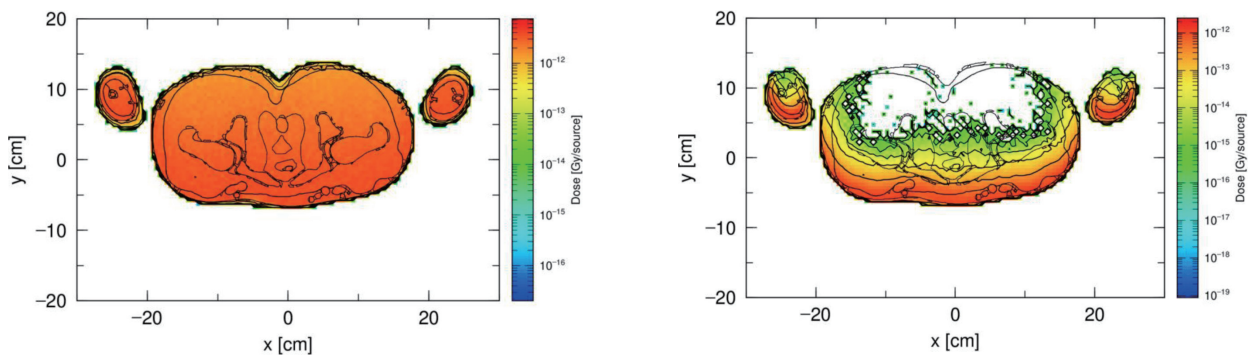
### (2) 線量評価の結果

**Fig. 1**は、エックス線源からの放射線飛跡分布とエックス線による人体へのエネルギー付与からの平均吸収線量分布を表している。エックス線飛跡状況とそのエックス線による人体への平均吸収線量分布を示している。**Fig. 1**のような2次元カラーマッピングは、検討WGが目標として掲げた、放射線計測・線量評価を専門としない保健物理学会員等への放射線安全文化醸成に役立つような、視覚的な印象付けに大きく貢献する素材となると考えられる。

検討WG第2分科会においては、被ばく者の深部方向の線量分布の情報は重要である点が強調された。被ばく源が低エネルギーエックス線である場合、一般的に考えられる $\gamma$ 線被ばく(例えば<sup>137</sup>Cs線源からの $\gamma$ 線)とは異なり、体表面で減衰して身体深部方向の線量分布の勾配が大きくなると考えられる。**Fig. 2**では、異なるエネルギーの $\gamma$ 線・エックス線による人体における吸収線量分布の計算例を示す。放射線輸送シミュレーションはPHITSコードを用い、導入した人体ファントムは、ICRP Publication 145<sup>9)</sup>で示された標準姿勢の成人男性MRCPである。照射は前方-後方照射ジオメトリーであり、線源は単位フルエンス(photons cm<sup>-2</sup>)当たり規格化した。エックス線装置からの漏えいエックス線のエネルギーはエックス線装置管電圧よりも低く、医療分野に

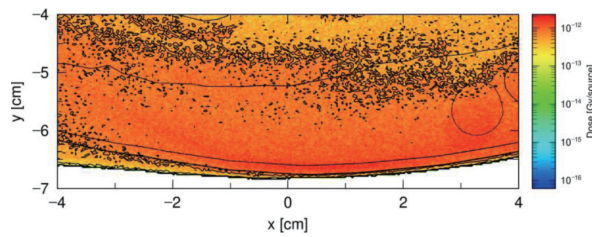


**Fig. 1** Examples of exposure dose due to X-rays by introducing the tetrahedral mesh-type MRCP with posture of bending.



(A) Absorbed dose distribution in the human body per unit fluence, when 662-keV mono-energetic gamma-rays are irradiated (cross-sectional view).

(B) Absorbed dose distribution in the human body per unit fluence, when 20-keV mono-energetic X-rays are irradiated (cross-sectional view).



(c) Enlarged view of the absorbed dose distribution per unit fluence in the vicinity of the surface of the body, when 20-keV mono-energetic X-rays were irradiated.

**Fig. 2** Examples of MC calculation results of absorbed dose distributions in the human body with different energies of gamma rays and X-rays. Irradiation geometry was taken as anterior-posterior geometry (AP geometry). Photons were irradiated from negative to positive Y-axis direction. The absorbed doses per fluence (photons  $\text{cm}^{-2}$ ) are indicated.

おける画像誘導下治療 (IVR) での漏えいエックス線については、20 keV から 100 keV との報告もある<sup>11)</sup>。そこで、報告からの下限値である 20 keV を選択し、20 keV の単色エックス線での計算を行い、比較のため  $^{137}\text{Cs}$  か

らの  $\gamma$  線のエネルギーに相当する 662 keV についても計算した。

**Fig. 2** に示す通り、入射する  $\gamma$  線・エックス線エネルギーの違いにより人体における吸収線量分布が大きく異

なっているのが分かる。 $^{137}\text{Cs}$ からの $\gamma$ 線のエネルギーに相当する662 keVが線源の場合、体内ではほぼ一様の吸収線量分布になっている。一方の20 keVの場合、体表面から10 cm程度の深度で約1/1000倍まで減少していることがわかる。背中側（図のY軸プラス方向）では、エネルギー沈着がない。低エネルギー엑스線による被ばくの場合には、全身均等被ばく状況であったとしても、体内中の線量分布には大きな勾配が生じることがわかる。特に、線源に向いている体表面については、皮膚線量の推定と吸収線量分布の評価は、被ばく医療に資する線量評価の観点から不可欠といえる。本稿で示す計算例では、Fig.2 (C)に示す通り、体表面に当たる皮膚が最大の線量となっておらず、皮膚より数mm深い位置で最大線量を取りうることを示唆される。この前方-後方照射条件での20 keVの엑스線に対する皮膚近傍の最大線量は、単位フルエンス当たり1.53 pGyに達する。また、計算で示した通り、低エネルギー엑스線であっても、皮膚で完全に遮へいされるわけではないため、線源強度（被ばく時の線量）が大きい場合には、皮膚線量のみならず、各臓器への線量も考慮に入れる必要がある。

### (3) その他の被ばく線量評価手法

上述のシミュレーション計算による線量評価に加えて、放射線事故時に用いられる、一般的な線量評価手法についても以下で簡単に言及する。全身均等被ばくの場合、線量評価法として、前駆症状による線量評価、リンパ血球数による線量評価、染色体分析に基づく生物学的線量評価、電子スピン共鳴（Electron Spin Resonance, EPR）に基づく線量評価が代表的である。局所被ばくの場合でも、被ばくした部位の初期紅斑等から線量評価が行われるが、その誤差は非常に大きい。局所被ばくの場合には、例えば生物学的線量評価による被ばく線量を求める場合には、全身を循環した血液を試料として評価することから、局所被ばくした部位からのみの試料から評価できない等、線量評価上の不確実性が大きい。そのため、線量再構築による物理学的線量評価が重視される<sup>12)</sup>。海外での事例であるが、엑스線被ばく事故に遭遇した作業員（個人線量計未装着との報告）に対し、生物学的線量評価が行われた事例はある。なお、事故発生状況から明らかな不均等被ばくと考えられる場合、엑스線事故時の被ばく者線量評価の適応は十分考慮される必要がある。上述のいずれの手法を取るにせよ、엑스線被ばく事故時には、被ばく者への速やかな治療の提供に

つながる適切な線量評価の実施が求められる。

## 2.2 今後の課題

今回の検討では、放射線輸送シミュレーションにより、対象となる엑스線装置からの漏えい엑스線からの被ばく者の被ばく線量を精度よく決定できる可能性が示された。엑스線事故による被ばく者の体内における正確な線量分布を求めるには、被ばく源となる엑스線装置の、管電圧、管電流、フィルタの有無、엑스線管球周辺の遮へい等の線源情報は不可欠である。これらの線源情報の入手にあたり、事故当時の場の線量及びエネルギー分布を正確に求めること困難である。放射線輸送シミュレーション上では、被ばく者の姿勢、線源となる엑스線装置、被ばく者の装置の周辺構造物のシミュレーション体系へ正確に反映することが困難である。

今回の検討で示した通り、低エネルギー엑스線に特有の、透過力が弱いことによる人体における線量分布は課題といえる。さらに、低エネルギー엑스線は着衣でも容易に減衰するため、深度方向への被ばく者の線量の体内分布も放射線輸送シミュレーションの結果と厳密に一致しないと考えられる。例えばFig. 3に示すような人体ファントムへの着衣を導入することで、着衣の影響を加味した被ばく線量の再構築も可能となるであろう。さらに、放射線輸送シミュレーションに導入する人体ファントムの姿勢変更、ファントムの体型を変更する、等を自由に実施できるようなソフトウェアや入力支援ツールの開発は非常に有効であろう。

## 3. 線種によるRBEについて

低エネルギー엑스線のRBEが1より大きいことは、国際放射線防護委員会（ICRP）の刊行物ICRP Publication 92<sup>13)</sup>や米国放射線防護審議会（NRC）のReport No. 181<sup>14)</sup>などでも言及されているとおり広く知られている。例えば、高線量局所被ばくを考慮した場合、線種の違いによるRBEの違いを考慮に入れたGy-Eq単位で皮膚線量（臓器線量）を評価することで、確定的影響の効果を被ばく線量に反映させて被ばく医療につなげることが可能となる。なお、Gy-Eqは医療被ばくの評価のために導入された単位であるが、わが国で発生した東海村臨界事故等の中性子による被ばく事故でも適用された事例がある。被ばく医療における診療方針が妥当となるための被ばく線量情報を提供する観点から、低エネルギー엑스線のようにRBEが1を超えると報告のあ



Fig. 3 Picture of MRCP wearing the cloth.

る線種については、組織吸収線量 (Gy) に対し適切な RBE を乗じて RBE 加重組織吸収線量を求めることも検討すべきである。

被ばく事故と直接関連しないが、現状の放射線防護において実効線量の評価は、放射線加重係数  $w_R = 1$  に基づいて行われている。ICRP, NCRP 等でも低エネルギー光子の高い生物効果は重要であり、ICRP 次期主勧告の作成に向けて考慮されるべきとの認識を受け<sup>15,16)</sup>、ICRP タスクグループ 118 等で検討を進めている。被ばく事故発災元事業者が規制当局に対し実効線量で報告する際には、低エネルギー엑クス線に対して 1 以上の RBE を用いることとなると、現行の実効線量評価は過小評価となる点には注意を要する。

#### 4. エક્クス線装置からの엑クス線計測について

##### 4.1 検討結果

今回の엑クス線被ばく事故の原因となった装置のような、産業用엑クス線装置からの엑クス線計測は、①連続照射でない엑クス線装置の場合はパルス状に放射されること、及び②엑クス線のエネルギーが低いこと、に起因する課題がある。엑クス線装置からの엑クス線計測上の課題としては、1) 電子式個人線量計の数え落としの課題、及び2) 個人線量計のエネルギー応答特性の課題が挙げられる。これらの課題に対し、1) わが国で広く使用されている電子式個人線量計について、パルス엑クス線校正場での特性評価試験と実際の엑クス線場での応答特性の評価、及び2) サーベイメータ及び個人線量計に対する低エネルギー엑クス線に対するエネルギー応答特性の把握及び線量計の低エネルギー엑クス線場での校正、が適切に行われることが望

ましい。これらについて、以下で詳述する。

엑クス線装置の使用環境において、個人及び環境モニタリングを実施することを考えると、簡略化された冷却機構を有する엑クス線装置の場合、発生する엑クス線はパルス状に放射されると考えられる。엑クス線源からのパルス엑クス線は、一つのパルスがミリ秒以下の短時間に放出されるため、時間平均した場合に非常に低い線量率であったとしても、1パルス当たりの線量率は非常に大きくなる。IVR における典型的な放射線場について文献 12) Table 3.1 にまとめられており、엑クス線管電圧 60 kV–120 kV、管電流 5 mA–1000 mA、パルス幅 1 ms–20 ms と엑クス線装置の運転条件に幅がある。結果として、散乱線の엑クス線エネルギーは 20 keV–100 keV で、個人線量当量率は、 $5 \text{ mSv h}^{-1}$  から  $10 \text{ Sv h}^{-1}$  に達すると報告されている<sup>11)</sup>。

上述のような非常に高い線量率の엑クス線に対するサーベイメータ及び電子式個人線量計の応答について、パルス엑クス線校正場で調査された事例がある。対象となったサーベイメータ及び電子式個人線量計は、それぞれ欧州各国で広く使用されているものが選定されており、特に電子式個人線量計については、わが国でも用いられているモデルも試験されている<sup>17)</sup>。

一般にサーベイメータ及び電子式個人線量計は、受けた線量に応じた電気信号を処理し、線量率として表示する信号処理回路を具備しているが、極端に線量率の高い放射線 (場) に対しては、信号処理が間に合わず、いわゆる「数え落とし」の現象が発生して、見かけ上は低い指示値を示すことが予想される。文献 18) Figure 3 では、試験対象となった個人線量計 10 機種種の応答に関する線量率依存性が示されている。連続照射には  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線

源（平均エネルギー：1.25 MeV）、パルス照射（1パルス当たり 10 msec に設定）には国際電気機関 IEC で規定されている診断エックス線を模擬する線種 RQR8（平均エネルギー：44.2 keV）が用いられている。個人線量計は、機種ごとに許容線量率範囲が仕様書に記載されており、連続照射の場合、試験対象となった 10 機種全てで良好な応答を示しているのに対し、パルス照射では、4 機種で応答が 20% 以下まで低下していた。電子式個人線量計の、線量率に対する応答の変化の度合いは、機種により異なっているが、文献 19 の図表から読み取ると、 $10 \text{ Sv h}^{-1}$  以上の線量率になると、パルス照射の場合すべての機種で数え落としが生じている。

被ばく源となるエックス線のエネルギーが低いことに起因する課題として、個人被ばくモニタリングの課題も挙げられる。医療現場では、放射線業務従事者である医療従事者が装着する個人線量計は被ばく源となるエックス線の検知・線量評価を適切に実施可能な線量計が用いられている。一方で、原子力分野で使用される線量計は、医療現場で使用されるエックス線よりも高いエネルギーを有する  $\gamma$  線を正當に評価するために設計されている。Fig. 4 では、わが国で広く普及している電子式個人線量計の応答特性の比較を示す（1 cm 線量当量での特性）。ガンマ線標準型の機種の場合、40 keV 以下のエックス線に対して応答がなく、線量が求められないことに加え、40 keV ~ 100 keV の範囲で、線量計の応答の変化が大きい。エックス線測定用線量計の応答は、100 keV 以下で平坦になっているため、今回の事故での被ばく源となった工業用エックス線源からのエックス線に対し、良好な応答を示すことがわかる。受動型個人線量計についていうと、測定範囲は 5 keV 以上<sup>21)</sup>となっており、

100 keV 以下のエックス線による線量測定にも対応可能といえる。

#### 4.2 今後の課題

上述のように電子式個人線量計に対して得られた試験結果から、文献 19 中では、線量率応答特性を取得するには、連続照射場では不十分であると結論付けている。2022 年 12 月現在、わが国において基準パルスエックス線校正場の整備運用に関する計画はない。しかしながら、海外で整備された基準パルスエックス線校正場（ここではドイツ）は外部ユーザーが利用可能であるため、わが国において広く普及している電子式個人線量計について、パルスエックス線場における応答特性が把握されることが望ましい。

わが国における放射線業務従事者の被ばく管理には、受動型個人線量計が広く用いられているが、線量計素子は、付与されたエネルギーを変換・表示するための電気回路を有しておらず、専用の読み出し装置を介して素子からの光信号を変換して線量とするため、パルスエックス線に対しても、線量を数え落とすことはない。工業用ラジオグラフィ分野における、放射線業務従事者の個人線量計の利用状況について聞き取り調査を行ったところ、日本非破壊検査工業会放射性同位元素等安全管理委員会（29 社が参加）からは、「（受動型個人線量計である）ガラスバッジか光刺激ルミネッセンス（OSL）線量計をもって個人の被ばく管理をしており、警報付個人線量計（APD）を含む電子式線量計は補助機器として使用している」との回答を得ている。わが国においては、当該分野でパルスエックス線の数え落としの懸念がある電子式個人線量計を用いた個人モニタリングは実施されていな

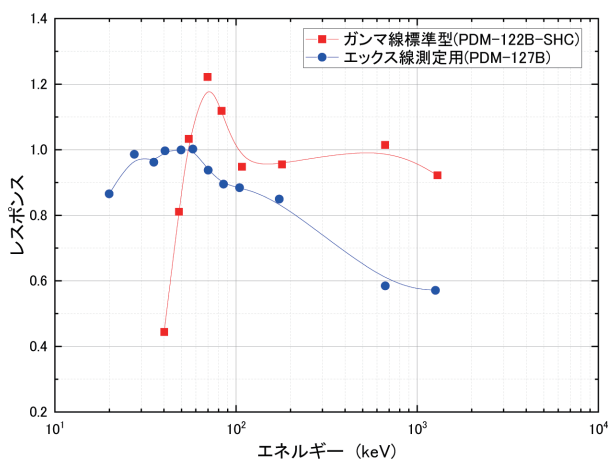


Fig. 4 Example of energy responses of electronic personal dosimeters. This was created by the author based on reference [16].

い。

個人線量計のエネルギー応答の観点から、放射線業務従事者は低エネルギーエックス線に対しても良好なエネルギー応答を示す線量計を用いることが望ましい。いずれにしても、過剰被ばく事故が発生した場合には、被ばく者の装着した個人線量計の指示値は、60 keV 以下のエックス線に対する応答を考慮して線量評価に用いられるべきである。

### 5. 線量換算係数について

エックス線場のモニタリングが実施される際には、実用量である周辺線量当量で線量（率）の測定が実施される。事故を含めた緊急時には、場のモニタリングの測定結果をもって被ばく線量の指標とし、被ばく医療を含めたその後の対応を検討することになる。場のモニタリングに用いられるサーベイメータの校正は一般的に  $H^*(10)$  で行われるため、指示値は  $H^*(10)$  で表示される。Fig. 5 は、実用量である周辺線量当量（率）は、1 cm 線量当量と 70  $\mu\text{m}$  線量当量に対する防護量の比の変化を示している。実用量は緊急時には個人の被ばく線量の推定値として用いられる場合もある。また、電離則によれば、被ばく線量は 1 cm 線量当量あるいは 70  $\mu\text{m}$  線量当量のいずれか高い値で代表することとなっており、被ばく源が低エネルギーエックス線の場合、1 cm 線量当量よりも 70  $\mu\text{m}$  線量当量の指示値の方が大きくなることが予想される。図から、70 keV 以下のエネルギーに対し実用量に対する防護量の比は減少していくが、特に 20 keV 以下から単位フルエンスあたりの線量当量に大きな差があることがわかる。

エックス線による場の線量（率）を正當に評価する

ためには、個人被ばく線量のよりよい推定値を与える  $H^*(0.07)$  で校正された、または別途  $H^*(0.07)$  で値付けされたサーベイメータを用いて線量（率）測定することが望ましい。このためにも、国家標準とのトレーサビリティを有する校正場での、サーベイメータ及び個人線量計のエネルギー応答特性を把握しておく必要がある。特に、わが国において広く普及した線量計については、これらのエネルギー応答特性に関して系統立てた知見がエンドユーザーに容易に入手できることが望ましい。また、現場の状況によっては、使用する線量計を低エネルギーエックス線校正場で校正して使用することが望ましい一方、わが国では低エネルギーエックス線校正場の利用が困難である。国家標準とのトレーサビリティを有する低エネルギーエックス線校正場またはそれに類する校正場の整備と普及が望まれるところである。

## IV 結 言

本稿ではエックス線被ばく事故検討ワーキンググループにおいて議論した、エックス線被ばく事故時の線量評価について検討内容及び課題を整理した。放射線輸送シミュレーションによる線量評価手法に加え、エックス線被ばく事故における生物学的・物理学的線量評価の各手法を適応する際の技術的な限界、及び各手法の課題についての整理が有効であることが確認されている。本稿では、特に物理線量評価の一つである放射線輸送シミュレーションによる被ばく線量評価の可能性と課題について取り上げた。放射線輸送シミュレーションにより、対象となるエックス線装置からの漏えいエックス線による被ばく線量を精度よく再現できる可能性が示された。加えて、エックス線被ばくの被ばく者の人体中线量分布は

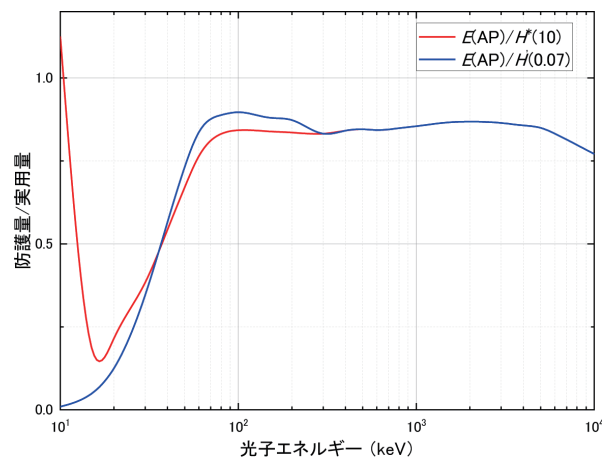


Fig. 5 Comparison of ratios of different occupational quantity to protection quantity.

評価可能であるが、正確な線量分布として評価を進めるには、被ばく源となるエックス線装置の、管電圧、管電流、フィルタの有無、エックス線管周辺の遮へい等の線源情報が不可欠である。

エックス線による事故に限らず、被ばく事故における被ばく者の線量は、被災者の治療方針を決定するために重要であるのみならず、放射線事故のインパクトを評価する上でも一つの指標となる。しかしながら、被ばく者の被ばく線量を事前に予測することは不可能であり、被ばくしたその時点で正確な線量をその場で直ちに求めることも極めて困難である。これらは、被ばく事故の状況を完全に再現できない点によるところが大きい。従って、放射線輸送シミュレーションコードを用いる線量評価であっても、線源情報・事故当時の被ばく者に姿勢等の被ばく事故状況に関する正確な情報を早急に入手することが不可欠といえる。

エックス線装置からのエックス線計測上の課題としては、1) 個人モニタリングに使用される電子式個人線量計の数え落としの課題、及び2) 個人線量計のエネルギー応答特性の課題が挙げられる。これらの課題を解決するために、理想的には、国家標準とのトレーサビリティを有するエックス線校正場での、サーベイメータ及び個人線量計のエネルギー応答特性を把握し、場合によっては使用する線量計を低エネルギーエックス線場で校正して使用することが望ましい。現状では、わが国においてパルスエックス線校正場は未整備であり上述の試験を行うことはできない。従って、1) 海外に整備済みの同種の校正場において、わが国で広く用いられている線量計について系統立てた試験を実施し、査読付論文等で利用可能とする、及び2) 放射線輸送シミュレーションによる低エネルギーエックス線に対する線量計応答を評価しておく、等の代替案は有効であろう。

## 謝 辞

本稿執筆にあたり、エックス線被ばく事故検討WG各委員より貴重なコメントをいただいた。ここに改めて感謝申し上げる。

## 利益相反の開示

本稿に関して、開示すべき利益相反状態は存在しない。

## 参 考 文 献

- 1) JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures (in Japanese). Available at: <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/>
- 2) Progress Report of Discussion on X-ray Exposure Accidents (in Japanese). Available at: [http://www.jhps.or.jp/upimg/files/progress\\_report.pdf](http://www.jhps.or.jp/upimg/files/progress_report.pdf), Accessed 22 March 2023.
- 3) Lu WEI, et al.; Physical dosimetric reconstruction of a radiological accident at Nanjing (China) for clinical treatment using thudose, *Health Phys.*, **113** (5), 327–334 (2017).
- 4) S. RUAN, et al.; Physical dosimetry reconstructions of significant radiation exposure at an industrial accelerator facility in Tianjin (China), *J. Radiat. Res.*, **61** (1), 82–89 (2020).
- 5) IAEA. IAEA-supported Nuclear Events Web-based System (NEWS). Available at: <https://www-news.iaea.org/EventList.aspx>, Accessed 12 December 2022.
- 6) T. SATO, et al.; Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55** (5–6), 684–690 (2018).
- 7) D. M. TUCKER, et al.; Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra, *Med. Phys.*, **18** (2), 211–218 (1991)
- 8) ICRP, 2009.; Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP*, **39** (2) (2009).
- 9) ICRP, 2020.; Adult mesh-type reference computational phantoms. ICRP Publication 145. *Ann. ICRP*, **49** (3) (2020).
- 10) YEOM, et al.; Posture-dependent dose coefficients of mesh-type ICRP reference computational phantoms for photon external exposures, *Phys. Med. Biol.*, **64** (7) 075018 (2019)
- 11) F. VANHAVERE, et al.; ORAMED: Optimization of radiation protection of medical staff. EURADOS report 2012-02 (2012).
- 12) “Hibakuiyou Shinryoutebiki” (2022), Shusansha Co., Ltd., Japan (in Japanese).
- 13) ICRP, 2003.; Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ ). ICRP Publication 92. *Ann. ICRP*, **33** (4) (2003).
- 14) NCRP, 2018.; Report No. 181—Evaluation of the Relative Effectiveness of Low-Energy Photons and Electrons in Inducing Cancer in Humans. ISBN 9781944888046 (2018).
- 15) D. LAURIER, et al.; Areas of research to support the system of radiological protection, *Radiat. Environ. Biophys.*, **60**, 519–530 (2021).
- 16) C. CLEMENT, et al.; Keeping the ICRP recommendations



- fits for purpose, *J. Radiol. Prot.*, **41** 1390–1409 (2021).
- 17) O. HUPE and P. AMBROSI; Ideas for type tests of electronic dosimeters in pulsed fields. Presentation in ORAMED workshop (2011).
- 18) S. FRIEDRICH and O. HUPE; Dose measurements in pulsed radiation fields with commercially available measuring components, *Radiat. Prot. Dosim.*, **168** (3), 322–329 (2016).
- 19) O. HUPE, et al.; Determining the dose rate dependence of different active personal dosimeters in standardized pulsed and continuous radiation fields, *Radiat. Prot. Dosim.*, **187** (3), 345–352 (2019).
- 20) PRODUCT: Personal dosimeters (in Japanese). Available at: <https://www.nippon-raytech.co.jp/radiation/dosemeter/>, Accessed 22 March 2023.
- 21) Luminess Badge Service Specifications (in Japanese). Available at: <https://www.nagase-landauer.co.jp/luminess/spec.html>, Accessed 22 March 2023.
- 22) ICRP, 2010; Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, *Ann. ICRP*, **40** (2–5) (2010).
- 23) ICRP, 1996; Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. *Ann. ICRP*, **26** (3–4) (1996).

## レポ ー ト

日本保健物理学会「エックス線被ばく事故検討WG」活動報告  
—第3分科会 情報の発信と水平展開の観点から—笠井 篤<sup>\*1,2</sup>, 川島 恒憲<sup>\*1,3</sup>, 辻本 忠<sup>\*1,4</sup>, 中村 美和<sup>\*1,5</sup>,  
橋本 周<sup>\*1,6</sup>, 山口 一郎<sup>\*1,7,#</sup>

(2023年5月26日受付)

(2023年9月11日採択)

Activity Report of JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures  
—Subcommittee 3: How to Roll Out Accident Prevention Initiatives to Stakeholders?—Atsushi KASAI<sup>\*1,2</sup>, Tsunenori KAWASHIMA<sup>\*1,3</sup>, Tadashi TSUJIMOTO<sup>\*1,4</sup>, Miwa NAKAMURA<sup>\*1,5</sup>,  
Makoto HASHIMOTO<sup>\*1,6</sup> and Ichiro YAMAGUCHI<sup>\*1,7,#</sup>

The third subcommittee mainly discussed how to disseminate information on X-Ray accidents and how to roll out accident prevention initiatives to stakeholders. There have been various discussions on the role of academic societies in accident response, which is still in the trial-and-error stage. As a representative example of accident response, the medical accident investigation system based on laws and regulations aimed at preventing recurrence was noted. In the study of issues related to this accident, the Japan Society of Health Physics and the Japan Radiation Safety Management Society attempted to collaborate, and it is hoped that such attempts will be expanded with the understanding and cooperation of more related societies. As support for industry by academic societies, the WG collaborated with the nondestructive testing industry to organize issues and propose countermeasures. Involvement of external organizations to support facilities is also effective, and one suggestion is to consider providing external evaluation services for safety activities in the future. Based on these studies, the WG has made interim reports on its activities at the Hobutsu Seminar 2021 and the Japan Society of Health Physics 2022 Symposium. It is important to actively exchange opinions among the parties concerned at these opportunities. It is also necessary to consider what the society can do and contribute to the effective utilization and wide deployment of information and findings on accidents collected from users by the Ministry of Health, Labor and Welfare and other organizations.

**KEY WORDS:** エックス線事故, 事故対応, 安全文化, 協働, 立入検査, 医療事故, 放射線安全.

\*1 (一社) 日本保健物理学会エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ第3分科会

Subcommittee 3, JHPS Working Group on Accidental X-ray Exposures.

\*2 元日本原子力研究所  
Retired, Japan Atomic Energy Research Institute.

\*3 東芝エネルギーシステムズ(株): 神奈川県横浜市磯子区新杉田町8 (〒235-8523)

Toshiba Energy Systems &amp; Solutions Corporation; 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 235-8523, Japan.

\*4 (特非) 安全安心科学アカデミー: 大阪府大阪市中央区南船場3丁目3-27 (〒542-0081)

NPO Reassurance Science Academy; 3-27, 3-chome, Minami-senba, Chuo-ku, Osaka-shi, Osaka 542-0081, Japan.

\*5 (公社) 日本アイソトープ協会; 東京都文京区本駒込2-28-45 (〒113-8941)

Japan Radioisotope Association; 2-28-45, Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8941, Japan.

\*6 (国研) 日本原子力研究開発機構大洗研究所; 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002 (〒311-1393)

Oarai Research &amp; Development Institute, Japan Atomic Energy Agency; 4002, Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan.

\*7 国立保健医療科学院生活環境研究部; 埼玉県和光市南2-3-6 (〒351-0197)

Department of Environmental Health, National Institute of Public Health; 2-3-6, Minami, Wako-shi, Saitama 351-0197, Japan.

# Corresponding author; E-mail: yamaguchi.i.aa@niph.go.jp

## I はじめに

2021年5月29日の日本製鉄(株)(兵庫)におけるエックス線被ばく事故が契機となり、(一社)日本保健物理学会に「エックス線被ばく事故検討WG(以降、WG)」が設置された<sup>1)</sup>。WGが2022年7月29日に公表した経過報告書では、今後の検討課題として、1.エックス線装置の規制、2.放射線の管理と品質マネジメントシステム、3.エックス線被ばくに関する線量評価、4.線量測定及び被ばく線量再構築時の課題、及び5.エックス線被ばくの放射線影響を提示した<sup>1)</sup>。経過報告書にて示された課題のさらなる検討を目指し、WGでは、①エックス線利用上の規制と現場管理(第1分科会)、②エックス線被ばく線量の測定と評価(第2分科会)、③事故に関する情報の発信と教訓の水平展開(第3分科会)、の3つの分科会を設け、議論・検討を進めた。

本資料は第3分科会での検討結果を軸にして、必要に応じて第1及び第2分科会が所掌する内容にも視点を広げ、まとめたものである。具体的には、情報の発信と教訓の水平展開を主たる論点として、WGのこれまでの活動、それを受けての第3分科会での検討方針の決定経緯を整理した。また、(一社)日本保健物理学会と、(一社)日本放射線安全管理学会を含むエックス線の利用や管理に造詣の深い学術団体を主な対象と想定して、専門家集団の果たすべき役割を、利用業界への支援、安全行政への支援、労働衛生マネジメントシステムの実装、事故事例や安全確保に関する取組みの公表と水平展開、ステークホルダー間での協力体制の構築の5項目で提言的にまとめた。

## II WG活動及び第3分科会での検討方針

本WG及び第3分科会の活動経緯を紹介する。

WG設置の契機となった事故について、メディアからの取材に応じて学会長がコメントを発している。学会内部に留まることのない、このような学会外への対応は、学会のその後の活動や将来の道筋を決定づける際に重要な意味をもつ場合がある。本WGに限らず、WG設置やその活動方針の決定プロセスに関して、関連の記録をアーカイブ化しておくことが望ましい。その点を考慮し、本WGではWG会合の議事録は原則公開するとの方針を決めた。また、WGでの議論で扱った情報を適切に共

有しアーカイブ化するために、学会誌の記事として残すこととした。この方針に基づき、「保健物理」誌における別に投稿された第1分科会、第2分科会の検討報告書記事に加えて、この第3分科会による本資料が位置づけられている。なお、WGの活動ではエックス線の利用や管理などに造詣の深い、関連する組織・機関からの情報提供や多大なる協力を都度いただいております、それらが本稿で紹介する第3分科会での検討成果にも大きく寄与している。特に、日本放射線安全管理学会からは、同学会から推薦された専門家2名にWG委員として参画いただき、また、同学会主催の企画行事では関連の特別セッション枠を用意いただくなど、同学会との強い連携に基づいたWG活動であったことをここで特記しておきたい。

WGや第3分科会の議論のなかで、当該事故の経緯の詳細や被ばく線量の情報がなかなか公表されない状況に対して、学会あるいはWGとしてどのように対応するかについてしばしば意見交換がなされた。

ある委員から、同業他社やエックス線装置の製造販売会社の協力を得てはどうか、との提案があった。これに基づき、委員長から、WGによる活動経過報告書の完成を機に、関係各所へのコンタクトを開始することについて提案があり、了承された(24回開催された内の第12回WG会合)。また、事故を経験した当該施設との直接的な接触を開始すべきとの意見もあった(第21回WG会合)。事故後、1年以上の期間が経過したにもかかわらず、事故当事者や規制当局からの情報公開状況に大きな進展が見られなかったこともあり、情報収集するための「関係各所」の範囲については、第4回WGで確認された「原則公開情報に基づく検討WGとしてのミッションを堅持」するとの方針に基づき、当該事故の関係者を除いた範囲での情報収集に留まらざるを得なかった経緯(第22回WG会合)がある。このようにWGと3つの分科会の活動は、主に公開された情報を基に、専門家としての知見を結集して整理されたものであることを承知いただきたい。

また、ある委員から、事故時の被ばく線量は事故の影響の範囲、対応や対策のための基礎情報になるものであるから、可能な限り事故を再現し、正確な線量評価を行う必要があるとの意見があった。当該事例に関しては、公式となる情報ではないものの、治療に当たった広島大学関係者による学会発表の場で、被ばく線量の具体的な値が紹介された。その発表では治療の過程に関する貴重な情報が提示されている<sup>2)</sup>ので注目に値する。

<sup>1)</sup> Available at: <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=87>, Accessed 19 May 2023.

一方、その線量の評価結果は、国際原子力機関（IAEA）の Nuclear Events Web-based System（NEWS）には反映されておらず、規制当局としては当該事故の被ばく線量の値を公表していない状況にある（2023年5月現在。そのまま、2年間の公開期間が終了した）。この状況に鑑み、主に第3分科会で当該事故の線量の扱いについて意見交換をした。ある委員の上記指摘にあるように、線量の評価は、事故時の対応の方針を決める目的、また、その後の水平展開に資するリスクマネジメントのための基礎情報としても重要な要素のひとつとなり、必須であることに疑いはない。一方、要求される線量評価の精度、確度については、その線量の値を何の目的で利用するかに応じて決めべきものなので、一概には指定することはできないであろう。本事例では適用されないが、RI規制法施行規則では計画外の被ばくがあった場合には、第二十八条の三の規定に基づき、施設側はその状況を当局に報告する義務がある。本事例で適用される電離放射線防止規則では、放射線業務従事者が受ける線量が線量限度を超えたときはその旨を所轄労働基準監督署長に報告する義務を事業主に課している（第44条）。事実、事業所ではこの規定に基づき迅速に対応し、報告を受けた監督省庁は、この事実を速やかに公表し業界に注意喚起している。なお、この情報を公表する義務はないため、集計されていないが労働災害の統計から現状を把握することができる。

しかし、施設にも当局にも、今回は何らかの背景でその報告値を国内外に公開できない厳しい事情があり、現在に至っているものと想像した。当該事例では、エックス線被ばくや環境の汚染が施設外の公衆や環境に及んでおらず、特定の作業者本人に限られていることから、WGでは、具体的な線量の情報が当該社内の問題として扱われることもあり得るだろうと整理した。一方、エックス線事故時における線量の評価は、技術的に容易ではなく、専門的な視点での論点もいまだ多いことがわっている。これを受けて第2分科会では、エックス線による被ばくに関する線量評価の具体的な方法について検討し、モンテカルロ計算シミュレーションを用いた方法をはじめとする計算や、個人や環境のモニタリングに基づく実測によるさまざまな線量評価手法のアプローチや、各評価手法の技術的な限界、及び各手法の課題について整理することとなった。

### III 専門家集団の果たすべき役割

#### 1. 利用業界への支援

2021年11月12日に開催された第10回WGに非破壊検査業界からの専門家を招き、エックス線利用業界周辺の関連情報を入手した。WGでの議論では、『（一社）日本非破壊検査工業会（正会員数198社）の放射性同位元素等安全管理委員会がエックス線発生装置等の安全管理を継続的に行っており、当該委員会との情報交換が重要』とされた。また、各種エックス線装置が産業現場で広く使われ、その普及がさらに進んでいる現状を踏まえて、課題を整理した。エックス線装置の導入時には、『装置の安全管理方法や操作方法が製造（販売）者からユーザーに情報提供』され、ハンドヘルド型エックス線装置の誤照射防止を含めて安全に配慮された設計となつてはいるものの『エックス線装置の定期点検について義務付けはなく、直接線の線量測定は別途依頼が必要』になっている現場実態が共有され、特に古い装置に関する安全管理上の脆弱性が示唆された。また『企業によって装置毎にカスタマイズするケース』がある場合には、専門家による追加的な安全対策上の支援が必要ではないか、との意見があった。国内で発生するエックス線に関する事故について業界団体としては『情報の集約をしていない』とのことで、さらに『エックス線装置使用者が安全管理者を兼任しているケースが多い』との説明に対して、業界全体や各施設における安全確保に関する組織体制の見直しの必要性も示唆された。たとえば、エックス線装置を扱う事業者の安全確保に対する自律的な意識の向上を促す目的で、安全活動に関する外部評価サービスを（専門家の支援を受けつつ）業界団体が提供する構造の構築は検討に値する。

その他、ある地方衛生研究所敷地内の環境モニタリングで、偶然にもエックス線が検出された事例が第19回WGで紹介された。このような事例はエックス線検診車や医療での放射性物質の利用に関わるものだけではなく<sup>3)</sup>、非破壊検査に関してもこれまでに報告があった<sup>4,5)</sup>。また、原子力事故後に放射線施設の存在とは無関係に地域での環境モニタリングが充実し、同様の放射線が観測された事例も知られている。話題は異なるが、現在、厚生労働省による雇用・労働総合政策において労働衛生・安全の観点でのより一層の可視化が進められており<sup>6)</sup>、放射線安全部門からも事例を提示することが望ましい。これら現場的なさまざまな事案を専門家集団が系統的に整理し広く社会に展開し、ステークホルダーがその対応方法も含めて認知できるようにしておくことは重要であろう。

安全確保の基盤となる従業員の安全意識の向上のため

に、まずは放射線リスクの認知を深める取組みも求められている。たとえば、日常業務に由来した放射線影響の例が提示されれば、自らの実施する業務におけるリスクを適切に認識することができ、安全性の向上に自らが努める取組が考えられる<sup>7,8)</sup>。施設メンバーに限ることなく、安全確保に関する意識について社会とのレベル合わせもリスクリテラシーの基盤づくりには有効で、たとえば施設見学の機会を充実させ、施設外の方々との意見交換する環境を専門家が支援することもできるであろう。

上述の検討を踏まえて、保物セミナー（2021年12月16日開催）や日本保健物理学会2022年度シンポジウム（2022年6月29日開催）において、本WGの活動成果を中間的な報告と位置づけて紹介した。このような機会を積極的に活用して、関係者間で情報や意見を交換することは知見や経験の水平展開の観点から重要である。また、第10回WGへの情報共有の機会がひとつの契機となり、本WGの活動の成果（経過報告書の内容）を一般財団法人電子科学研究所が発行する機関誌ESI-NEWSに転載した（2023年4月号掲載）。専門家集団としての活動成果が業界誌への展開の形で多くの施設責任者、現場管理者、エックス線ユーザーに直接に届くことは、大変に良い事例になったと考える。

## 2. 安全行政への支援

エックス線装置に関する追加的な規制整備については、内閣府総合規制改革会議による全国規模での規制改革要望に関する検討要請の実施における2003年度6月集中受付月間で、全国規模での関連する規制改革の文脈で要望された例がある。ここでは「現在、放射線審議会において、放射線を発生する装置における規制の免除の要件について検討されている状況にあることから、その検討を待ちたいと考えている。」と回答された。放射線審議会基本部会報告書「規制免除について（2003年）」に以下のような記述がある。「このBSSが規定する放射線を発生する装置における規制の免除要件の国内法令への取り入れについては、この要件の妥当性や国内での利用実態を考慮して検討する必要がある」。それ以降も日本の法規制においては、エックス線装置に対してIAEAの免除レベルは未だ取り入れられていない。専門家集団として、この観点での行政への何らかの支援ができるかもしれない。エックス線利用に限らず、放射線規制や管理はリスクベースでの合理的なものとするべきであり、たとえばIAEAの文書体系でも提示されているグレーデッド・アプローチを適切に適用すべきであることから、第

1分科会でまとめられた専門家への提言をここでも推奨する。

## 3. 労働安全衛生マネジメントシステムの社会実装

業種や生産工程の複雑化などで労働災害の原因も多様化し、特別規則で規制することが難しくなっている背景から、一定の危険・有害な機械・化学物質のリスクアセスメントの実施が求められることとなった。機械設備に関しては、「機械の包括的な安全基準に関する指針」（平成19年7月31日付基発第0731001号）により、機械による労働災害を防止するための必要な措置が求められている。また、機械の設計・製造段階及び使用段階において、機械の安全化を図ることを目的に機械ユーザーがリスクアセスメントを実施し、安全設計や防護を施してなお残る使用上のリスク（残留リスク）情報をユーザーに提供することが義務化されている。さらに、利用するユーザー側もリスクアセスメントを実施し、必要な保護方策・対策、作業手順の作成や教育訓練の実施等が努力義務として求められている。

この観点からはユーザーによるリスクアセスメントが機能していたかが問われ、行政機関による監視も機能していたかどうかの検証が求められている。これらのプロセスで、業界全体としての相互協力が不可欠であり、専門家による支援も効果的かもしれない。

ここで労働安全衛生マネジメントのあるべき姿を具体的に検討するための他分野での事例として、医療事故調査制度を紹介する。本制度は地域における医療及び介護の総合的な確保を推進するための関係法律の整備等に関する法律に基づくもので、警察や労働基準監督署による捜査とは根幹となる考え方が異なる。つまり、責任追及ではなく医療の安全の確保の観点からの再発防止を目的とし<sup>2</sup>、当該医療機関が自主的に医療事故を調査する。調査の対象となる事故はその医療機関が自ら選定する。被害者の直接的な被害救済を目的とせず、この調査の対象になるかどうかは被害者の直接的な意向は関係しない。調査の対象にするかどうかの判断においては、事故が事前に予期されていたものかどうかのポイントになる。この観点は、本WGで当該エックス線被ばく事故が、過去の知見の範囲で予想できたものなのかを重視した検討経緯とも合致する。

この医療機関等の活動を支援する仕組みとしては、参

<sup>2</sup> 厚生労働省の「医療事故調査制度に関するQ&A」で詳細が説明されている。

議院厚生労働委員会（平成26年6月17日）で決議された「中立性・専門性が確保される仕組みの検討を行うこと」に基づき、医療事故調査等支援団体が用意された。「地域における医療及び介護の総合的な確保を推進するための関係法律の整備等に関する法律の一部の施行（医療事故調査制度）について」（平成27年5月8日医政発0508第1号）に、「支援団体となる団体の事務所等の既存の枠組みを活用した上で団体間で連携して、支援窓口や担当者を一元化することを目指す。」とある。エックス線の利用業界においても、同様な役割をもつ仕組みがあつてよいだろう。繰り返しになるが、専門家として業界、行政への支援、働きかけを検討しても良い。

#### 4. 事故事例や安全確保に関する取組みの公表と水平展開

事故事例の公表方法は多様である。原子力規制委員会のホームページには、事故トラブル事例を報告するページがあり、概要報告、原因と対策、リスク評価などが一連の情報が掲載されている。しかし、分析が十分でなく本質的な原因への対応を踏まえていないと考えられる例があり<sup>9)</sup>、その課題への指摘<sup>10)</sup>や事実関係の把握が適切ではないとされる例<sup>11)</sup>もみられ、この部分に専門家集団としての支援、貢献ができる可能性がある。一方、経過報告書でも挙げたとおり厚生労働省は、「職場の安全サイト」で事故の分類ごとに定式化し、重要なポイントを解説し、事故防止に役立つ資料を提供している。また、労働安全衛生総合研究所が災害調査報告書を発行しているが、残念ながら本報告書には電離放射線曝露に伴う事例は収載されていない<sup>12)</sup>。一点、これらは事故の発生日時や状況などが詳細かつ迅速に掲載されるものではないが、当該事故については厚生労働省の動きは比較的早く、事故の報告を受けた後に直ちに業界に対して通知による注意喚起をしている。また、2021年11月から2022年2月にかけてエックス線装置を扱う鉄鋼業者などおよそ300の事業所を対象にして、安全管理の実態を調査している。このような調査の結果を活用して、専門家集団は現場管理視点、規制の視点の双方から、何らの貢献ができるはずである。総務省では厚生労働省等からの情報を分析し、問題点を指摘した上で、今後の取り組みの方向性を示している<sup>13)</sup>。専門家集団は、この勧告に沿った関係者への支援もできるであろう。

上記のような事故の教訓から学ぶとの考え方は、失敗には原因があるという発想に基づく。留意すべきは、事故の原因はいつも単純であるとは言えず、複雑な要因で

あつたり、根本的で構造的な問題が背景に隠れていることもある点にある。また、失敗からの学びに執着すると有害事象が実際に起きるまでは、何も行動しないという選択肢をとることにもなりかねない。つまり、過去の事故の経験を再発防止につなげるという発想とプロセスには限界があることも関係者は認識しておく必要がある。異なる観点として、成功事例から学びを深めることも重要であろう。この観点からは関係者のパラダイムシフトも求められ<sup>14)</sup>、レジリエンス・エンジニアリング<sup>15)</sup>の考え方の普及も、重要である。

#### 5. ステークホルダー間での協力体制の構築

個人や一組織による献身や努力のみでは安全の確保に限界がある。WG活動経過報告書でも指摘したように、国や専門家集団としての関連学会は利用業界と相互のコミュニケーションを図り、協力関係を構築していくことが大切である。専門家集団がその動きを支援し、牽引することが望まれる。

事故トラブルではないが、学校教育現場におけるエックス線に関する比較的新しい話題として、2021年度施行の中学校理科学校指導要領「真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること」という内容が、安全上の論点のひとつになっている。現場の教員は極めて多忙で、かつ予算も極めて限られている背景で、エックス線の発生を伴う電子の実験に、安全管理上のリソースを割きにくい現状があることを経過報告書のなかで指摘した。学校組織としての対応も必要であろうが、教育現場が抱える問題は放射線リスクだけではないため、出前授業などを通じた専門家のサポートは不可欠であろう。本件に留まることなく、エックス線の発生やその利用に付随したさまざまなステークホルダーが有する課題を吸い上げ、専門家集団に対するニーズを系統的に整理するような調査、検討を、関係者の協力を得つつ推進することも重要だと考える。

## IV ま と め

令和4年7月末に公開したWG活動経過報告書にて示された課題のさらなる検討を目指し、WGは3つの分科会を設け、議論・検討を進めた。本資料は、第3分科会での検討結果をまとめたものであり、情報の発信と教訓の水平展開を主たる論点とし、WGのこれまでの活動、それを受けての第3分科会での検討方針の決定経緯を整理し、また、専門家集団の果たすべき役割を提言的にまとめた。

当分科会としては、専門家集団にはエックス線の利用業界や安全行政へのきめ細かな支援が期待されていると結論したい。事故事例や安全確保に関する取組みの公表と水平展開には関係者の努力が不可欠で、労働衛生マネジメントシステムの実装も必須である。そのためには、ステークホルダー間での協力体制を構築することが重要となり、専門家集団たる日本保健物理学会、日本放射線安全管理学会をはじめとする団体が果たす役割は大きいと考える。本資料のみならず、第1分科会、第2分科会による資料、解説も併せて参考にして、学会等がもつ機能を十分に活用し、各方面への支援、協力の活動を推進したい。

### 謝 辞

本WGの活動において（一社）日本非破壊検査工業会（第10回エックス線被ばく事故検討WG）と千葉県環境研究センター（第19回エックス線被ばく事故検討WG）の協力を得た。また、本分科会での議論は（一社）日本保健物理学会エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ全体の支援を受けた。

### 利益相反の開示

本論文に関して、開示すべき利益相反の情報はない。

### 倫理的配慮

本WGの活動において研究倫理審査が必要な調査は行っていない。

### データの利用可能性に関する説明

本WGにおける会合の議事要旨と会合で用いた資料は（一社）日本保健物理学会のサイトに掲載されている。

### 参 考 文 献

- 1) 日本保健物理学会；エックス線被ばく事故検討WG, 経過報告書, 2022.
- 2) 小國萌乃佳, 原正高, 蔭田和貴, 辻美香, 小川史織, 國廣龍雄, 森重水貴, 宮本聡史, 大下慎一郎；高気
- 3) 三関詞久, 富士栄聡子, 小西浩之, 斎藤育江, 守安貴子；東京都健康安全研究センター研究年報, **71**, 241-246 (2021).
- 4) 森好平, 勝間孝；香川県環境保健研究センター所報, **18**, 54-64 (2019).
- 5) 小浦利弘, 宮川茂樹, 東海林寛史, 河野隆史, 中谷光；石川県保健環境センター研究報告書, 42-46 (2016).
- 6) 厚生労働省；賃上げ・人材活性化・労働市場強化]雇用・労働総合政策パッケージ, 2022. Available at: [https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage\\_28838.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_28838.html), Accessed 24 March, 2023
- 7) 浅利享, 和田簡一郎, 熊谷玄太郎, 田中直, 石橋恭之；整形外科医師における放射線職業被曝に関する実態調査—自己記入式アンケート調査からの検討, 臨床整形外科, **55**, 121-125 (2020).
- 8) 三浦富智；整形外科医の超局所慢性被曝による染色体異常, 臨床整形外科, **55**, 109-113 (2020).
- 9) 文部科学省；陽電子断層撮影法に用いられる放射性同位元素を製造する放射線発生装置及び合成装置に係る安全管理の徹底に関する通知の発出について, (2008).
- 10) 榎本和義；日本放射線安全管理学会誌, **8**, 37-38 (2009).
- 11) 原子力安全委員会；第4回放射線防護専門部会速記録, Available at: [https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3533051/www.nsc.go.jp/senmon/soki/bougo/bougo\\_so004.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3533051/www.nsc.go.jp/senmon/soki/bougo/bougo_so004.pdf), accessed 24 March, 2023.
- 12) 労働安全衛生総合研究所；災害調査報告書, Available at: [https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/saigai\\_houkoku.html](https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/saigai_houkoku.html), accessed 24 March, 2023.
- 13) 総務省行政評価局；労働安全等に関する行政評価・監視結果報告書, (2007).
- 14) 小松原明哲；安全工学, **56**, 230-237 (2017).
- 15) 中島和江；*Japanese Journal of Endourology*, **30**, 54-60 (2017).

## 報告

### 第1回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同シンポジウム印象記

山田 椋平\*<sup>1, #</sup>, 玉熊 佑紀\*<sup>2</sup>,  
桑田 遥\*<sup>3</sup>, 三枝 裕美\*<sup>4</sup>,  
渡邊 裕貴\*<sup>5</sup>, 廣田 誠子\*<sup>6</sup>,  
金 千皓\*<sup>7</sup>, 蔡 宇\*<sup>7</sup>

#### 1. はじめに

2023年6月29日と30日の2日間にわたり、第1回日本保健物理学会・日本放射線安全管理学会合同シンポジウムがオンライン (Zoom Webinars) で開催された。近年の (一社) 日本保健物理学会 (JHPS) の研究発表会は11月ないし12月に開催されることから、シンポジ

Ryohei YAMADA, Yuki TAMAKUMA, Haruka KUWATA, Yumi SAIGUSA, Yuki WATANABE, Seiko HIROTA, Qianhao JIN and Yu CAI; Impressions of the 1st Joint Symposium of Japan Health Physics Society and Japanese Society of Radiation Safety.

\*<sup>1</sup> 弘前大学被ばく医療総合研究所; 青森県弘前市本町 66-1 (〒036-8564)

Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University; 66-1 Honcho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan.

\*<sup>2</sup> 長崎大学放射線総合センター; 長崎県長崎市坂本1丁目 12-4 (〒852-8523)

Center for Radiation Research and Education, Nagasaki University; 1-12-4 Sakamoto, Nagasaki-shi, Nagasaki 852-8523, Japan.

\*<sup>3</sup> 弘前大学大学院保健学研究科; 青森県弘前市本町 66-1 (〒036-8564)

Hirosaki University Graduate School of Health Science; 66-1 Honcho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan.

\*<sup>4</sup> (国研) 量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所; 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

Institute for Radiological Science, National Institutes for Quantum Science and Technology; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan.

\*<sup>5</sup> (国研) 日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所; 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194)

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Japan Atomic Energy Agency; 4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

\*<sup>6</sup> 広島大学原爆放射線医科学研究所; 広島県広島市南区霞 1-2-3 (〒734-8553)

Research Institute of Radiation Biology and Medicine, Hiroshima University; 1-2-3 Kasumi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 734-8553, Japan.

\*<sup>7</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科; 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 (〒277-8563)

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo; 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8563, Japan.

# Corresponding author; E-mail: yamada.ryohei@hirosaki-u.ac.jp

ウムの開催時期は定時社員総会の日程に合わせた6月が慣例化している。さらに今年度は、吉田浩子前会長 (東北大学) の発案により、(一社) 日本放射線安全管理学会 (JRSM) との合同で開催するに至った。このような慣例化や合同開催、またはセッション内容への関心の高さのおかげか、事前登録者数は約240名かつ2日間合計の参加者数 (重複含む) は378名となり、前年度比約1.7倍という盛況なシンポジウムとなった。開催にあたっては、JHPS及びJRSM両学会の企画委員会から実行委員を選出し準備を進めてきたが、盛況なシンポジウムとなったことは実行委員の一人として大変嬉しく思う。

本シンポジウムでは、JHPSとJRSMの合同企画や学会ごとの企画による計8つのセッションが設けられた (第1表)。JHPS-JRSM合同セッション及びJRSMセッションでは、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則 (以下「RI法施行規則」という。) に基づき2023年10月から施行される測定の信頼性確保に関する対応や、2021年に発生したエックス線被ばく事故に関する検討ワーキンググループ (WG) の活動に係る報告等がなされた。また、JHPSセッション (若手を含む) では、東京電力ホールディングス (株) 福島第一原子力発電所 (以下「1F」という。) からの処理水が海洋放出されることから注目されている「トリチウム」の放射線防護や、国際放射線防護委員会 (ICRP) の次期主勧告を見据えた内容等について取り扱い、当該分野の専門家から報告ないし講演いただいた。

そこで本稿では、ショートセッションを除く各セッションの概要について、当該分野に関わっている若手研究者・技術者より経験等を活かしながら所感を交えて紹介いただいた。また、ショートセッションについては実行委員である筆者より所感を交えて紹介したい。

(山田 椋平)

#### 2. 各セッションの印象

##### (1) JHPS-JRSM合同セッション1「RI施設における放射線管理を目的とした測定の信頼性確保に関する専門研究会 (最終報告)」

本セッションでは、JHPSの「RI施設における放射線管理を目的とした測定の信頼性確保に関する専門研究会」の最終報告として同専門研究会の目的及び活動報告がなされた。

まず、黒澤忠弘氏 ((国研) 産業技術総合研究所) から同専門研究会の設立の経緯が説明された。原子力規制委員会は2016年1月に国際原子力機関 (IAEA) の総合



第1表 第1回 JHPS-JRSM 合同シンポジウムのセッション一覧

6月29日(木)
【JHPS-JRSM 合同セッション1】RI施設における放射線管理を目的とした測定信頼性確保に関する専門研究会(最終報告)
【JHPS-JRSM 合同セッション2】学会連携WG
【JHPS セッション1】環境中トリチウムの放射線防護に関する専門研究会(最終報告)
【JHPS セッション2】「土壌分配係数の試験方法に関する手順書」評価委員会(活動報告)
【JHPS 若手セッション】ICRP次期主勧告の理解を深める—ICRP/ICRUによる新しい実用量—
6月30日(金)
【JRSM セッション】法令改正に向けた放射線測定器の点検・校正への対応状況
【JHPS セッション3】被ばくのカテゴリーと被ばく状況に関する検討委員会
【JHPS-JRSM 合同セッション3】エックス線被ばく事故検討WG

規制評価サービス(IRRS)を受け、「政府は、規制機関に対し、職業被ばくと公衆被ばくのモニタリング及び一般的な環境のモニタリングを行うサービス提供者について許認可または承認のプロセスの要件を定め、許認可取得者がそれらの要件を満たしていることを確認する権限を与えるべきである。」という勧告を受けた。これを受け、原子力規制委員会は2020年9月11日にRI法施行規則を改正し、同法に基づく測定信頼性に関し、許可届出使用者等に対して新たな規制要求を行うことになった。この改正により新たに実施することとなる「点検及び校正」について、現場で放射線管理を行う者がどのように解釈し、現場の管理状況に合わせた無理のない対応について検討することを目的として2021年4月に同専門研究会が立ち上げられ、放射線施設の現状及び活用可能な規格類の調査を実施した旨が説明された。

次に牧大介氏(大分大学)から同専門研究会において実施した調査検討の活動概要の報告及び専門研究会報告書の概要説明があった。同専門研究会では、①全国の放射線施設に対して所有する放射線測定器の種類及びその点検・校正方法といった現状のアンケート調査及び②放射線測定器の関連する日本産業規格(JIS)を中心とした規格類の調査及び分類を実施した。

アンケート調査は、複数の学協会や機関誌を通じて、Google Formsを用いて以下に示す項目について調査を実施した。

- 1) 各事業所で放射線施設の管理に用いている放射線測定器の種類
- 2) 1)の放射線測定器に関する点検・校正方法及び頻度
- 3) 2)で用いる線源や治具等のトレーサビリティ等

アンケートの結果、放射線施設における測定器の点検及び校正に関して、全ての測定器で何らかの点検・校正が実施されている割合は50%を超えるが、水モニタや

ガスモニタのような大型機器は、点検・校正されていない割合が20%以上であったことが分かった。また、測定器の点検及び校正に使用する線源のトレーサビリティが取れていないという回答も多く目立った。特に教育機関では点検及び校正を未実施、または点検及び校正の実施方法を文書化していない機関が多く存在したこともわかり、今後各施設の状況に応じて対応が必要であると思われる。

次に専門研究会が既存の規格類の調査し、点検または校正のどちらに対応するのか分類した結果の例がいくつか紹介された。既存の規格類ではトレーサビリティやその他各事業所では対応が難しい要求事項があるため、規格に沿った点検及び校正を事業所で実施するのは難しいことが予想される。したがって、各事業所の財政等の状況に応じてメーカーや外部校正機関を利用する方が無難であり、放射線管理に必要な機器を見極めることが重要であると報告された。筆者の施設でもガスモニタなどの大型機器を複数台使用しており、今後本当に管理に必要な機器を取捨選択する必要があると感じた。

(玉熊 佑紀)

## (2) JHPS セッション1「環境中トリチウムの放射線防護に関する専門研究会(最終報告)」

JHPSでは放射線防護のための取り組みとして2021-2022年度の2年間にわたり、「環境中トリチウムの放射線防護に関する専門研究会」が開かれてきた。東日本大震災による1F事故の廃炉作業に伴い、トリチウムを多量に含む多核種除去設備(ALPS)の処理水が近年問題となっている。2022年4月には日本政府によってこのALPS処理水を海洋へ放出する方針が決定され、2023年の夏ごろに放出予定であることが発表された。そのため、国内外においてALPS処理水が海洋へ放出されることによる環境及び生態系への影響が懸念されており、トリチウムに対する関心が社会的に高まっている。同専門

研究会では、トリチウムの化学形態別の環境影響や、基準とする濃度レベル及び分析の問題等について整理するため、さまざまな議論が行われてきた。本セッションでは、(公財)環境科学技術研究所の柿内秀樹氏よりこれまでの活動報告としてまとめた内容について解説いただいた。

一般的にトリチウムはセシウム等の放射性核種と比較しても被ばくの影響が極めて小さいものの、ベータ線を放出するため被ばく線量評価を行うことが重要である。トリチウムは水素の同位体であるため、水素原子が存在するあらゆる場所に存在する。そしてトリチウムは化学形態によって被ばく影響が異なることから化学形態別にモニタリングを行い評価しなければならない。さらにトリチウムは天然起源、大気圏内核実験起源、原子力関連施設起源のものが存在し、それらを考慮することが必要である。

日本における原子力施設からの排水基準として60,000 Bq/Lが示されているが飲料水等におけるトリチウムの基準値はない。一方、海外では飲料水の規制基準として世界保健機関(WHO)において10,000 Bq/L、アメリカで760 Bq/L、欧州連合(EU)で100 Bq/L、オーストラリアで76,000 Bq/L(1 mSv/y相当)といったそれぞれの国や機関の方針で決められた規制値がある。そして東京電力ではALPS処理水を排水基準の40分の1にあたる1,500 Bq/L以下で排水するとの計画がある。そこでこれから飲料水の基準やモニタリングのための濃度基準を設定する上では、線量として考えた際に、どこまでの濃度レベルを目標とし、どの程度の分析時間を許容できるか、どの程度の前処理及び精度管理が必要なのかを示すことの重要性が述べられていた。目標とする濃度レベルによって供試料量や分析時間が異なるため、それらを考慮することが重要である。

今後はこれまでの活動を解説記事として発表することで、これまで整理されていなかったトリチウムの被ばく影響、線量評価、分析手法、移行研究等の課題についてまとめ、トリチウムの理解へと繋げたいと考えている旨が話されていた。

同専門研究会を通しまとめられたものが、一般の方々のトリチウムへの理解や、風評被害を防ぐとともに人々の安心安全に繋がることに期待したい。さらに、国内外でも少ないトリチウムの研究者が増え、トリチウムの移行挙動に関する研究が進展することにも期待したい。

(桑田 遥)

### (3) JHPS 若手セッション「ICRP 次期主勧告の理解を

### 深める—ICRP/ICRUによる新しい実用量—

JHPS 若手研究会はICRP 次期主勧告の理解を深めるために、学術集会に伴って勉強会を開催している。2022年に若手研究会員の関心を把握するためのアンケート調査を実施し、関心が高いテーマである「環境に対する放射線防護」及び「放射線防護と安全の最適化」に焦点を当てたシンポジウムを開催した。今回も昨年度と同様にICRP 次期主勧告の理解を深めるため「新しい線量体系」に関するシンポジウムを開催した。

今回のシンポジウムでは、「新しい実用量の概要」と「校正及び医療の現場で新しい実用量を受け入れた場合の問題点」をテーマとして取扱った。

「新しい実用量の概要」では、国際放射線単位測定委員会(ICRU)がICRPと合同で発刊した実用量の定義変更を勧告する報告書(ICRU Report 95)を基に説明された。最も大きな変更点として、実用量の定義が人体ファントムを用いて評価された値になる旨の説明があった。新しい定義で評価を行うと、放射線の入射角によって現在の定義で評価される値から大きく変化することが問題提起された。「新しい実用量を受け入れる場合の問題点(校正場、線量計)」では、現在の実用量と比較して新しい実用量を受け入れた場合の評価値の変化及び今後の新しい定義を受け入れるための検討事項について説明された。放射線の種類、エネルギー、照射角度等の被ばく状況を仮定することで、新しい実用量を適用した場合の影響を予測することができ、新しい定義の受け入れの検討に有用である旨の報告があった。「新しい実用量を受け入れる場合の問題点(医療従事者)」では、医療従事者が新しい定義を受け入れた場合に影響の大きい低エネルギーの光子に被ばくする可能性が高いと報告があった。更に医療従事者の被ばくの状況について診断及び治療の手法ごとに詳細な説明があった。

当該セッションでは、新しい定義を受け入れた場合に最も影響が大きいと想定される医療者について、被ばく状況の典型例を仮定した場合に新しい実用量を適用した場合の影響の予測が可能であることが示唆された。

(三枝 裕美)

### (4) JRSM セッション「法令改正に向けた放射線測定器の点検・校正への対応状況」

本セッションでは、2023年10月のRI法施行規則の改正に向けて、各施設の先行的な取り組みが報告された。この背景として、2020年9月、原子力規制委員会がRI法施行規則の一部改正を承認し、改正内容が公布されている。「測定の記録等」に関する規定は公布日に施行さ

れたが、そのうち「測定の信頼性確保」に関する規定は2023年10月1日に施行されることとなった。この「測定の信頼性確保」については、これまで明確な要求はなく、各RI事業所の自主的な取り組みに委ねられていたが、今回新たな法令要求として明確化されたものである。現在、全国のRI事業所において2023年10月のRI法施行規則改正に向けた対応が進められている。

先行的な取り組みとして、阿保憲史氏（北海道大学アイソトープ総合センター）、小坂尚樹氏（東京大学アイソトープ総合センター）及び谷正司氏（大阪府立病院機構大阪急性期・総合医療センター）の3名から、各施設における放射線測定器の点検・校正の状況、点検項目の設定・整理等の事例について報告いただいた。はじめに、阿保氏から北海道大学アイソトープ総合センターの取り組みについて報告があり、RI法施行規則改正を反映した放射線障害予防規程を2023年4月から運用し始めている。点検・校正の運用として5年周期で実施項目を整理しており、測定器の種類で詳細な点検内容は異なるが、初年度はメーカーによる点検・校正を実施し、その後は毎年、確認校正（機能確認）を行うとのことであった。また、3Dプリンタを用いて開発した機能確認用線源治具についても紹介があった。次に、小坂氏からは、東京大学アイソトープ総合センターの取り組みについて報告があった。学内の他事業所の参考となるように先行して欲しいとの依頼があり、2023年4月に放射線障害予防規程を改定したとのことである。また、下部文書の細則において、事業所での点検頻度を1年ごと、メーカー等の点検・校正を5年ごとと定めている。RI法上の放射線測定器にはハンドフットクロスモニタなどは含めず、1年ごとに点検を実施するものの、汚染が除染できない場合にはGM管式サーベイメータの測定結果で表面密度を評価し記録を残すなど、運用上の整理がなされていた。さらに、他事業所にも参考となるように各放射線測定器の点検手法をYouTubeで公開しているとのことであった。最後に、谷氏から医療機関の取り組みとして、大阪府立病院機構大阪急性期・総合医療センターの取り組みについて報告があった。前述の2施設とは異なり、医療機関では医療法に基づく設備とRI法に基づく設備がそれぞれ存在し、RI法関係ではリニアック（放射線治療装置）、子宮頸がん治療用 $^{192}\text{Ir}$ や前立腺がん治療用 $^{125}\text{I}$ などが挙げられていた。このように医療機関では医療法とRI法が混在しており、院内の放射線診療従事者の内訳としても医療法に係る人数が690名であり、そのうちRI法に係る人数は30名程度と非常に少ない印象で

あった。また、医療法での要求事項として、JIS規格に基づく放射線測定器の点検・校正がすでになされており、今回のRI法施行規則改正に伴う影響が小さいことが伺えた。

本セッションはフロアからの関心も高く、ZoomのQ&A機能を用いた質疑応答でも議論が活発になされていた。特に、校正時の測定回数、線源設置箇所と検出器の位置関係などの実務的な内容について質問されており、先行して検討を行った演者らからは、指針となる考え方が多く示されていた。現在、RI法施行規則改正に向けて具体的な対応が検討されている中で大変有意義なセッションであった。

最後に、筆者が所属する研究所は原子力事業者にも該当するが、原子力事業者は原子炉等規制法で要求され、放射線測定器の点検・校正がなされている。この点、医療法に係る医療機関と近いのだと感じた。

（渡邊 裕貴）

#### (5) JHPS セッション3「被ばくのカテゴリーと被ばく状況に関する検討委員会」

本セッションでは委員会幹事である犬飼裕司氏（株）千代田テクノル）の司会の下、委員長である杉浦紳之氏（株）千代田テクノル）より報告がなされた。まず、この臨時委員会は、1Fの事故を受け、この事故に関連する課題に対して経験を伝えていく必要性から発足したということが述べられた。特に、事故時に起きた混乱は、防護体系のコンセプトが社会的に受け入れられてなかったことによる部分が大きく、中でも現存被ばく状況という考え方は広く一般の人に疑問や不安を呼び起こしたため、被ばくカテゴリーおよび被ばく状況に応じて問題点を整理する必要が出てきたというのが理由である。そのため、委員会のメンバーは福島事故への対応を経験してきた者を多く含めるような構成になっている。次に、検討の方向性として、福島事故においてどの状況にどう防護原則が適用されたかを拾い上げ、問題点を洗い出し解決策を考えていく形で検討が進められている旨が語られた。これまでに、①緊急時にはALARAの観点から作業に対する計画線量が事故前の1-2 mSvより引き上げられ、ALARAチームの確認が必要となるのは12 mSvを超える場合、所長の承認が必要となるのは18 mSvを超える場合となったこと、②事故の収束に向けた道筋ステップ2の完了した2011年末ごろを境に被ばく状況が緊急時から現存に変わったことに伴って作業者の線量管理はICRP2007年勧告に従って現存被ばくより計画職業被ばくの一部として行われるようになったこと、③作業

中の内部被ばく防止のために着用していたマスク等の装備が、作業が進むにつれて簡易なものへと変わっていったこと、④放射線業務従事者ではない消防士や警察官、医療従事者、バスの運転手といった「対応者」へ作業に応じた参考レベルを設定したことといった事柄において、当時の状況の確認と整理が進められた。そして、「基準や目標とする線量が設定され、そこに向けて下げる努力をしていく」という防護のコンセプトが、なかなか理解されず、とりわけ現存被ばく状況における公衆被ばくにおいてはそれが顕著であると考えられた。暫定的な結論として説明の方法に改善の余地があると考えられている。質疑応答の時間にはステークホルダーや公衆へのリスクコミとして個人による線量測定やそれをもとにした評価の結果を活用することがヒントになる可能性があるのではという指摘もなされ、委員会としてもそれにまつわるこれまでの体験を今後整理し、検討していくことがもっと必要であると考えている旨の回答がなされた。

(廣田 誠子)

#### (6) JHPS-JRSM 合同セッション3「エックス線被ばく事故検討WG」

2023年3月に「日本保健物理学会エックス線被ばく事故検討WG」の活動が終了した。2021年5月29日に発生した日本製鉄(株)(兵庫)でのエックス線被ばく事故の社会的な重要性を考慮して同WGは設置され、事故の背景や経緯、線量評価、健康影響などの情報を収集してきた。また、エックス線の利用に関する幅広い視点から管理上の問題点や課題を整理し、今後の対応方針を明確化する活動となった。

本セッションは、WGの下でより深い議論を重ねてきた3つの分科会(第1分科会「エックス線利用上の規則と現場管理」、第2分科会「エックス線に関する被ばく線量の測定と評価」、第3分科会「放射線事故に関する情報の発信と教訓の水平展開」)から、各活動の成果が報告され、各業界の専門家(安全行政、利用業界、安全管理)の立場からの意見が共有された。また、セッションの最後には活発な総合討論が行われた。

本印象記は、前半部分(3つの分科会からの報告)を金千皓が担当し、後半部分(専門家の立場からの意見)を蔡宇が担当した。参加者として、また環境安全マネジメントを専攻する博士課程大学院生としての両著者からの感想、印象を付加した。

(金 千皓, 蔡 宇)

#### ①セッション前半(3つの分科会からの報告)について (i) 第1分科会「エックス線利用上の規則と現場管理」

#### からの報告

(国研)日本原子力研究開発機構の五十嵐悠氏から、第1分科会では以下の3つの対象について議論したことが紹介され、主に「エックス線利用上の規則と現場管理」の問題点と潜在的な課題に関する提案と提言が紹介された。

#### a) 分野・装置の特徴別に整理された代表的なエックス線事故・トラブル例の紹介:

産業用、研究用、医療用のエックス線装置における被ばく事例から、安全意識の低下、エックス線に関する十分な理解の欠如、安全文化の醸成・定着の困難さ、ヒューマンエラーなどの問題点が紹介された。

#### b) 共通項目と分野特有の各視点での論点整理:

エックス線の被ばく事故や装置の不適切な管理に関連した現状において、施設や装置の管理者、ユーザー、装置管理者に対する教育、安全規則の理解と安全文化の問題点が存在していることが説明された。また、エックス線の安全利用を支援するためには、組織体制と責任の明確化、教育・人材育成、エックス線装置の届出や点検に関する法的位置づけの明確化、安全文化の醸成に関する支援の仕組みの構築が必要との主張があった。

#### c) 課題解決に向けた専門家集団への提案・提言のまとめ:

安全文化の醸成を含めた教育・訓練の強化、適切な環境整備の推進、専門家集団や学会との連携活動の強化などが提案された。

筆者は、この講演から第1分科会の成果をよく理解することができ、適切な提案と提言がまとめられていると感じた。現状の潜在リスクや問題点を詳しく解明することが重要であり、地域や企業、組織の規模による安全規則と安全管理の実現の違いを考慮し、法的な管理と実際の状況に応じた対応につき、その両方を推進することが望ましい。重大な事故を予防するためには、ハインリッヒ法則を理解し、軽微な事故やヒヤリ・ハットの事例を報告・記録し、事故予防・回避に関する議論を行い、安全文化を醸成することが重要である。

#### (ii) 第2分科会「エックス線に関する被ばく線量の測定と評価」からの報告

(国研)量子科学技術研究開発機構の古渡意彦氏より、「エックス線に関する被ばく線量の測定と評価」における論点の整理と課題ごとの検討成果が紹介された。本報告は、エックス線被ばく事故での被ばく者の線量評価に

における困難な点、線量評価において解決すべき点と今後の重要な課題に関する提言になっていた。

- a) 情報不足に起因する被ばく線量評価の困難さ。
- b) 低エネルギー엑스線被ばく時の人体中での線量分布。この課題を解決するために、被ばく者の姿勢や各臓器の被ばく状況を評価するための人体ファントムの姿勢や体型の変更ができるソフトウェアの開発は非常に有効であると提案されている。
- c) 線種による生物効果比 (RBE) についての課題。
- d) 엑스線の計測上の課題。事故発生時に装着していた線量計の解明と校正が重要であり、エネルギーに応じて異なる応答を示す엑스線量計の課題。
- e) 線量換算係数の課題。特に低エネルギー엑스線 (20 keV 付近) の実効線量を評価する際は、1 cm 線量当量と 70  $\mu\text{m}$  線量当量との比で大きな差がある。個人被ばく線量を推定する際は、 $H'$  (0.07) で校正されたサーベイメータを使用すべき。

被ばく事故において被ばく者の線量を適切に評価することは、被ばく者の治療と事故のインパクトの評価に非常に重要である。そのため、被ばく事故状況に関する正確な情報を早急に入手することが重要である。また、放射線輸送シミュレーションによる被ばく線量評価の可能性と課題、そして엑스線装置からの엑스線計測上の課題が本分科会で議論されている。筆者は、本講演の成果に同意すると共に、線量評価、被ばく評価とそれと有する課題に関する知識を得ることができた。適切なサーベイメータの選択、被ばく状況の情報、評価方法、線量の計算と推定はすべて事故後の救援、リスク管理、セーフティーケースの作成などの基本課題になっている。

### (iii) 第3分科会「放射線事故に関する情報の発信と教訓の水平展開」からの報告

国立保健医療科学院の山口一郎氏が、「放射線事故に関する情報の発信と教訓の水平展開」と題して、JHPS や JRSM を含む엑스線の利用や管理に造詣の深い学術団体を主な対象と想定し、専門家集団の果たすべき役割を以下の5つで整理、提言した。

- a) 利用業界への支援
  - b) 安全行政への支援
  - c) 労働衛生マネジメントシステムの実装
  - d) 事故事例や安全確保に関する取組みの公表と水平展開
  - e) ステークホルダー間での協体制の構築
- 엑스線装置の安全利用、安全管理、安全教育、事

故における情報収集と提供、安全文化の醸成、ステークホルダー間の協力等の課題が整理され、第3分科会のまとめとした。

筆者は、本分科会の目的を理解し、成果としての提言に同意している。放射線事故、あるいは放射線の安全利用自体も、各領域の関係者で交流、協力、管理することが重要だと考える。ステークホルダーの決定、役割、権利と義務、等々はすべて重要な課題で、ICRP と IAEA も注目しているホットトピックである。事故トラブルの主体関係者が他の関係者団体にどのような支援を求めるか、利害関係者にニーズや役割を明確にし、事故後対応について関係者全員で細かく計画して実行することが非常に重要だと感じた。

WG での3つの分科会が担当したテーマに関する各成果が、分科会相互に強く関連づけられ、それらが統合されて、엑스線安全利用の安全管理のための提案・提言としてまとめられている。筆者は、엑스線の事故と安全に関する多くのことを学んだ。엑스線ユーザーは、法律や規則を遵守することはもちろんのこと、関係する専門集団から可能な範囲で技術や経験の共有、あるいは支援や監視等の支援を受けつつ、利用状況に相応しい安全管理、安全文化の醸成、事故の予防対策をすることが適切であろう。

(金 千皓)

### ②セッション後半 (専門家の立場からの意見) について

#### (iv) 安全行政の立場から

厚生労働省の東好宣氏から、安全行政の立場からの発言があり、関係業界団体に対し、엑스線装置の点検作業における被ばく防止の徹底が要請された。その内容は、点検作業時の運転停止、警報装置の点検、リスクアセスメントの実施、作業手順書の作成と遵守などである。また、鉄鋼業などで放射線業務が行われている事業場に対し、労働基準監督署が放射線防護や作業主任者の職務、点検時の防護対策などについて指導を行っている旨の説明があった。

#### (v) 엑스線利用業界の立場から

(一社) 日本非破壊検査工業会の長岡康之氏と猿渡保氏から、利用業界の立場での発言があった。非破壊検査では、放射線利用や磁場利用、超音波利用などさまざまな形態があるが、過去の事故トラブルの経験から、엑스線の安全利用に関する教育の必要性が昨今浮き彫りになった。特に教育機会の開催頻度の少なさや地域や企業別での教育レベルの差、実際の使用装置に関する情

報の不足などの課題が知られている。このため、(一社)日本非破壊検査工業会では、使用装置の特徴に焦点を絞った教育プログラムの策定に着手し、具体的な操作方法の説明、エックス線の安全利用規程の制定などについて準備を開始している。さらに、e-learningを活用した教育訓練や認定制度の導入も検討している。

#### (vi) 安全管理専門家の立場から

大阪大学の鈴木智和氏から、安全管理専門家の立場での発言があった。過去に多くの放射線事故が発生してきた背景で、安全文化の醸成のために、鈴木氏は科研費を活用して教材の開発を進めている。放射線の利用は多くの産業や分野で重要な役割を果たしているが、その安全性を確保するためには適切な管理と対策が欠かせない。しかし、実際には管理区域内の作業や動物実験、排水関連など、さまざまなシナリオでの事故トラブル事例がある。施設の安全文化を強化するためには、現状ではそれを推進する専門家が限定され、人手の不足の課題も指摘されている。より大規模な活動資金と支援の枠組みが必要である。

本セッションの後半、指定発言の内容から、筆者は、安全行政や業界団体からの要請、施設における安全規程の整備、安全教育の充実など、いま、各方面でさまざまな取り組みが行われていることを知り、またそれらに期待している。特に、実際の装置の使用法や安全管理に関する情報の提供、教育の頻度や範囲の拡充など、業界全体での意識向上と安全文化の形成こそが重要だと感じた。

安全管理専門家の努力も重要だが、人手不足や資金の課題も存在することに留意する必要がある。放射線作業の安全管理には全社会の協力と意識の向上が求められる。安全な環境で放射線を利用し、リスクを最小限に抑えるために、私たちは個々の責任を果たし、安全対策の重要性を理解し続ける必要がある。

放射線の利用は現代の産業や技術の進歩に不可欠であるが、その利用には一定のリスクも伴う。安全な環境で放射線を扱い、被ばくを最小限に抑えるためには、安全管理への取り組みが欠かせない。このセッションを通じて、筆者は安全管理に関する重要性と努力の必要性を再確認した。関係者の努力や意識の向上、科学的な視点での安全研究や教育の充実が、放射線作業の今後の安全性向上につながると信じている。

最後に、放射線作業の安全管理に取り組むためには、行政・業界・研究者などさまざまな立場の人々が協力し、

全体最適の取り組みを行うことが重要だと感じた。これまでの努力を尊重しながらも、課題の解決に向けて更なる支援や投資が必要であると考え。安全な社会を築くためには、放射線作業の安全管理に対する取り組みを継続し、安全文化を醸成していくことが不可欠である。

(蔡 宇)

#### ③まとめ

本WGでは、エックス線被ばく事故に関連した情報に基づき、安全管理上の対策・課題、測定、線量推定に関する課題や、社会とのコミュニケーション上の課題、等が整理された。エックス線、あるいは放射線の安全利用に関する問題点と課題に対して、3つの分科会と各業界の専門家の視点からの提言、提案が報告された。筆者らは、本セッションの分科会や専門家からの提言や提案に同意しており、参加者の視点で、率直に感じた放射線安全利用についての意見を述べた。これからの放射線安全利用のための活動と継続的な議論を望む。なお、執筆にあたっては東京大学環境安全本部の飯本武志教授と黄倉雅広助教に日本語の文章校正をお願いした。ここに記して謝意を表します。

(金 千皓, 蔡 宇)

#### (7) その他

上記で紹介したセッションの他に、15-20分程度のショートセッションとして「JHPS-JRSM 合同セッション2:学会連携セッション」及び「JHPS セッション2:『土壌分配係数の試験方法に関する手順書』評価委員会(活動報告)」が設けられた。

前者では、これまでの学会連携の経緯や成果について報告された他、これからの取り組みとして放射線業務従事者または予定者を対象とした教育訓練の動画作製を検討していることが報告された。筆者自身も、過去に指定前ないし定期教育に携わった経験を有するが、その際に教育内容のマンネリ化を感じていた。発表者の安岡由美氏(神戸薬科大学)が発言していたように、放射性物質の取り扱い等の基本的な動画内容だけでなく、保健物理・放射線安全管理分野の明るい未来を示すような動画も含むバラエティー豊かなコンテンツになることが期待される。また、参加者からはYouTube等で公開されている動画の有用性について質疑があったが、安岡氏からは両学会員が何の懸念もなく広く使用できるようなコンテンツを作っていきたいとの回答があった。

一方、後者では、原子力発電環境整備機構(NUMO)が作成した「土壌-土壌溶液間分配係数( $K_d$ )の試験方法に関する手順書」を対象としたレビューの活動状

況が報告された。この活動はNUMOの委託を受け、2021-2022年度の約2年間活動したもので、2022年度は前年度のレビューコメントを受けて手順書がどのように修正されたのか確認するとともに、その際に委員から挙げた追加意見を反映した再修正内容についても確認したことが報告された。その後の質疑応答では、座長の橋本周氏（(国研)日本原子力研究開発機構）から今後の展開についての質問があり、発表者の佐々木道也氏（(一財)電力中央研究所）からは、例えば土壌サンプリングの考え方における専門家間の認識合わせを行うことの重要性や、当該分野の研究・技術の進展に伴う新たな評価方法をどのように取り入れていくか検討することが重要であるとの回答があった。事業法人から学会が委託を受ける事例は決して多くないと思われるが、JHPSは過去から放射性廃棄物処分に係る被ばくについて着目してきた経緯もあり、その実績があったからこそ今回の受託事業に繋がったのだらうと感じた。放射性廃棄物処分は息の長い事業であるため、今後も学会が学術的・技術的な面で貢献していくことが期待される。

(山田 椋平)

### 3. おわりに

本シンポジウムでは、放射線防護・安全管理分野における最近のトピックに呼応する形で設定された専門研究会やWGによる報告の他、実務的な取り組みに関する報告がされており、研究者や技術者・実務者が混在する両学会員の期待に広く沿えるような内容になっていたのではないだろうか。また、中長期的なトピックとして2029年目途に進められているICRP次期主勧告に向けたJHPS内での検討状況の報告や、若手が企画した理解醸成に係るセッションも設けられ、2023年11月に東京で開催されるICRP2023に向け機運が高められただろう。そして、各セッションの総合討論や質疑応答の時間では、オンラインという難しさはありつつも活発な議論が交わされたことや、参加者数が前年度比約1.7倍になったことは、本シンポジウムで扱った内容に対する関心の高さが表れていると考えられる。今後も引き続き両学会が放射線防護・安全管理分野におけるトピックを取り入れつつ、従来の継続的課題も含みながら、活発な学会活動を進めていくことが期待される。

一方、本シンポジウムを成功裏に終えることができたのは、各セッションの企画・準備から当日の進行までご担当いただいた各委員会等の先生方及びご講演いただいた先生方、そしてご参加いただいた皆様のおかげである。

皆様には、この場を借りて実行委員会よりお礼を申し上げます。

最後に、本シンポジウムの実行委員であるJHPS企画委員会の赤田委員長・秋吉副委員長・浜田副委員長、JRSM企画委員会の伊藤委員長・松垣副委員長・角山委員・保田委員・山口委員には実行委員会を立ち上げた2023年3月以降、色々のご協力いただき感謝申し上げます。特に、松垣副委員長には多くの実務をご担当いただき心から感謝の意を表したい。

(山田 椋平)

### 利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。



山田 椋平 (やまだ りょうへい)

北海道出身。博士（保健学）。2022年より弘前大学被ばく医療総合研究所助教（2023年9月より省庁出向中）。研究分野は環境放射線（能）及び放射線計測。



玉熊 佑紀 (たまくま ゆうき)

青森県出身。博士（保健学）。2022年より長崎大学放射線総合センター助教に就任。研究分野は環境放射線（能）計測及び内部被ばく線量評価。



桑田 遥 (くわた はるか)

青森県出身。弘前大学大学院保健学研究科博士後期課程1年。現在の研究内容は有機結合型トリチウムの分析手法や移行挙動についての研究に取り組んでいる。

三枝 裕美 (さいぐさ ゆみ)

熊本県出身。修士（医科学，経営）。臨床工学技士としての病院勤務を経て、2021年より（国研）量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所に所属（技術職）。

**渡邊 裕貴 (わたなべ ゆうき)**

1991年北海道生まれ。2015年、(国研)日本原子力研究開発機構入社。所内の放射線業務従事者の個人被ばく管理業務、体外計測機器の維持管理・研究に従事している。最近ではモンテカルロシミュレーションを用いた体外計測技術の高度化を行っている。

**廣田 誠子 (ひろた せいこ)**

素粒子物理学実験分野より当分野に参入。2017年より広島大学原爆放射線医学研究所(広大原医研)にて爪を用いた遡及的被ばく線量評価法の開発研究に携わった。2020年からは主に、広大原医研にある原爆被爆者データベースを用いた研究を行っている。

**金 千皓 (きん せんほう) /JIN Qianhao**

中国出身。博士後期課程在学学生(環境システム学)。東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻飯本研究室で修士を取り、放射線防護、放射性廃棄物及びラドンの環境動態に関する研究を行っている。

**蔡 宇 (さい う) /CAI Yu**

中国出身。名古屋大学にて修士号を取得後、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻(飯本研究室)に進学。現在は、博士後期課程博士後期課程2年。

研究テーマは、環境放射線と大気中の $^{210}\text{Pb}$ の沈着と拡散に関するものです。この研究を通じて、地球環境における放射性物質の挙動や影響に関する理解を深め、社会への貢献を目指しております。現代社会において、環境問題は極めて重要なテーマであり、私の研究がその一環として有益な成果をもたらせることを心より願っております。



## 話 題

### ICRU 国際シンポジウム 「福島復興と放射線計測」印象記

加藤 昌弘<sup>\*1, #</sup>

#### 1. はじめに

2023年4月19日に福島県いわき市ワシントンホテルで、「福島復興と放射線計測（英題：Revitalization of Fukushima and Radiation Measurement）」と題し、福島国際研究教育機構（Fukushima Institute for Research, Education and Innovation: F-REI）及び（国研）産業技術総合研究所計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan/ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: NMIJ/AIST）と国際放射線単位測定委員会（International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU）の主催、経済産業省、復興庁の後援で、ICRU 国際シンポジウム<sup>1)</sup>が開催された。

このシンポジウムはICRUの年会にあわせて開催され、2011年に起きた東京電力福島第一原子力発電所の事故以降の放射線計測・放射線防護に関する話題が取り上げられた。ハイブリッド形式で、会場・オンライン配信ともに英日同時通訳対応の開催であった。現地会場ではICRU委員の他に国内の放射線計測分野・放射線防護分野の研究者、計測器メーカー、校正事業者の方々が多く見られた。筆者は幸運にもシンポジウム後の夕食会と翌日4月20日の福島第一原子力発電所の視察に同席・同行する機会に恵まれたため、これらについても本記事で報告する。

#### 2. シンポジウム

シンポジウム会場は立派な会議室（第1図、第2図）で、講演者の登壇時に効果音を流すなどの凝った演出も見られた。英日の同時通訳は、通訳者によっては専門用

語にあてる日本語が多少気になったが、基本的には非常にスムーズであり参加者の理解に大いに役立ったと思われる。

冒頭のICRU委員長のDr. Vincent GRÉGOIREの開会挨拶ではICRUの経緯や活動が紹介された。続いていわき市の内田弘之市長と福島県企画調整部の五月女有良部長による来賓挨拶及びNMIJの臼田孝センター長による共催挨拶があった。

次に、福島復興再生特別措置法に基づき令和5年4月に設立された福島国際研究教育機構（F-REI）の山崎光悦理事長よりF-REIの紹介があった。F-REIは、研究開発機能、産業化機能、人材育成機能、司令塔機能、の4つの機能を一体的に推進する組織としてスタートしたばかりである。研究開発としてはロボット、農林水産業、エネルギー、放射線科学・創薬医療、放射線の産業利用、



第1図 会場の様子（1）。会議室全体の様子を示す。  
写真は共催者提供。



第2図 会場の様子（2）。演台及びスクリーンを示す。  
写真は共催者提供。

Masahiro KATO; Impression on ICRU Symposium “Revitalization of Fukushima and Radiation Measurement.”

<sup>\*1</sup>（国研）産業技術総合研究所計量標準総合センター；茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2（〒305-8568）

National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan.

<sup>#</sup> Corresponding author; E-mail: masahiro-katou@aist.go.jp

原子力災害に関するデータや知見の集積・発信の5つの分野を基本として取り組む。今後研究者は段階的に増やしていく予定で、将来的には数百人規模の研究者が参画する計画となっている。研究テーマとしても非常に興味深いものであり、今後放射線計測・放射線防護の分野で連携する機会が生まれるだろうと感じた。

(国研)日本原子力研究開発機構福島研究開発部門福島研究開発拠点の深堀智生副所長からは、「JAEA R&D Efforts for Decommissioning of the Fukushima Daiichi NPS」というタイトルで事故後の放射線計測に関わる研究開発事例が紹介された。福島研究開発部門は、実スケールモックアップ試験設備を持つ楢葉遠隔技術開発センター(NARREC)、事故によって発生した放射性廃棄物や燃料デブリの性状等を把握するための分析や研究を行う設備である大熊分析・研究センター及び福島第一原子力発電所廃炉に関する研究開発を一体的に進めている廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)の3つのセンターが設置されている。CLADSの代表的な研究成果として、廃炉現場の3次元マップを仮想空間に描画し、任意の視点から汚染箇所の観察を可能とする統合型放射線イメージングシステム(Integrated Radiation Imaging System: iRIS)、廃炉における燃料デブリ取り出し作業において発生する、 $\alpha$ 線を放出する放射性微粒子の濃度をその場でリアルタイムに測定するためのシステム(In-situ Alpha Aerosol Monitor: IAAM)、耐放射線性光ファイバーによりレーザー光を遠隔搬送し、レーザー誘起プラズマ発光分析法によりデブリを分析する技術であるLIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)分析法の開発などの紹介があった。

福島県立医科大学の山下俊一副学長からは「Lessons Learned from Fukushima Nuclear Power Plant Accident: Limitation of Public Health Emergency Response and Recovery」というタイトルで、甲状腺がんのスクリーニング効果に関する課題についての講演があった。福島第一原子力発電所の事故による放射線の公衆の健康への影響のリスクはかなり低く、個人が受けた推定放射線量に基づくと無視できる程度であるが、集団ベースのスクリーニングによって甲状腺がんが多く発見されている。この甲状腺がんの有病率については、スクリーニング効果として説明することが重要であるが、公衆への説明は非常に難しいということが、実際にリスクコミュニケーションを実施してきた立場から述べられ、その一因としてLNTモデルが放射線管理のためだけに使うべき理論であることの理解が進んでいないことが挙げられた。コ

ミュニケーションの改善はすぐには出来ることではないが、平常時から少しずつ基本的な知識を普及していくことが大切であろうと感じた。

(一社)日本保健物理学会会長で東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープ研究センターの吉田浩子研究教授からは、「Evaluation of Dose Reduction Factors for Wooden Houses in Affected Areas Based on in situ Measurements」というタイトルの講演があった。reduction factorは着目している建築物・構造物の中の線量率の屋外の線量率に対する比として定義される。事故後から継続的に測定を行っており、その結果reduction factorは当初は0.4くらいであったが、屋外の線量率が下がってくると、低減率の数字は0.8程度になることが報告された。屋根や壁の遮蔽の効果だけではなく、建物が建っている場所・土地が汚染されていないということが屋内の線量率低減に寄与している。この研究は事故直後から現在に至るまでの長期間の測定に裏付けられたものであり貴重な知見であると言える。

休憩を挟み、欧州原子核研究機構(CERN)のProject Safety Officer for High-Luminosity LHCでICRU委員のDr. Thomas OTTOより「ICRU Report 95 Operational Quantities for Environmental Measurements」というタイトルの講演があった。当学会の会員にはよくご存じの方も多と思われるが、ICRUレポート95<sup>2)</sup>で外部被ばく測定の実用量について新しい定義が勧告された。粒子フルエンスまたは空気カーマから実用量に換算する換算係数の計算に用いるファントムが、例えば全身被ばくについては、ICRU39<sup>3)</sup>で定義されたICRU球から、実効線量の計算に用いられているICRP Publication 110<sup>4)</sup>で定義された標準人ファントムに変更になる。光子に対する新旧の実用量についての換算係数は低エネルギー領域と高エネルギー領域とで変化が大きい。講演では、加圧型電離箱、熱ルミネセンス線量計などのレスポンスに与える影響が詳しく解説された。質疑応答では、さまざまな分野から関心が寄せられていること、実際に新たな検出器が導入されるにはまだ10年以上かかる見込みであることが述べられた。

(国研)産業技術総合研究所計量標準総合センター分析計測標準研究部門放射線標準研究グループの黒澤忠弘氏からは「Establishment of Low Dose Rate Calibration Methods for Environmental Monitoring」というタイトルの講演があった。講演では、産総研で開発した環境測定用サーベイメータの校正を目的としたバックグラウンド線量率を低減させるための遮蔽箱を使った照射システムの

紹介があった。海外では地下の校正施設などでバックグラウンドが低い環境で校正が行われている例もあるが、地下の校正施設の利用は容易ではないのに対し、遮蔽箱を使ったシステムにはどんな場所でも利用できるという利点がある。また同じく産総研で開発された、モニタリングポストなどの設置型の空間線量率測定器の現地校正システムの紹介があった。屋外で使える線源の放射能には法令上の制限があるため、このシステムで使える線源の放射能は限られるが、線源と検出器の距離を変えることは可能なので、放射線強度を変えて測定することができる。

Institute of Radiation Physics at Lausanne University Hospital の Director であり、ICRU 委員の Dr. François BOCHUD からは「Individual Dose Assessment: the Example of Acute Exposure」というタイトルの講演があった。2020 年に ICRU Report 68<sup>5)</sup> の更新版として発行された ICRU Report 94<sup>6)</sup> のレポートの内容が紹介された。レポートでは放射線の量は SI 単位である組織吸収線量または線量計吸収線量 (absorbed dose to the dosimeter) に基づいて論じている。各個人が実際に被ばくした放射線の量を評価するための手法を、生体線量測定 (Biodosimetry)、物理的線量測定 (Physical dosimetry)、補助的な手法 (Supplementary methods) に分類して解説が行われた。測定すべき事象に遭遇した場合は素早く実行すること、測定手法の習得には時間がかかるので事前に良く習熟しておくことが重要だと述べられた。

総合討論では、一人ひとりの被ばく量をどうやって国民に伝えるかという課題について、「伝え手と受け手の間の信頼が重要である。例えば国際的なドキュメントを参照している、公開されている方法で行っているなどを表明することが必要である」との意見があった。また、放射線影響の個人差については、あまり重要ではないという意見があったのに対して、年齢差・性差はあることが知られているという意見があった。着目する放射線障害、線量率・線量や臓器を特定しての議論ではなかったため場合によって見解が異なるものと思われる。また住民の避難についても議論が及んだ。「ICRU や ICRP がもっと研究を行い、避難実行についてはもう少し緩やかな条件の勧告にした方がよいだろうか?」という質問に対して、「線量率を測定して避難区域を決めるという手法は合理的であった。しかし区域の単位が広かったり、避難の種類 (帰還困難区域など) が 3 種類だけだったりというのは、今後改善できる場所である。宮城県と福島県との県境の区域では実際には両県にまたがって放射線

汚染があったが、避難区域の設定は県により異なった。」という回答があり、国際的な勧告での数値的な条件も重要だが、2011 年の事故では運用面の課題も大きかったということが分かった。

### 3. 夕食会と原子力発電所の視察

夕食会は会議場に隣接した会場で、ICRU 委員、シンポジウム講演者と F-REI 及び NMIJ の関係者らが参加して開催された。NMIJ の白田センター長より、シンポジウムには現地参加 80 名程度、オンライン参加 100 名以上の計 200 名程度の参加があったと発表された。ICRU 委員からは、議論もかみ合っただけでちょうどいい規模の会議だと好評だったとのことである。筆者は Roger W. HOWELL 委員、Tzu-Chen YEN 委員、F-REI の中西友子監事らと歓談する機会を得られた。新型コロナウイルスの影響で国際会議の現地参加は久しぶりだったため初めは緊張したが、三方とも大変フレンドリーで、専門分野のことや職場の環境、自動車の運転サポート技術など話題が多岐に及び大いに盛り上がった。

翌朝、ICRU 委員及び委員の同伴者と NMIJ からの希望者約 20 名で福島第一原子力発電所の視察が行われた。ワシントンホテルから主催者が準備したバスでさくらモールとみおかそばの廃炉資料館に移動し、廃炉資料館で映像資料の視聴及び座学による説明を受けた後に、原子力発電所視察用のバスに乗り換えて福島第一原子力発電所に向かった。視察中は電子式個人線量計を各自 1 台ずつ装着し基本的にバスの中から見学した。廃炉資料館から原子力発電所までは、国道 6 号線などを通る。2022 年 6 月 30 日に大熊町<sup>7)</sup>、2023 年 4 月 1 日に富岡町の特定復興再生拠点区域の避難指示が解除され<sup>8)</sup>、この道のりに隣接する避難指示区域はかなり縮小されている。筆者は産総研の黒澤氏の講演で紹介された現地校正システムの、2019 年に行われた現地実験に参加した際に、国道 6 号のこの区域を車で走行したが、その時に比べ復興が進んでいる印象を受けた。

視察中の説明者による説明は、ICRU 委員が参加されていることもあり、英語への通訳も行われた。説明は大変丁寧であり、科学的な誤解を与えないように細心の注意をしていることが感じられた。現在は特に汚染水をアルプス (ALPS: Advanced Liquid Processing System) などで処理した後のトリチウムを含む水への対応に最も苦慮されているようである。

筆者は仕事から、線量計や放射線の測定数値が気になった。貸与された電子式個人線量計は国内メーカー製

の光子・電子を測定可能なタイプだった。表示部を見た限りでは、光子による線量当量の測定分解能は10  $\mu\text{Sv}$ 、電子は100  $\mu\text{Sv}$ であった。2時間以上の視察で各自の外部被ばく線量は光子の線量当量で20  $\mu\text{Sv}$ 程度、電子は検出限界値以下だった。バス車内にも線量計が設置されており、時折車内から確認できた屋外の線量当量を表示している線量計の値と比べると2分の1程度から3分の1程度であった。視察中、一度だけバスから降車して1号炉から4号炉までを100 mから200 mほどの距離から見渡すことができた。この場所の線量計の値が約80  $\mu\text{Sv/h}$ と表示されていたことと、少なくとも十数分はバスの外に滞在していたことを考えると、この視察での外部被ばく線量は降車時の環境に存在した放射線によるものが支配的であったと推測できる。

#### 4. お わ り に

2023年4月19日に行われたICRU国際シンポジウムと付随して実施された夕食会と福島第一原子力発電所の視察について概要を記すとともに筆者の所感を述べた。シンポジウムのタイトル通り、2011年以降の日本における福島復興と放射線計測を国内外の関係者で論じる非常に良い機会であったと感じた。最後になったが、本シンポジウムの運営及び関係者間の調整にご尽力されたICRU委員でNMIJ国際計量室の齋藤則生氏に謝意を表し、本稿の結びとする。

#### 利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。

#### 参 考 文 献

- 1) National Metrology Institute of Japan; ICRU kokusai sinpoziuumu [ICRUsymposium] (in Japanese). Available at: [https://unit.aist.go.jp/nmij/public/events/seminar/2023/ICRU\\_symposium/](https://unit.aist.go.jp/nmij/public/events/seminar/2023/ICRU_symposium/), Accessed 23 May 2023.
- 2) International Commission on Radiation Units and Measurements; “Operational Quantities for External Radiation Exposure Radiation Quantities and Units”, ICRU Report 95 (2020), International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- 3) International Commission on Radiation Units and Measurements; “Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources”, ICRU Report 39 (1985), International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- 4) International Commission on Radiological Protection; “Adult Reference Computational Phantoms”. ICRP Publication 110. *Ann. ICRP*, **39** (2) (2009), Elsevier Science, Oxford.
- 5) International Commission on Radiation Units and Measurements; “Retrospective Assessment of Exposure to Ionising Radiation”, ICRU Report 68 (2003), International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- 6) International Commission on Radiation Units and Measurements; “Methods for Initial-Phase Assessment of Individual Doses Following Acute Exposure to Ionizing Radiation”, ICRU Report 94 (2019), International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda.
- 7) Okuma Town; Evacuation order lifted for specified reconstruction and revitalization base areas on June 30, 2022 (in Japanese). Available at: <https://www.town.okuma.fukushima.jp/soshiki/kankyoutaisaku/21070.html>, Accessed 23 May 2023.
- 8) Tomioka Town; Evacuation order lifted for specified reconstruction and revitalization base areas on April 1, 2023 (in Japanese). Available at: <https://www.tomioka-town.jp/soshiki/kikaku/kikakuseisaku/oshirase/4891.html>, Accessed 23 May 2023.



加藤 昌弘 (かとう まさひろ)

神奈川県出身。東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。(国研)産業技術総合研究所で $\beta$ 線及び $\gamma$ 線の標準測定の研究開発に従事。(公財)日本適合性認定協会認定審査員。(一社)日本保健物理学会編集委員会委員。

E-mail: masahiro-katou@aist.go.jp

## 話題

### MELODI ワークショップ 2023「放射線によって誘発される循環器疾患に関する動向」

浜田 信行<sup>\*1, #</sup>

#### 1. はじめに

学際的欧州低線量イニシアチブ (Multidisciplinary European LOw Dose Initiative: MELODI) は、低線量放射線リスクの研究に特化した欧州の研究プラットフォームで、2010年に設立された。2009年(第1回, 正式な設立前に開催)から2015年(第7回)まではMELODIワークショップとして毎年、そして、2016年以降は欧州放射線防護週間 (European Radiation Protection Week: ERPW) としてほぼ毎年、開催してきた。MELODIは、年會に相当するこれらのワークショップに加え、特定のテーマに関するトピカルワークショップを2018年から毎年開催してきた。第1回(2018年3月にマルタで開催)は個人感受性, 第2回(2019年4月にスペインで開催)は非がん影響, 第3回(2020年12月にウェブ開催)は不均一被ばく, 第4回(2021年4月にウェブ開催)は有害性発現経路 (adverse outcome pathway: AOP), 第5回(2022年6月にハンガリーで開催)は継世代影響と胎内被ばく影響が、トピカルワークショップのテーマとされてきた。MELODIは、これらのトピカルワークショップで議論された内容について、学術論文にまとめることを推奨(例えば、第2回と第4回のトピカルワークショップで著者が関与した循環器疾患についての議論の内容は3編<sup>1-3)</sup>にまとめて報告)するとともに、ほぼ毎年策定している戦略的研究行動計画 (strategic research agenda: SRA) に反映することで活用している。

放射線の非がん影響 (被ばく者本人に生じるがん以外の晩発影響)は、長い間、高線量 (>1 Gy) の低線エネルギー付与 (linear energy transfer: LET) 放射線) でのみ認めら

れると考えられてきたが、中線量 (0.1-1 Gy), さらに低線量 (<0.1 Gy) でも認められることが明らかになってきた。循環器に生じる非がん影響について、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) は、1984年のICRP Publication 41<sup>4)</sup>にて、循環器の放射線感受性は高くないと判断するとともに、循環器への影響は放射線治療に伴う40 Gy以上の分割照射後に認められると述べた。原爆被ばく者の寿命調査 (Life Span Study: LSS) コホートにおいて循環器疾患の放射線リスクが>2 Gyで増加することを示す論文など<sup>5, 6)</sup>が1990年代に報告されたことを受けて、2007年勧告<sup>7)</sup>では、これらの論文について言及しつつ、低線量でのリスクは不明であるため放射線防護体系に取り入れないと判断した。しかし、LSSコホートにおいて循環器疾患の放射線リスクが $\geq 0.5$  Gyで増加することを示す論文<sup>8)</sup>が2010年に報告されたことが主なきっかけとなり、ICRPは、医療従事者への警鐘として、組織反応に関する2011年のソウル声明<sup>9)</sup>で循環器疾患に対するしきい線量を線量率によらず0.5 Gyと初めて勧告した。ソウル声明以降、放射線によって誘発される循環器疾患に関する論文が、報告され続けている。そこで、2021年に、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) は専門家グループ (CircuDis) を設置して科学的知見を整理した報告書の作成を進めるとともに、ICRPはタスクグループ119「循環器疾患への放射線影響と放射線防護体系への考慮」<sup>10)</sup>を設置して科学的知見の整理と放射線防護体系への示唆に関する議論を進めている。このような状況に鑑み、2023年(第6回)のMELODIトピカルワークショップ(以下、MELODIワークショップ2023)は、「放射線によって誘発される循環器疾患に関する動向」をテーマとして開催されることになった。本稿では、本ワークショップの概要を紹介する。

#### 2. MELODI ワークショップ 2023 の概要

本ワークショップは、ドイツ連邦放射線防護庁 (Bundesamt für Strahlenschutz: BfS) の企画で、「放射線によって誘発される循環器疾患に関する動向」をテーマとして、2023年5月30日から6月2日にウェブ開催され、約150名が参加した(1日目から3日目は60-80名程度、4日目は35名程度)。4日間とも、日本時間の20時以降に開始し、翌0時半までに終了した。

1日目は、はじめに企画を担当したBfSを代表して

Nobuyuki HAMADA; MELODI Workshop 2023 "Updates on Radiation-Induced Circulatory Diseases."

\*1 (一財) 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部生物・環境化学研究部門; 千葉県我孫子市我孫子1646 (〒270-1194) Biology and Environmental Chemistry Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI); 1646 Abiko-shi, Chiba 270-1194, Japan.

# Corresponding author; E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp

Michaela KREUZER 氏 (ドイツ BfS 電離・非電離放射線影響・リスク部門 部門長), 次に MELODI を代表して Andrzej WOJCIK 氏 (MELODI 会長, スウェーデンストックホルム大学教授) から開会の挨拶があった後に, セッション 1「循環器疾患と放射線防護」(講演 5 件) が開催された。2 日目はセッション 2「循環器疾患と放射線疫学」(講演 5 件), 3 日目はセッション 3「循環器疾患と放射線生物学」(講演 6 件), 4 日目はセッション 4「心血管疾患と脳血管疾患」(講演 7 件) が開催された。計 23 件の講演はいずれも 25 分間 (講演 20 分と質疑 5 分) で, 各セッションでは 5-7 件の講演後に, 1 日目から 3 日目は 1 時間, 4 日目は 30 分間のパネル討論が開催された。以下に, 各セッションの概要を示す。

### 2.1 セッション 1「循環器疾患と放射線防護」の概要

第 2 席以外の座長は著者が務めたが, 第 2 席 (著者が講演) の座長は Simone MÖRTL 氏 (ドイツ BfS) が務めた。

第 1 席では, Sisko SALOMAA 氏 (元フィンランド東フィンランド大学) が「非がん影響に関する MELODI ワークショップの要約と未解決の課題」と題して, 非がん影響をテーマとして 2019 年に開催された第 2 回 MELODI トピカルワークショップにおける循環器疾患に関する議論と未解決の課題について紹介した。虚血性心疾患と脳卒中のリスクは有意に増加しているが, 他の循環器疾患のリスクについては不明である。高線量域での生物学的機構については知見がある程度あるが, 低線量域については知見が限られており, さらなる研究が必要である。炎症状態にない健常組織に照射をすると炎症作用により動脈硬化を誘発する方向の反応が生じる一方, 炎症状態にある組織に  $<0.5$  Gy を照射すると抗炎症作用により動脈硬化を軽減する方向の反応が生じる可能性が生物研究から示唆されている。放射線によって循環器疾患が誘発される分子細胞生物学的な機構が不明であるが, その原因のひとつとして, 良い疾患モデル動物がないことが挙げられる。複合ばく露や併存疾患の影響も重要である。また, 第 2 回 MELODI トピカルワークショップで AOP 開発を今後の重要検討課題のひとつに挙げたことが, 2021 年に第 4 回 MELODI トピカルワークショップのテーマを AOP として開催することにつながった。第 2 回 MELODI トピカルワークショップでの議論と未解決の課題の詳細については, 関連論文<sup>1)</sup>を参照された。

第 2 席では, 著者が「放射線影響区分と最新知見の示唆」と題して講演した。最初に, 心血管疾患

(cardiovascular disease) と脳血管疾患 (cerebrovascular disease) をまとめた循環器疾患の英語名には, ICRP Publication 118, 循環器疾患に関する UNSCEAR 専門家グループの名称 (CircuDis), そして本ワークショップの名称 (Updates on radiation-induced circulatory diseases) で使用されている “circulatory diseases”, 世界保健機関 (World Health Organization: WHO) や医療分野で使用されている “cardiovascular diseases”, WHO の国際疾病分類 (International Classification of Diseases: ICD) コードや ICRP タスクグループ 119<sup>10)</sup> の名称に使用されている “diseases of the circulatory system” の 3 つが混在していることを指摘した。次に, ICRP (及びその前身である国際 X 線・ラジウム防護委員会) が 1928 年から勧告してきた放射線影響区分の変遷 (しきい線量を伴う線量応答関係を示す非がん影響の区分は, 1977 年から非確率的影響→確定的影響→組織反応に変遷), ICRP が循環器疾患へのしきい線量 (線量率によらず 0.5 Gy) を 2011 年のソウル声明<sup>9)</sup>で初めて勧告するにいたった経緯, しきい線量の意味 (被ばく後 10 年以降に, 1% のヒトが循環器疾患に罹患する線量), 最新の科学的知見に鑑みて循環器疾患は組織反応としての判断基準 (例: しきい線量型の線量応答関係を示すか, 線量が増加すると重篤化するか, 多数の細胞の損傷に起因するか) を満たしているか, 循環器疾患の標的組織 (例: 心臓, 大血管, 腎臓), リスク管理 (例: 今後も組織反応に区分されるのであれば等価線量限度か吸収線量限度の設定, 確率的影響に区分されるのであれば組織加重係数の割当), 線量と線量率による影響の違い (詳細はセッション 2 の第 2 席に関する記述を参照), 高 LET 放射線の影響, 循環器の放射線感受性, 個人感受性 (性別, 年齢, 集団, 生活習慣, 併存疾患, 複合ばく露, 遺伝子背景などによる放射線感受性の違い), AOP アプローチの応用 (詳細はセッション 1 の第 5 席に関する記述を参照) について紹介した。また, 放射線は, 難治性不整脈の治療への利用が提案されている (詳細はセッション 3 の第 5 席に関する記述を参照) 一方, 放射線作業員や放射線治療を受けた乳がん患者で不整脈の放射線リスク増加が報告されていることから, 放射線の発がん影響とがんの放射線治療に伴う二次発がんの関係と類似して, 循環器についても放射線は諸刃の剣である可能性について言及した。最後に, 明確なしきい線量を伴わない非がん影響 (例: 循環器疾患, 眼疾患, 神経疾患) をはじめとして, ICRP が 1977 年に提案した確率的影響とそれ以外の影響 (非確率的影響) という二値的な放射線影響区分の境界が曖昧になってき

ていることから、再考が必要であることを述べた。本講演で紹介した内容の詳細については、関連論文<sup>11,12)</sup>を参照されたい。

第3席では、Soile TAPIO氏(元ドイツヘルムホルツミュンヘン環境健康研究センター(Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt GmbH: HMGU))が「循環器疾患に関するUNSCEARでの評価」と題して、CircuDisの活動について紹介した。CircuDisは、2021年に設置された循環器疾患に関するUNSCEARの専門家グループで、16名の専門家により構成されている(同氏が主査)。CircuDisでは、2006年から2022年(UNSCEAR 2006年報告書<sup>13)</sup>以降)に刊行された放射線生物学、病態生理学、疫学分野における循環器疾患関連の学術論文を2つのデータベース(PubMedとEMBASE)で調査をして、循環器疾患に関連する科学的知見の整理を進めているとともに、新たな線量応答関係の解析手法の評価とリスク予測の実施も予定している。2024年のはじめにUNSCEAR報告書の第1草案の刊行、2025年のおわりまでにUNSCEAR報告書の刊行を目指している。

第4席では、Dominique LAURIER氏(フランス放射線防護・原子力安全研究所(Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire: IRSN))が「循環器疾患リスクをより放射線防護で考慮するためのICRPの活動」と題して、ICRPタスクグループ119「循環器疾患への放射線影響と放射線防護体系への考慮」<sup>10)</sup>の活動について紹介した。タスクグループ119は、2021年に設置された循環器疾患に関するICRPのタスクグループである。タスクグループ119は、Tamara V. AZIZOVA氏(ロシア南ウラル生物物理学研究所(Southern Urals Biophysics Institute: SUBI))が議長、LAURIER氏が共同議長、12名の委員、4名のメンティーと1名の技術補佐により構成されている(このうち、著者は、本タスクグループの委員と、2名のメンティーのメンターを務めている)。タスクグループ119では、最近(基本的にはICRP Publication 118<sup>9)</sup>以降、つまり2011年以降に)刊行された疫学と放射線生物学分野における循環器疾患関連の学術論文を調査して、循環器疾患に関連する科学的知見の整理を進めているとともに、今後は、循環器疾患の放射線リスクを放射線防護体系でどう考慮するかについて検討を予定している。報告書草案の公開意見募集を2025年に開始することを目指している。タスクグループ119以外のICRP第1専門委員会の活動(放射線影響区分に関するタスクグループ123など)についても概要を紹介し、タスクグループ

119を、2030年代の刊行を目指しているICRP次期主報告を作成するための重要構成要素のひとつであると位置づけた。

第5席では、Vinita CHAUHAN氏(カナダ保健省)が「放射線によって誘発される心血管疾患について検討されているAOPアプローチ」と題して講演した。AOPとは、ストレス源(例:放射線)と標的(例:DNA)との初期作用(分子開始事象)から健康影響(例:循環器疾患)にいたる一連の主要事象を因果関係に基づいて構造化するものである。AOPは、米国環境庁が化学物質規制のために検討したアプローチで、2012年からは経済協力開発機構(Organisation for Economic Cooperation and Development: OECD)の専門家グループである分子スクリーニング・トキシコゲノミクス拡大諮問グループ(Extended Advisory Group on Molecular Screening and Toxicogenomics: EAGMST)がAOPの開発を主導している(CHAUHAN氏はEAGMST委員を務めている)。2010年代前半には、放射線影響研究分野で、AOPを放射線防護に応用するための議論が開始された。米国放射線防護審議会(National Council on Radiation Protection and Measurements: NCRP)は2015年のNCRP Commentary No. 24<sup>14)</sup>と2020年のNCRP Report No. 184<sup>15)</sup>で、循環器疾患とがんについて、疫学と生物学の知見を統合するアプローチのひとつとして、生物学的機構に基づく線量応答関係(biologically-based dose response: BBDR)モデルのパラメータをAOPアプローチによって決定することを提案した。2021年に、OECD/原子力機関(Nuclear Energy Agency: NEA)/放射線防護・公衆衛生委員会(Committee on Radiological Protection and Public Health: CRPPH)/低線量放射線研究に関する高レベルグループ(High Level Group on Low Dose Research: HLG-LDR)の傘下に、化学物質分野におけるAOPの利用経験を放射線防護分野に活用することを検討するためにRad-Chem AOPトピカルグループ(Radiation-Chemical AOP Topical Group)が設置(CHAUHAN氏は委員長、著者は委員)され、本格的な検討が開始された。2021年には、AOPをテーマとした第4回MELODIトピカルワークショップも開催され、会期中に立ち上げられたワーキンググループで、放射線のエネルギー付与から循環器疾患にいたる定性的AOPが推定された(著者は本ワーキンググループに参加)<sup>2,3)</sup>。このうち、カナダ保健省の主導、カナダ宇宙庁、米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration: NASA)との共同プロジェクト(CHAUHAN氏は主査、著者は科学諮問委

員会委員)で、エネルギー付与から血管リモデリングにいたる定性的 AOP を開発した<sup>16)</sup>。定性的 AOP は、健康影響にいたる主要事象の決定、知見が不足している研究領域の提案に有用である一方、定量的 AOP はリスク推定の精緻化と BBDR モデルのパラメータ決定に有用である。循環器疾患については、血管リモデリング以外の健康影響に関する定性的 AOP の開発と、知見が不足している研究領域の研究実施によって知見を拡充することで定量的 AOP の開発が、今後期待される。AOP アプローチの放射線防護分野への応用に関する議論の詳細については、2022 年の放射線 AOP 特集号<sup>17)</sup>を参照されたい。

パネルディスカッションでは、主に以下の諸点が議論された。

- ・ ICRP が、1966 年にがんリスクを放射線防護体系で初めて考慮した際は、白血病に関する疫学的知見しかほぼない状況であった。循環器疾患についても、放射線防護体系に取り入れる時点で必ずしもさまざまなことがわかっている必要はないのではないか。
- ・ 循環器疾患は組織反応に区分されているが、ICRP 次期主勧告の作成に向けて、今後どのように区分するのか(組織反応か、確率的影響か、それともそれ以外の区分か)。
- ・ 放射線の循環器影響に関する ICRP のタスクグループ 119 と UNSCEAR の専門家グループ(CircuDis)は、どう協調し、それぞれどのようなスコープで報告書の作成等を進めているのか。
- ・ 疫学研究における交絡因子に関して、どの程度、知見があり、調整されているか。
- ・ 線量応答関係における線量修飾因子に関する知見はどの程度あるか。
- ・ 放射線の循環器影響には、被ばく後、比較的短期間に生じる心エコー検査で検出される症状のような影響と、長い潜伏期間を経て診断に至る疾患のような影響がある。放射線防護では、どのような循環器影響を考慮すべきか。
- ・ 遠達効果(生体の一部の被ばくによって、被ばくしていない部位に影響が生じる現象)は、放射線の循環器影響において、どのような役割を果たしているか。
- ・ 放射線の循環器影響について、血管リモデリングに関する定性的 AOP が開発されたが、今後、個々の循環器に関する AOP を開発する予定はあるか。
- ・ 個々の循環器疾患に関する生物実験系(疾患モデル動物、培養細胞モデルなど)はあるか。

- ・ 個体レベルでの放射線の循環器影響の生物学的機構や複合ばく露の影響などを、患者の循環器疾患組織から取得した細胞や多能性幹(induced pluripotent stem: iPS)細胞などを用いた培養細胞実験で解析することは可能か。

## 2.2 セッション 2 「循環器疾患と放射線疫学」の概要

第 3 席以外の座長は Lawrence T. DAUER 氏(米国スローンケタリング記念がんセンター)が務めたが、第 3 席(DAUER 氏が講演)の座長は Simone MÖRTL 氏(ドイツ BfS)が務めた。

第 1 席では、Tamara V. AZIZOVA 氏(ロシア SUBI)が「マヤック作業員コホートにおける循環器疾患リスク」と題して講演した。マヤック作業員研究は、ロシアのマヤック核施設で 1948 年から 1982 年に従事した 22,377 人の作業員を追跡している大規模なコホート研究である(著者は 2015 年から検討に関与)。同氏は、2018 年末まで追跡し、線量推定は 2013 年マヤック作業員線量体系(MWDS-2013)に基づく最新の結果を紹介した。このうち、統計学的に有意であった罹患に関する肝臓外部被ばく吸収線量あたりの過剰相対リスク(excess relative risk per unit absorbed dose in gray: ERR/Gy)とその 95% 信頼区間(confidence intervals: CIs)は、虚血性心疾患が男性で 0.17 (95% CIs: 0.10, 0.26)、女性で 0.23 (95% CIs: 0.09, 0.38)、狭心症が男性で 0.18 (95% CIs: 0.09, 0.29)、女性で 0.26 (95% CIs: 0.08, 0.49)、心不全が男性で 0.27 (95% CIs: 0.16, 0.40)、女性で 0.27 (95% CIs: 0.10, 0.49)、不整脈・伝導疾患が男性で 0.32 (95% CIs: 0.19, 0.46)(女性は非有意)、脳血管疾患が男性で 0.37 (95% CIs: 0.27, 0.47)、女性で 0.47 (95% CIs: 0.31, 0.66)であった。このように罹患についてはさまざまな循環器疾患で放射線リスクが有意に増加した一方、死亡の放射線リスクは男性の虚血性脳卒中(0.43 (95% CIs: 0.08, 0.99))でだけ有意に増加した。最も症例数の多い虚血性心疾患の罹患リスク(ERR/Gy)は線量率が低くなると低下した。これらの結果の詳細は、原著論文<sup>18-21)</sup>を参照されたい。

第 2 席では、Mark P. LITTLE 氏(米国国立がん研究所)が「放射線と循環器疾患: システムティックレビューとメタ解析」と題して、循環器疾患の放射線リスクに関して、同氏と著者で実施したシステムティックレビューからスクリーニングされた 93 編の原著論文に関するメタ解析の結果を紹介した。循環器疾患のメタ解析 ERR/Gy は、0.11 (95% CIs: 0.08, 0.14)であった。これは、ICRP Publication 118 でしきい線量 0.5 Gy の妥当性を確



認した  $ERR/Gy = \text{約} 0.1$  と同程度であったことから、しきい線量は最新の知見に鑑みても  $0.5 Gy$  が妥当であることが確認された。一方、LSS コホートとメタ解析で逆線量効果（線量が低くなると単位線量あたりのリスク係数が大きくなること）、メタ解析で逆線量率効果（線量率が低くなると単位線量あたりのリスク係数が大きくなること）が認められている。また、死亡リスク（メタ解析  $ERR/Gy = 0.20$  (95% CIs: 0.13, 0.26)）は罹患リスク（ $0.09$  (95% CIs: 0.05, 0.13)）より倍大きかった。循環器疾患死亡の絶対リスクは  $1 Gy$  あたり数%で、その内訳は脳血管疾患が最多で、次に虚血性心疾患が多かった（例えば日本では、循環器疾患全体で  $2.52$  (95% CIs: 1.82, 3.22) %/Gy, そのうち、脳血管疾患が  $1.26$  (95% CIs: 0.62, 1.90) %/Gy で、虚血性心疾患が  $0.30$  (95% CIs: 0.19, 0.40) %/Gy)。これらの結果の詳細は、原著論文<sup>22-24)</sup>を参照されたい。

第3席では、Lawrence T. DAUER 氏（米国スローンケタリング記念がんセンター）が「放射線作業員コホートにおける低線量での循環器疾患リスク：作業員と退役軍人の米国百万人研究の最新知見」と題して講演した。米国百万人研究は、NCRP が主導している疫学研究である。そのサブコホートである原子力作業員、工業放射線技師、医療従事者、退役軍人、マウンド作業員、マリネクロット作業員、ロスアラモス国立研究所作業員のいずれでも、虚血性心疾患の死亡リスクは有意に増加しておらず（これらの7つのサブコホートのうち、心臓吸収線量あたりの ERR の点推定値が 0 を上回ったのはマリネクロット作業員だけ）、 $100 mGy$  でのメタ解析 ERR も  $-0.02$  (95% CIs:  $-0.05, 0.00$ ) であった<sup>25)</sup>。現在、虚血性心疾患以外の循環器疾患の死亡リスクを解析中である。また、今後は、メディケア・メディケイドサービスセンター（Centers for Medicare & Medicaid Services: CMS、メディケアは障害者と 65 歳以上の高齢者を対象、メディケイドは低所得層を対象とする公的医療保険）のデータを活用して罹患リスクを解析する予定である。

第4席では、Janice L. HUFF 氏（米国 NASA）が「循環器疾患と宇宙放射線被ばく：混合放射線場、リスク個別化、複合ストレス源」と題して講演した。宇宙飛行士は、宇宙飛行中、無重力、閉鎖空間下で放射線（高 LET、低 LET）に被ばくする（例えば、火星ミッションでは、吸収線量で  $0.3-0.45 Gy$ 、実効線量で  $0.87-1.2 Sv$  を被ばくする）。中線量域と高線量域での光子放射線の循環器疾患リスクは地上の被ばく集団の疫学研究から科学的知見が蓄積しつつあるが、高エネルギー荷電粒子のリスク

は不明である。また、個人リスクは、年齢、性別、遺伝子背景、人種、既往歴、家族歴など修正が不可能なリスク要因、生活習慣（例：喫煙、飲酒）、血圧、脂質状態（コレステロールやトリグリセライドなどの値）など修正が可能なリスク要因など、さまざまな要因の影響を受けるため、推定が困難である。しかし、これらの要因を考慮して、米国のバックグラウンド死亡データ、地上での被ばく集団の疫学的知見に基づく光子放射線のリスク係数 ( $ERR/Gy$ )、宇宙放射線の影響に関する係数（循環器のデータがないため、造血器官に対する生物学的効果比を使用）を用いて、宇宙飛行に伴う個人レベルの絶対リスクを臨床リスク予測モデル<sup>26)</sup>で予測を試みている。これらの詳細は、関連論文<sup>27)</sup>を参照されたい。

第5席では、Helmut SCHÖLLNERBERGER 氏（ドイツ HMGU）が「カナダ透視コホートと原爆被ばく者における循環器疾患死亡リスクに関して、放射線生物学的に動機付けられたモデル化」と題して講演した。同氏は、放射線生物データに基づく多重モデル推定法（multimodel inference）を用いて、LSS 第13報死亡データ（1997年までの追跡データ）<sup>28)</sup>におけるしきい線量が脳血管疾患は  $0.62 Gy$ 、心疾患は  $2.19 Gy$  と推定する（しかし、この解析では、モデルパラメーターの不確実性の検討が十分でないと指摘されている<sup>29)</sup>）とともに、2003年までのLSS追跡死亡データにおける線量応答関係は、脳血管疾患は  $<0.75 Gy$ 、心疾患は  $<2.6 Gy$  で亜線形 (sublinear) であると推定した。同じ手法を用いて、カナダ結核透視コホートにおける虚血性心疾患死亡リスクの線量応答関係は、低・中線量域では線形、高線量域 ( $>1.5 Gy$ ) では超線形 (supralinear) であると推定した。これらの解析の詳細は、原著論文<sup>30-32)</sup>を参照されたい。

パネルディスカッションでは、主に以下の諸点が議論された。

- ・ 個々のコホート研究では死亡リスクと罹患リスクのいずれも増加が認められており、最新のメタ解析  $ERR/Gy$  は死亡リスクが罹患リスクの約2倍高い。しかし、同じコホート内で死亡リスクと罹患リスクを比較できるコホートは限られており、そのうちのひとつであるマヤック作業員コホートでは罹患リスクはさまざまな循環器疾患で増加しているのに対して死亡リスクはほとんどの循環器疾患で増加していない。死亡リスクと罹患リスクをどう考えるか。
- ・ マヤック作業員から採取した心臓試料についてプロテオーム解析（タンパク質の量・構造・機能の網羅的な解析）が実施された例<sup>33-35)</sup>があるが、このよう

なコホート構成員から採取した生体組織をどう生物研究に活用するか。

- 放射線被ばく後、長期にわたって生じる循環器疾患、神経疾患（例：パーキンソン病<sup>36)</sup>、アルツハイマー病<sup>37)</sup>、認知症<sup>38)</sup>）などの非がん影響には、炎症や加齢の加速といった共通の生物学的機構が関与しているか。
- 喫煙と糖尿病は循環器疾患の放射線リスクをほとんど修飾しないようであるが、このような疫学研究における交絡因子に関して、どの程度、知見があり、調整されているか。

### 2.3 セッション3「循環器疾患と放射線生物学」の概要

第3席以外の座長はTeni G. EBRAHIMIAN氏（フランス IRSN）が務めたが、第3席（EBRAHIMIAN氏が講演）の座長はOmid AZIMZADEH氏（ドイツ BfS）が務めた。

第1席では、Kai BORM氏（ドイツミュンヘン工科大学）が「放射線治療に伴う心臓の被ばく」と題して講演した。心臓以外の臓器のがん治療に伴い、心膜、心筋、冠動脈などさまざまな心臓の構造が被ばくする。乳がんの放射線治療の場合、循環器疾患による死亡リスクの増加が報告されたDARBYらの2013年論文<sup>39)</sup>の時代と異なり、最近では、深吸気息止め照射（deep inspiration breath hold: DIBH）、強度変調放射線治療（intensity modulated radiation therapy: IMRT）、回転させながらIMRTを行う強度変調回転照射（volumetric modulated arc therapy: VMAT）、陽子線治療、小さな腫瘍を対象とする乳房部分照射などさまざまな照射法によって、心臓への線量低減が試みられている。このような線量低減の取り組みにより、最近の報告<sup>40,41)</sup>では循環器疾患による死亡リスクは増加していない。その一方、肺がんとホジキンリンパ腫の放射線治療については、線量低減への取り組みはあるものの、循環器への有害事象は今も報告されており、さらなる線量低減が検討されている。

第2席では、Raghda RAMADAN氏（ベルギー原子力研究センター（Studiecentrum voor Kernenergie – Centre d'étude de l'Énergie Nucléaire: SCK・CEN）が「分割照射したラットと放射線治療を受けた乳がん患者におけるDNAメチル化の変化」と題して講演した。MEDIRADプロジェクトは、欧州研究・イノベーションプログラム（Horizon 2020）によって2022年まで4年間支援された医療被ばくの科学的基盤を強化するためのプロジェクトで、6つのワークパッケージ（work package: WP）があっ

た。そのWP4「心臓早期イメージングとバイオマーカー検索」では、古典的なバイオマーカーに加えて、マイクロRNAとDNAメチル化のバイオマーカーが検討され、このうち、DNAメチル化の結果が紹介された。Wistarラット雌の心臓に1回0.04 Gy、0.3 Gy、1.2 Gyを23回照射（総線量0.92 Gy、6.9 Gy、27.6 Gy）して、その1.5–12か月後に、左室心筋の長軸方向への伸縮（global longitudinal strain: GLS）を指標として心機能を評価するとともに、DNAメチル化を評価するために採血した。DNAメチル化の変化は照射後7か月以降で認められた。メチル化が変化した遺伝子のうち、GLS関連遺伝子は、SMLAP、ITRP2、E2F6、LDLR、PTPN2の5つであった。これら5つの遺伝子のうち、3つの遺伝子（SMLAP、ITRP2、E2F6）については、MEDIRAD心臓早期影響研究コホート<sup>42)</sup>の15名の乳がん患者でもメチル化の変化が認められた。これらの結果の詳細は、原著論文<sup>43)</sup>を参照されたい。

第3席では、Teni G. EBRAHIMIAN氏（フランス IRSN）が「低線量放射線と血管影響：実験研究」と題して講演した。野生型（正常な遺伝子型）のマウスは動脈硬化を発症しないが、アポリポタンパク質Eを欠損（apolipoprotein E-deficient: ApoE<sup>-/-</sup>）するマウスは脂質の代謝異常によって動脈硬化を発症する疾患モデル生物である。<sup>137</sup>Csを含む飲料水の摂取により、3–9か月かけて20–240 mGyを内部被ばくすると、ApoE<sup>-/-</sup>マウスにおける大動脈の動脈硬化が減少した。<sup>137</sup>Cs  $\gamma$ 線を外部照射したApoE<sup>-/-</sup>マウスでは、M2型マクロファージ（組織常在性単球に由来するマクロファージ）と炎症抑制性インターロイキン（interleukin 10: IL-10）の増加、高Ly6c単球とCD68陽性細胞（単球とマクロファージ）の減少が認められ、CD69陽性T細胞は変化がなかったことから、低線量・低線量率照射による動脈硬化の減少にはM2型マクロファージが主な役割を果たしていることがわかった。これらの結果の詳細は、原著論文<sup>44)</sup>を参照されたい。

第4席では、Marjan BOERMA氏（米国アーカンソー医科大学）が「放射線によって誘発される循環器への影響の生物学的機構」と題して講演した。放射線治療に伴う被ばくを念頭においたマウス心臓に生じる放射線影響について紹介した。数Gy以上の被ばく後、心臓では、拡張時・収縮時の左室機能、左室心筋の伸展、灌流に変化が生じる。ストレステストにより評価する左室収縮予備能も、照射後長期にわたり、特に雄で低下する。放射線治療をしたがん患者に生じたプラーク（動脈硬化を呈する血管壁の内部に形成される粥状隆起）の中に老化細

胞の増加が認められるとともに、低密度リポタンパク質コレステロール受容体を欠損 (low-density lipoprotein cholesterol receptor-deficient: LDLR<sup>-/-</sup>) するマウスに 7 Gy の  $\gamma$  線を照射しても、ApoE<sup>+</sup> マウスに 6 Gy の  $\gamma$  線を照射しても、プラーク内に老化細胞の増加が認められた<sup>45, 46)</sup>。左室ではミトコンドリア電子伝達系の複合体 I, 複合体 III, 複合体 V が増加しており、このようなミトコンドリア経路は、高線量域と低線量域で応答に異なる経路が異なる可能性がある。照射後、心臓の微小血管密度が減少する。活性化プロテイン C を過剰発現させたマウスに照射すると心臓の微小血管密度は、雄では減少するが、雌では変化しないことから、雌では活性化型プロテイン C が放射線影響からの防御に役割を果たしていることがわかった<sup>47)</sup>。

第 5 席では、Carmen BERGOM 氏 (米国ワシントン大学) が「アンブレイク・マイ・ハート：心臓照射の利点」と題して講演した。アンブレイク・マイ・ハート (米国の R&B 歌手であるトニー・ブラクストンが 1996 年に発表した楽曲) における心の傷を癒やすことと、心臓照射による心疾患 (難治性不整脈と心不全) の治療を掛けたタイトルである。除細動器、薬剤、カテーテルアブレーション (経皮的な心筋焼灼術) という 3 つのアプローチにより治療しても治らない心室頻拍 (ventricular tachycardia: VT) という難治性の頻脈性不整脈を、25 Gy の単回照射により放射線治療する試みがあり、同氏の所属先であるワシントン大学が先導している<sup>48)</sup>。放射線による治療効果の機構は、ナトリウムチャンネル v1.5 (脈に関与する電気信号であるナトリウムイオンの通り道) とコネキシン 43 (心筋細胞介在板のギャップ結合を構成するタンパク質) の増加である<sup>49)</sup>。また、5 Gy の単回照射による心不全の放射線治療も試みており、アシル CoA 合成酵素の心筋細胞特異的な過剰発現や大動脈弓縮窄術などによる複数の心不全モデルマウスで、照射によって心不全の軽減が認められており、その機構は左室駆出率の改善、体重あたりの左室拡張末期容積の減少、線維化の減少である。健全な心臓に照射すると線維化が促進されるが、心不全モデルマウスでは線維化が減少することから、照射時の心臓の状態により放射線の作用の方向性が異なる可能性が示唆された。

第 6 席では、Evagelia C. LAIAKIS 氏 (米国ジョージタウン大学) が「放射線によって誘発される心血管疾患における小分子」と題して講演した。小分子とは、生物学的過程を調節する可能性がある分子の質量 900 Da 未満の低分子量化合物のことである。ラットの腎臓に

10 Gy の X 線を照射すると、心臓にリモデリングが誘発される現象の機構として、炎症性サイトカインや小分子代謝物が血行性に循環することによるシグナリングであることを示した<sup>50)</sup>。心血管疾患に関連して実施されているさまざまなオミクス (タンパク質のプロテオミクス、脂質のリピドミクスなどの網羅的解析) の現状について紹介した (詳細は関連論文<sup>3)</sup> を参照)。非ヒト霊長類に 4 Gy を全身照射して、その後 3 年間、試料を採取した実験の結果についても紹介した。

パネルディスカッションでは、主に以下の諸点が議論された。

- ・プロテオミクスのデータは、ほとんど全ての研究で、測定点 (線量, 線量率, 照射後の経過時間など) が非常に限られているが、AOP などの開発においては複数の測定点での評価が必要である。そのような評価を実施できない最大の要因は予算的な制約であるが、どう打開すべきか。
- ・原爆被ばく者やマヤック作業者の試料については一部データがあるが、疫学研究で、さらなるバイオマーカーの考慮は必要か。
- ・動物モデルや培養細胞を用いた生物研究から得られた知見がヒトに当てはまるか検証するために、ヒト試料での研究が重要であるが、疫学コホートの組織アーカイブに加え、臨床における患者の試料はどのくらい採取・活用が可能か。
- ・循環器系への放射線影響について、正常な組織には有害な影響が誘発される一方、疾病を呈する組織には疾病の軽減が認められる傾向にある。このような有害な影響と治療効果の境目となるのは、どのような健康状態か。

#### 2.4 セッション 4 「心血管疾患と脳血管疾患」の概要

第 7 席以外の座長は Christian KAISER 氏 (ドイツ BFS) が務めたが、第 7 席 (Dauer 氏が講演) の座長は Simone MÖRTL 氏 (ドイツ BFS) が務めた。

各講演の概要を述べる前に、培養実験に関連する用語を説明する。In vitro (「試験管内で」の意味) とは個体 (例: ヒト, 実験動物) の生体組織 (例: 血管, 心臓) から得た細胞を培養することで、例えば、血管に由来する細胞を、二次元培養した単層細胞や、三次元培養して再構築した血管様構造に放射線を照射して、その後の応答を解析する実験が該当する。Ex vivo (「生体外で」の意味) とは個体から得た生体組織を生体外でそのまま培養することで、例えば、個体から採取した血管に放射線を照射

して、その後の応答を解析する実験が該当する。In vivo (「生体内で」の意味)とは個体のまま実験することで、例えば、個体に放射線を照射して、その後の応答を解析する実験が該当する。

第1席では、Jan FIEDLER氏(ドイツブラウンホーファー毒物学実験医学研究所)が「in vitroとex vivoでの新規アプローチによるヒト心臓生物モデル」と題して講演した。所属する研究所内で実施する心臓移植等の際に摘出される、疾病を呈した心臓が供され、2つのex vivo三次元培養法に活用している。1つ目は、心筋スライス三次元培養で、心臓の採取後72時間まで拍動を維持しながら培養可能であるが、内皮を失う欠点がある。2つ目は、三次元心臓オルガノイド培養で、ヒトiPS細胞に由来する心筋細胞、線維芽細胞、内皮細胞、ヒト脂肪由来幹細胞の共培養により作成する。ヒトiPS細胞に由来する心筋細胞のin vitro二次元培養も活用している。

第2席では、Insa SCHRÖDER氏(ドイツ重イオン研究所)が「放射線による心筋細胞の機能異常: in vitro三次元培養によるヒトリスクモデル」と題して講演した。ヒト胚性幹細胞かヒトiPS細胞から心筋細胞をin vitro三次元培養すると、100日まで増殖を続け、それ以降は成熟し、300日まで培養可能である。この心筋細胞クラスターには、心臓にある4つのタイプの心筋細胞が全て含まれている(心房細胞59%、心室細胞21%、洞結節細胞17%、プルキンエ細胞3%)。X線か鉄イオン(1 GeV/u  $^{56}\text{Fe}$ )を照射後、拍動の変化は線質により変わらないが、IL-6とIL-8は鉄イオンの方が増加する。これらの解析の詳細は、原著論文<sup>51)</sup>を参照されたい。

第3席では、James E. BATES氏(米国エモリー大学)が「小児がん治療生存者研究における心臓への遅発性影響」と題して講演した。小児がん治療生存者研究(Childhood Cancer Survivor Study: CCSS)コホートにおける小児がん診断後30年での心疾患罹患リスクは、心臓の半分以上が被ばくする場合は、5-19.9 Gyの被ばくで有意に増加したが、心臓の3割未満が被ばくする場合は20 Gy以上で有意に増加した<sup>52)</sup>。さらに詳細に推定した心臓への線量<sup>53)</sup>に基づき、心臓の被ばく部位により心疾患リスクに相違があるか解析を進めている。

第4席では、Isabella GRUMBACH氏(米国アイオワ大学)が「放射線によって誘発される脳血管疾患におけるミトコンドリア損傷」と題して講演した。ヒトでは、頭頸部放射線治療後の頸動脈狭窄は大血管の障害、頭部放射線治療後の認知機能の低下は微小血管の障害による。ぶどう膜黒色腫の $^{126}\text{I}$ 密封小線源治療後3-5年で、

血管密度と網膜厚の減少を伴い、半数が視力を喪失する。マウスでは、12 Gyを照射すると、その6か月後に微小血管関連のプロテオームが変化する。照射後、ミトコンドリアのカルシウム過負荷が起こるが、それを阻害するとミトコンドリアDNAと電子伝達系の損傷が減少する。照射後のミトコンドリア損傷により、内皮損傷がおこり、これに続き、脳血流閥門の機能異常がおこり、認知機能が低下する。

第5席では、Christos OUZOUNIS氏(ギリシャテッサロニキアリストテレス大学)が「BRIDE」と題して講演した。BRIDE(Brain Radiation Information Data Exchangeの略、<http://bride-db.eu/>)は、脳への低線量放射線影響のうち、オミクス(特にプロテオミクスと、遺伝子発現の網羅的解析であるトランスクリプトミクス)のデータに関連する文献と実験の情報(主に第7次欧州研究開発枠組み計画(7th Framework Programme: FP7)が支援したCEREBRADプロジェクトの成果である4つの論文に基づく)を統合するために開発されたプラットフォームで、システムズバイオロジーの発展に貢献すると期待されている<sup>54)</sup>。

第6席では、Rafi BENOTMANE氏(ベルギーSCK・CEN)が「胎生期と出生後早期の放射線被ばくによる認知能力と脳血管への影響」と題して講演した。CEREBRADプロジェクトの成果を紹介した。仏国と英国のCCSCにおいて、7歳未満で放射線がん治療後、27年後に脳卒中を発症した。ANGIOコホートで認知機能への影響が示された。チェルノブイリ事故において、胎内被ばくにより認知機能の低下が<0.1 Gy、清掃員で認知機能の低下が>0.25 Gyで認められた。マウスでは、>0.1 Gyの胎内被ばくで軽度の行動異常、>0.3 Gyの出生後早期の被ばくで認知機能異常が認められたが、成体被ばくでは>2 Gyで認められなかった。

第7席では、Christian KAISER氏(ドイツBfS)が「放射線治療後に生じる心血管疾患に関する生物学的機構に基づくリスクモデル化: AOPの役割とMEDIRADからの経験」と題して講演した。MEDIRADプロジェクトWP4の動物実験から得られたマイクロRNAやその他のバイオマーカーのデータとMEDIRAD心臓早期影響研究コホートにおける200名の乳がん治療患者のデータに基づき、ネットワーク解析を実施した。自然誘発の動脈硬化形成の数理モデルを生物学的機構に基づき作成し<sup>55)</sup>、放射線治療を受けた乳がん治療患者(25例、平均追跡期間9.1年)の急性冠動脈イベントと平均心線量に適用したところ、被ばく後数年に冠動脈石灰化のリス

クが増加する場合、進展した動脈硬化が被ばく時に存在することが必要なことがわかった<sup>56)</sup>。

パネルディスカッションでは、主に以下の諸点が議論された。

- ・ 心血管疾患については心臓の in vitro 培養モデルが開発されつつあるが、脳血管疾患については in vitro 培養モデルで生物学的機構を解析できるか。
- ・ 心筋スライス三次元培養などで、心筋梗塞などの急性疾患は再現できるが、心不全などの慢性疾患はどう再現するか。
- ・ KAISER 氏らが作成した動脈硬化の数理モデル<sup>56)</sup>は、低線量に適用できるか。

### 3. おわりに

本稿では、MELODI ワークショップ 2023 の概要を紹介した。本ワークショップでは、循環器への放射線影響について、放射線防護、生物学、疫学の専門家が集い、さまざまな視点から4日間にわたって議論され、科学的知見の蓄積により理解が深化しつつあるものの、未解決・未解明な点が数多くあることが再認識された。本ワークショップでの議論をまとめた学術論文が今後投稿される予定であり、更なる議論に資することが期待される。

循環器疾患について、原爆被ばく者において >2 Gy で有意な死亡リスクの増加が報告<sup>5)</sup>されてから31年が経過し、この間に疫学<sup>22)</sup>と生物学<sup>1)</sup>の知見が蓄積してきた。それを踏まえ、UNSCEARのCircuDisは2006年報告書<sup>13)</sup>を更新する報告書を2025年に刊行することを目指して検討を進めている。ICRPが循環器疾患に関するしきい線量を初めて勧告<sup>9)</sup>してから12年が経過し、現在はタスクグループ119がPublication 118<sup>9)</sup>を更新する報告書案の公開意見募集を2025年に開始することを目指して検討を進めているとともに、タスクグループ123が放射線影響の区分について検討しており、これらの検討は、2030年代に刊行が予定されているICRP次期主勧告の作成における重要構成要素と位置づけられている。今後、循環器疾患の放射線影響区分(例:組織反応、確率的影響、それ以外の区分)やリスク管理(例:吸収線量限度、実効線量限度)をどうするかなど、重要な議論が控えている。今回のMELODIワークショップ2023のような会合に今後も参加して、最新情報を収集するとともに、今後の動向に注視していく必要がある。

### 謝 辞

本稿は、原子力規制庁令和5年度放射線対策委託費(国

際放射線防護調査)事業の理解促進活動の一部であり、執筆にあたり助言をいただいた当該事業の関係者各位に感謝する。

### 利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。

### 参 考 文 献

- 1) S. TAPIO, M. P. LITTLE, J. C. KAISER, N. IMPENS, N. HAMADA, et al.; Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases, *Environ. Int.*, **146**, 106235 (2021).
- 2) V. CHAUHAN, N. HAMADA, V. MONCEAU, T. EBRAHIMIAN, N. ADAM, et al.; Expert consultation is vital for adverse outcome pathway development: a case example of cardiovascular effects of ionizing radiation, *Int. J. Radiat. Biol.*, **97**, 1516–1525 (2021).
- 3) O. AZIMZADEH, S. MOERTL, R. RAMADAN, B. BASELET, E. C. LAIAKIS, et al.; Application of radiation omics in the development of adverse outcome pathway networks: an example of radiation-induced cardiovascular disease, *Int. J. Radiat. Biol.*, **98**, 1722–1751 (2022).
- 4) ICRP; ICRP Publication 41. Nonstochastic effects of ionizing radiation, *Ann. ICRP*, **14** (3), 1–33 (1984).
- 5) Y. SHIMIZU, H. KATO, W. J. SCHULL and D. G. HOEL; Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950–1985: Part 3. Noncancer mortality based on the revised doses (DS86), *Radiat. Res.*, **130**, 249–266 (1992).
- 6) Y. SHIMIZU, D. A. PIERCE, D. L. PRESTON and K. MABUCHI; Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, part II. Noncancer mortality: 1950–1990, *Radiat. Res.*, **152**, 374–389 (1999).
- 7) ICRP; ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Ann. ICRP*, **37** (2–4), 1–332 (2007).
- 8) Y. SHIMIZU, K. KODAMA, N. NISHI, F. KASAGI, A. SUYAMA, et al.; Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950–2003, *BMJ*, **340**, b5349 (2010).
- 9) ICRP; ICRP Publication 118. ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and late effects of radiation in normal tissues and organs — threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context, *Ann. ICRP*, **41** (1/2),

- 1–322 (2012).
- 10) ICRP; Task Group 119. Effects of ionising radiation on diseases of the circulatory system and their consideration in the System of Radiological Protection. Available at: [https://www.icrp.org/icrp\\_group.asp?id=185](https://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=185), Accessed 6 June 2023.
  - 11) N. HAMADA and Y. FUJIMICHI; Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects, *J. Radiat. Res.*, **55**, 629–640 (2014).
  - 12) N. HAMADA; Noncancer effects of ionizing radiation exposure on the eye, the circulatory system and beyond: developments made since the 2011 ICRP statement on tissue reactions, *Radiat. Res.*, **200**, 188–216 (2023).
  - 13) UNSCEAR; UNSCEAR 2006 Report, Volume I, Scientific Annex B — Epidemiological evaluation of cardiovascular disease and other non-cancer diseases following radiation exposure, United Nations, New York (2008).
  - 14) NCRP; Commentary No. 24 — Health effects of low doses of radiation: perspectives on integrating radiation biology and epidemiology, NCRP, Maryland (2015).
  - 15) NCRP; Report No. 186 — Approaches for integrating information from radiation biology and epidemiology to enhance low-dose health risk assessment, NCRP, Maryland (2020).
  - 16) T. KOZBENKO, N. ADAM, V. GRYBAS, B. SMITH, D. ALOMAR, et al.; AOP 470 “Deposition of energy leads to vascular remodeling”, AOP-Wiki. Available at: <https://aopwiki.org/aops/470>, Accessed 6 June 2023.
  - 17) V. CHAUHAN, O. AZIMZADEH, S. SALOMAA and N. HAMADA; Introduction to the special issue on adverse outcome pathways in radiation protection, *Int. J. Radiat. Biol.*, **98**, 1691–1693 (2022).
  - 18) T. V. AZIZOVA, M. V. BANNIKOVA, E. S. GRIGORYEVA, K. V. BRIKS and N. HAMADA; Mortality from various diseases of the circulatory system in the Russian Mayak nuclear worker cohort: 1948–2018, *J. Radiol. Prot.*, **42**, 021511 (2022).
  - 19) T. V. AZIZOVA, M.B. MOSEEVA, E. S. GRIGORYEVA and N. HAMADA; Incidence risks for cerebrovascular diseases and types of stroke in a cohort of Mayak PA workers, *Radiat. Environ. Biophys.*, **61**, 5–16 (2022).
  - 20) T. V. AZIZOVA, M. V. BANNIKOVA, K. V. BRIKS, E. S. GRIGORYEVA and N. HAMADA; Incidence risks for subtypes of heart diseases in a Russian cohort of Mayak Production Association nuclear workers, *Radiat. Environ. Biophys.*, **62**, 51–71 (2023).
  - 21) T. V. AZIZOVA, E. S. GRIGORYEVA and N. HAMADA; Dose rate effect on mortality from ischemic heart disease in the cohort of Russian Mayak Production Association workers, *Sci. Rep.*, **13**, 1926 (2023).
  - 22) M. P. LITTLE, T. V. AZIZOVA, D. B. RICHARDSON, S. TAPIO, M. O. BERNIER, et al.; Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis, *BMJ*, **380**, e072924 (2023).
  - 23) M. P. LITTLE and N. HAMADA; Low-dose extrapolation factors implied by mortality and incidence data from the Japanese atomic bomb survivor Life Span Study data, *Radiat. Res.*, **198**, 582–589 (2022).
  - 24) M. P. LITTLE, D. PAWEL, M. MISUMI, N. HAMADA, H. M. CULLINGS, et al.; Lifetime mortality risk from cancer and circulatory disease predicted from the Japanese atomic bomb survivor life span study data taking account of dose measurement error, *Radiat. Res.*, **194**, 259–276 (2020).
  - 25) J. D. BOICE JR, B. QUINN, I. AL-NABULSI, A. ANSARI, P. K. BLAKE, et al.; A million persons, a million dreams: a vision for a national center of radiation epidemiology and biology, *Int. J. Radiat. Biol.*, **98**, 795–821 (2022).
  - 26) A. KHERA, M. J. BUDOFF, C. J. O’DONNELL, C. A. AYERS, J. LOCKE, et al.; Astronaut cardiovascular health and risk modification (Astro-CHARM) coronary calcium atherosclerotic cardiovascular disease risk calculator, *Circulation*, **138**, 1819–1827 (2018).
  - 27) J. L. HUFF, I. PLANTE, S. R. BLATTNIG, R. B. NORMAN, M. P. LITTLE, et al.; Cardiovascular disease risk modeling for astronauts: making the leap from Earth to space, *Front. Cardiovasc. Med.*, **9**, 873597 (2022).
  - 28) D. L. PRESTON, Y. SHIMIZU, D. A. PIERCE, A. SUYAMA and K. MABUCHI; Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997, *Radiat. Res.*, **160**, 381–407 (2003).
  - 29) M. P. LITTLE, T. V. AZIZOVA, D. BAZYKA, S. D. BOUFFLER, E. CARDIS, et al. Comment on “dose-responses from multi-model inference for the non-cancer disease mortality of atomic bomb survivors” (*Radiat.*

- Environ. Biophys (2012) 51: 165–178) by Schöllnberger et al., *Radiat. Environ. Biophys.*, **52**, 157–159 (2013).
- 30) H. SCHÖLLNBERGER, J. C. KAISER, P. JACOB and L. WALSH; Dose-responses from multi-model inference for the non-cancer disease mortality of atomic bomb survivors, *Radiat. Environ. Biophys.*, **51**, 165–178 (2012).
- 31) H. SCHÖLLNBERGER, M. EIDEMÜLLER, H. M. CULLINGS, C. SIMONETTO, F. NEFF, et al.; Dose-responses for mortality from cerebrovascular and heart diseases in atomic bomb survivors: 1950–2003, *Radiat. Environ. Biophys.*, **57**, 17–29 (2018).
- 32) H. SCHÖLLNBERGER, J. C. KAISER, M. EIDEMÜLLER and L. B. ZABLITSKA; Radiobiologically motivated modeling of radiation risks of mortality from ischemic heart diseases in the Canadian fluoroscopy cohort study, *Radiat. Environ. Biophys.*, **59**, 63–78 (2020).
- 33) O. AZIMZADEH, T. AZIZOVA, J. MERL-PHAM, V. SUBRAMANIAN, M. V. BAKSHI, et al.; A dose-dependent perturbation in cardiac energy metabolism is linked to radiation-induced ischemic heart disease in Mayak nuclear workers, *Oncotarget*, **8**, 9067–9078 (2017).
- 34) A. PAPIEZ, O. AZIMZADEH, T. AZIZOVA, M. MOSEVA, N. ANASTASOV, et al.; Integrative multiomics study for validation of mechanisms in radiation-induced ischemic heart disease in Mayak workers, *PLoS One*, **13**, e0209626 (2018).
- 35) O. AZIMZADEH, T. AZIZOVA, J. MERL-PHAM, A. BLUTKE, M. MOSEVA, et al.; Chronic occupational exposure to ionizing radiation induces alterations in the structure and metabolism of the heart: A proteomic analysis of human formalin-fixed paraffin-embedded (FFPE) cardiac tissue, *Int. J. Mol. Sci.*, **21**, 6832 (2020).
- 36) T. V. AZIZOVA, M. V. BANNIKOVA, E. S. GRIGORYEVA, V. L. RYBKINA and N. HAMADA; Occupational exposure to chronic ionizing radiation increases risk of Parkinson's disease incidence in Russian Mayak workers, *Int. J. Epidemiol.*, **49**, 435–447 (2020).
- 37) O. LAURENT, E. SAMSON, S. CAËR-LORHO, L. FOURNIER, D. LAURIER, et al.; Updated mortality analysis of SELTINE, the French cohort of nuclear workers, 1968–2014. *Cancers*, **15**, 79 (2022).
- 38) M. GILLIES, D. B. RICHARDSON, E. CARDIS, R. D. DANIELS, J. A. O'HAGAN, et al.; Mortality from circulatory diseases and other non-cancer outcomes among nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS), *Radiat. Res.*, **188**, 276–290 (2017).
- 39) S. C. DARBY, M. EWERTZ, P. MCGALE, A. M. BENNET, U. BLOM-GOLDMAN, et al.; Risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer, *N. Engl. J. Med.*, **368**, 987–998 (2013).
- 40) F. KILLANDER, E. WIESLANDER, P. KARLSSON, E. HOLMBERG, D. LUNDSTEDT, et al.; No increased cardiac mortality or morbidity of radiation therapy in breast cancer patients after breast-conserving surgery: 20-year follow-up of the randomized SweBCGRT trial, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **107**, 701–709 (2020).
- 41) M. L. HOLM MILO, D. SLOT MØLLER, T. BISBALLE NYENG, L. HOFFMANN, H. DAHL NISSEN, et al.; Radiation dose to heart and cardiac substructures and risk of coronary artery disease in early breast cancer patients: A DBCG study based on modern radiation therapy techniques, *Radiother. Oncol.*, **180**, 109453 (2023).
- 42) M. LOCQUET, D. SPOOR, A. CRIJNS, P. VAN DER HARST, A. ERASO, et al.; Subclinical left ventricular dysfunction detected by speckle-tracking echocardiography in breast cancer patients treated with radiation therapy: A six-month follow-up analysis (MEDIRAD EARLY-HEART study), *Front. Oncol.*, **12**, 883679 (2022).
- 43) M. SALLAM, M. MYSARA, M. A. BENOTMANE, A. P. G. CRIJNS, D. SPOOR, et al.; DNA methylation alterations in fractionally irradiated rats and breast cancer patients receiving radiotherapy, *Int. J. Mol. Sci.*, **23**, 16214 (2022).
- 44) N. REY, T. EBRAHIMIAN, C. GLOAGUEN, D. KERESSELIDZE, V. MAGNERON, C. A. BONTEMPS, et al.; Exposure to low to moderate doses of ionizing radiation induces a reduction of pro-inflammatory Ly6chigh monocytes and a U-curved response of T cells in APOE<sup>-/-</sup> mice, *Dose Response*, **19**, 15593258211016237 (2021).
- 45) S. SADHU, C. DECKER, B. E. SANSBURY, M. MARINELLO, A. SEYFRIED, et al.; Radiation-induced macrophage senescence impairs resolution programs and drives cardiovascular inflammation, *J. Immunol.*, **207**,

- 1812–1823 (2021).
- 46) Y. YAMAMOTO, M. MINAMI, K. YOSHIDA, M. NAGATA, T. MIYATA, et al.; Irradiation accelerates plaque formation and cellular senescence in flow-altered carotid arteries of apolipoprotein E knock-out mice, *J. Am. Heart Assoc.*, **10**, e020712 (2021).
- 47) V. SRIDHARAN, K. A. JOHNSON, R. D. LANDES, M. CAO, P. SINGH, et al.; Sex-dependent effects of genetic upregulation of activated protein C on delayed effects of acute radiation exposure in the mouse heart, small intestine, and skin, *PLoS One*, **16**, e0252142 (2021).
- 48) P. S. CUCULICH, M. R. SCHILL, R. KASHANI, S. MUTIC, A. LANG, et al.; Noninvasive cardiac radiation for ablation of ventricular tachycardia, *N. Engl. J. Med.*, **377**, 2325–2336 (2017).
- 49) D. M. ZHANG, R. NAVARA, T. YIN, J. SZYMANSKI, U. GOLDSZTEJN, et al.; Cardiac radiotherapy induces electrical conduction reprogramming in the absence of transmural fibrosis, *Nat. Commun.*, **12**, 5558 (2021).
- 50) M. LENARCZYK, E. C. LAIAKIS, D. L. MATTSON, B. D. JOHNSON, A. KRONENBERG, et al.; Irradiation of the kidneys causes pathologic remodeling in the nontargeted heart: A role for the immune system, *FASEB Bioadv.*, **2**, 705–719 (2020).
- 51) T. SMIT, E. SCHICKEL, O. AZIMZADEH, C. VON TOERNE, O. RAUH, et al.; A human 3D cardiomyocyte risk model to study the cardiotoxic influence of X-rays and other noxae in adults, *Cells*, **10**, 2608 (2021).
- 52) J. E. BATES, R. M. HOWELL, Q. LIU, Y. YASUI, D. A. MULROONEY, et al.; Therapy-related cardiac risk in childhood cancer survivors: An analysis of the childhood cancer survivor study, *J. Clin. Oncol.*, **37**, 1090–1101 (2019).
- 53) S. SHRESTHA, J. E. BATES, Q. LIU, S. A. SMITH, K. C. OEFFINGER, et al.; Radiation therapy related cardiac disease risk in childhood cancer survivors: Updated dosimetry analysis from the Childhood Cancer Survivor Study, *Radiother. Oncol.*, **163**, 199–208 (2021).
- 54) C. KARAPIPERIS, S. J. KEMPF, R. QUINTENS, O. AZIMZADEH, V. L. VIDAL, et al.; Brain Radiation Information Data Exchange (BRIDE): integration of experimental data from low-dose ionising radiation research for pathway discovery, *BMC Bioinformatics*, **17**, 212 (2016).
- 55) C. SIMONETTO, M. HEIER, A. PETERS, J. C. KAISER and S. ROSPLESZCZ; From atherosclerosis to myocardial infarction: A process-oriented model investigating the role of risk factors, *Am. J. Epidemiol.*, **191**, 1766–1775 (2022).
- 56) C. SIMONETTO, J. C. KAISER, V. A. B. VAN DEN BOGAARD, J. A. LANGENDIJK and A. P. G. CRIJNS; Breast cancer radiation therapy and the risk of acute coronary events: Insights from a process-oriented model, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **114**, 409–415 (2022).



浜田 信行 (はまだ のぶゆき)

2010年度より現所属 (上席研究員)。専門は放射線影響。ICRP TG111・TG119・TG123 委員, NCRP PAC 1 委員, OECD/NEA/CRPPH/HLG-LDR/RAD-CHEM AOP TG 委員, カナダ宇宙健康影響 AOP プロジェクト諮問委員会委員など現任。

E-mail: hamada-n@criepi.denken.or.jp



保健物理, 58 (3), 194 (2023)

## 情報のページ

### 日本保健物理学会 2023 年度第 2 回編集委員会議事録

日時：2023 年 9 月 11 日（月）13:00～15:00

場所：Zoom 会議

出席：細田（委員長）、鈴木、島田、真田、岩岡、前田、五十嵐、高原、平尾、吉田、川端、玉熊（以上、委員）、笠原（事務局）

議題：

- ・ 新任委員紹介と役割分担について
- ・ 前回議事録の確認
- ・ 編集スケジュールについて
- ・ 各自担当・役割の進捗状況について  
A 区分 / B 区分 / C 区分 進捗状況・審査状況  
第 57 巻 2 号の目次予定
- ・ 幹事校正及び編集後記担当者について
- ・ 巻頭言について
- ・ Jto W, RPW について
- ・ 1F 事故関連記事検討 WG について
- ・ 企画記事について
- ・ 投稿の手引き改訂について
- ・ その他

配布資料：

- 資料 R5-02-00 2023 年度第 2 回編集委員会議事次第
- 資料 R5-02-01 2023-2024 編集委員会委員名簿
- 資料 R5-02-02 2023 年度第 1 回編集委員会議事録
- 資料 R5-02-03 「保健物理」第 58 巻編集スケジュール
- 資料 R5-02-04 投稿論文審査状況
- 資料 R5-02-05 第 58 巻 3 号の目次予定
- 資料 R5-02-06 幹事校正及び編集後記担当者
- 資料 R5-02-07 巻頭言と J to W のリスト
- 資料 R5-02-08 投稿の手引き改定案
- 資料 R5-02-09 編集委員会覚書（2023.7 版）

議事：

1. 新任委員及び役割分担について  
資料 R5-02-01 を基に、編集委員会委員の紹介を行い、役割分担を確認した。
2. 2023 年度第 1 回編集委員会議事録  
資料 R5-02-02 を基に、編集委員会議事録を確認した。
3. 編集委員会スケジュール確認

資料 R5-02-03 を基に、今後のスケジュールを確認した。

4. 各自担当・役割の進捗状況について  
資料 R5-02-04 を基に、論文審査の進捗状況の確認をした。  
資料 R5-02-05 を基に、第 58 巻 3 号の目次を確認した。
5. 幹事校正等の分担について  
資料 R5-02-06 を基に、今後の幹事校正及び編集後記担当者を確認した。
6. 巻頭言について  
資料 R5-02-07 を基に、今後の巻頭言、J to W 執筆者候補について議論し、候補者を加えた資料を作成することとした。
7. J to W, RPW について  
資料 R5-02-07 を基に、J to W の候補について議論し、今後、学会等において各委員が最近の研究の動向について注視し、トピックについて検討することとした。
8. 1F 事故関連記事検討 WG について  
1F 事故関連記事検討 WG における JRPR に投稿準備中の概要記事について進捗状況を確認した。また、個別記事の候補に関する検討の状況についても委員に確認し、WG の今後の活動に関して議論を行った。
9. 企画記事について  
現在進行中の企画記事についての状況を確認した。その他の企画記事案についても議論を行い、引き続き適切なトピックの検討を行うこととした。
10. 投稿の手引き改訂について  
資料 R5-02-08 及び資料 R5-02-09 を基に、査読者選定および SI 推奨表現に関する投稿の手引き及び編集委員会覚書の改訂案について確認を行った。改訂の詳細を確認後、投稿の手引きの改訂について理事会に報告することとした。
11. その他  
研究発表会等の学会開催報告及び印象記作成の依頼について、過去の経緯を確認した。第 56 回研究発表会での取扱い等について、大会事務局に確認することとした。  
次回編集委員会が第 56 回研究発表会で対面での開催を計画している旨、情報を共有した。

次回開催時期：2023 年 11 月

（編集委員会幹事 長崎大学 玉熊佑紀）

本号にも掲載されているようなシンポジウムやワークショップの参加報告も学会員にとって大変有益だと再認識した。当学会では良質なシンポジウムなどが多数提供されている。参加できなかったものについて記事を読んで追体験できることに加えて、自分が参加したものについて書かれた記事を読むことで新たな気づきが得られるのも面白い。(A. Y.)

#### 複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(公社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、図書館も著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

Tel: 03-3475-5618 Fax: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

Tel: 1-978-750-8400 Fax: 1-978-646-8600

#### Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

<Except in the USA>

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

Tel: 81-3-3475-5618 Fax: 81-3-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

<In the USA>

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA

Tel: 1-978-750-8400 Fax: 1-978-646-8600 <http://www.copyright.com>

#### 一般社団法人日本保健物理学会事務局

〒105-0004 東京都港区新橋3-7-2 四鹿ビル3F

(株)国際広報企画内

Tel: 03-6205-4649 Fax: 03-6205-4659

E-mail: exec.off@jhps.or.jp

<http://www.jhps.or.jp>

#### Japan Health Physics Society

c/o International Public-Relations System Co., Ltd

Yoshimatsu Bldg. 3F, 3-7-2, Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004, Japan.

Tel: +81+3-6205-4649 Fax: +81+3-6205-4659

E-mail: exec.off@jhps.or.jp

<http://www.jhps.or.jp>

#### 一般社団法人日本保健物理学会編集事務局

〒113-0032 東京都文京区弥生2-4-16

(一財)学会誌刊行センター内

Tel: 03-3817-5821 Fax: 03-3817-5830

E-mail: hobutsu@capj.or.jp

#### Japanese Journal of Health Physics

c/o Center for Academic Publications Japan

2-4-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.

Tel: +81-3-3817-5821 Fax: +81-3-3817-5830

E-mail: hobutsu@capj.or.jp

# 放射線管理のベストパートナー

富士電機は、放射線計測に関する豊富な知識と技術で、  
放射線利用施設の計画立案、設計・施工、運用、メンテナンスに至るまで、  
お客様を一貫してサポートします。

取扱製品

## 放射線管理システム

放射線モニタリングシステム

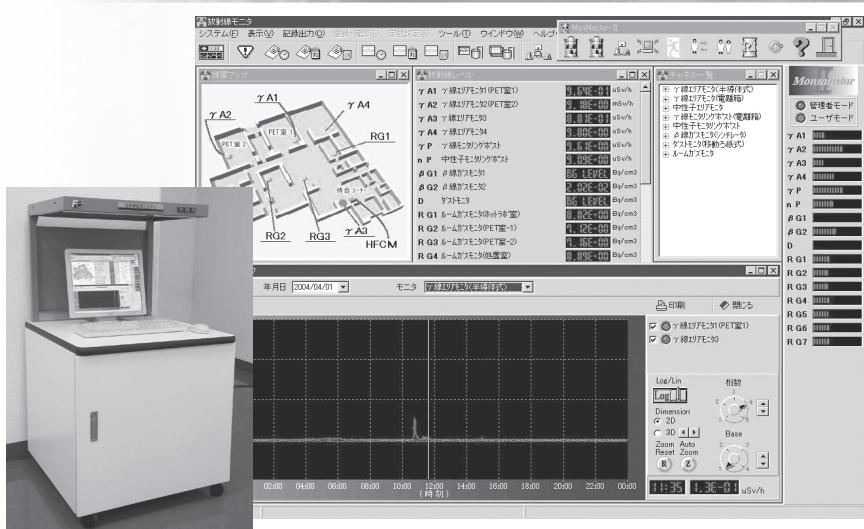
R I 排水管理システム

出入管理システム

非密封R I 管理システム

従事者管理システム

インターロックシステム



## 測定器

各種サーベイメータ

個人線量計 / 環境線量計

モニタリングポスト

ホールボディカウンタ

体表面モニタ

食品放射能検査システム

その他



**富士電機株式会社** 放射線システム部

〒191-8502 東京都日野市富士町1番地 TEL 042-585-6024

<http://www.fujielectric.co.jp/> Email [fric-info@fujielectric.com](mailto:fric-info@fujielectric.com)

# 新型ハイブリッドサーベイメータ RaySafe 452

FLUKE®

Biomedical

## As versatile as you are

半導体とGM管を組み合わせたハイブリッド技術により、1台の測定器で様々な測定用途に対応することが可能になった「RaySafe 452」が登場しました。

その高い可能性、簡便性は、経費、時間の節約にも等しい価値を生み出します。



### <測定用途に応じて選べる3機種>



RaySafe 452



RaySafe 452 Air Kerma



RaySafe 452 Ambient

R/Gy/rad	●	●	
Sv/rem	●		●
cps/cpm	●		

FLUKE®  
Biomedical

LANDAUER®

RaySafe™

【お問い合わせ】  長瀬ランドウア株式会社 営業部

TEL: 029-839-3322 FAX: 029-836-8441  
mail@nagase-landauer.co.jp  
https://www.nagase-landauer.co.jp/



【製造メーカー名】 フルークバイオメディカル社

https://www.flukebiomedical.com/

