

## 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リ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 国内外のエックス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エックス線が発生していた。	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。既にエックス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	蛍光エックス線膜厚計の点検・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	厚さ計のエックス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、その漏洩エックス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. 研究用エックス線装置

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エックス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エックス線回折装置や元素分析に利用する蛍光エックス線装置などがある<sup>4)</sup>。また近年では、屋外での撮影に適したポータブルエックス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エックス線装置なども活用されている。一方、医歯薬学系などではエックス線 CT (Computed Tomography) 装置・エックス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エックス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エックス線装置の動作・状態確認を怠り、エックス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。例えばエックス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。例えば小型エックス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エックス線の発生を確認できない不適切な設計の例や、エックス線 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エックス線が発生させる際などに起こりうる。例えば、エックス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エックス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. 医療用エックス線装置

現代医学では放射線の利用は必要不可欠なものである。特にエックス線 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、日本ではエックス線 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があるとして計算, 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り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に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続させる」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。

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いる<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、ハイリソビ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、不安全な状態（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, 福土政広, 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/FBN549\\_202209web2.pdf](https://www.c-technol.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/FBN549_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穴川 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ーは、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

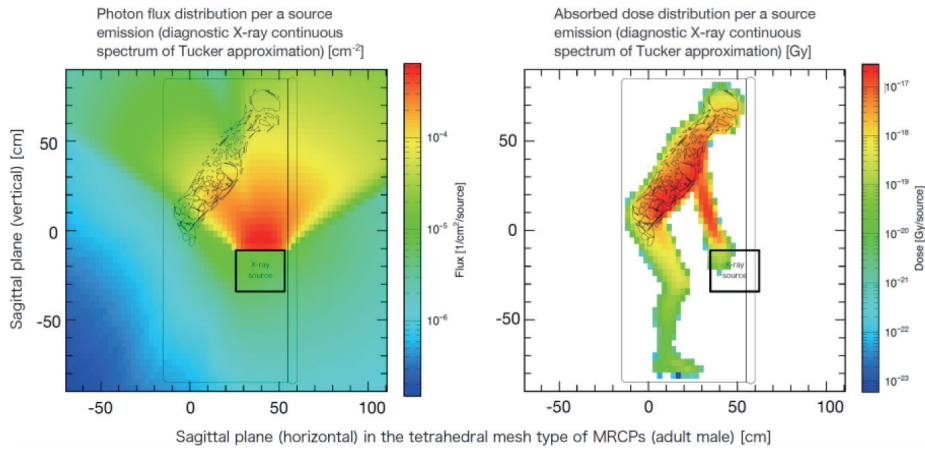
るTUCKERの近似式<sup>7)</sup>を用い、管電圧を120kVに設定した。線源は、タングステンターゲットの角度は12度、アルミニウム固有フィルタ2.8mm及び銅付加フィルタ0.3mmの条件で推定した。

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。

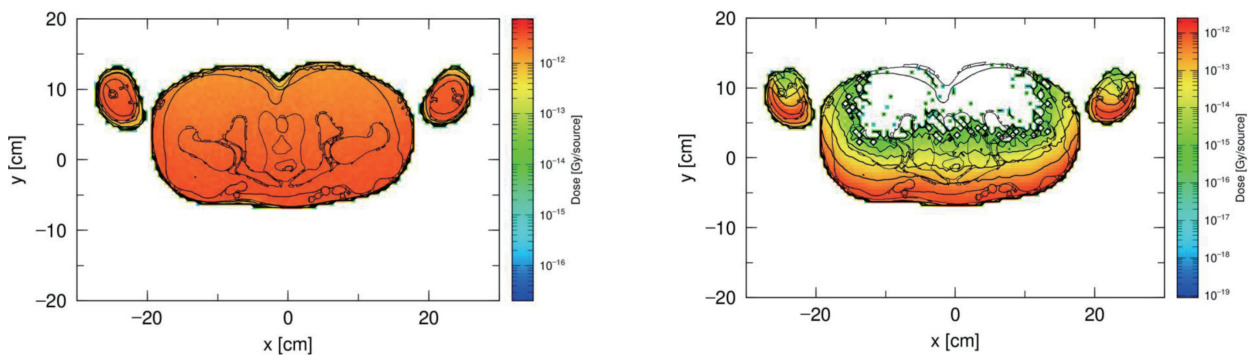
### (2) 線量評価の結果

**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γ線被ばく(例えば<sup>137</sup>Cs線源からのγ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γ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

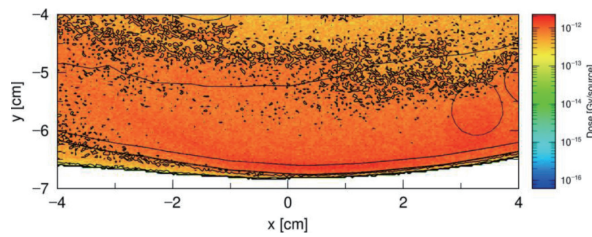


**Fig. 1** Examples of exposure dose due to X-rays by introducing the tetrahedral mesh-type MRCP with posture of bending.



(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 <sup>137</sup>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엑ス線のように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. 엑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

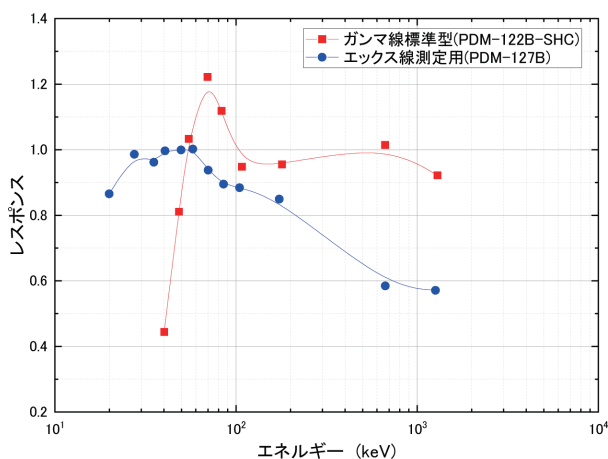


Fig. 4 Example of energy responses of electronic personal dosimeters. This was created by the author based on reference [16].

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

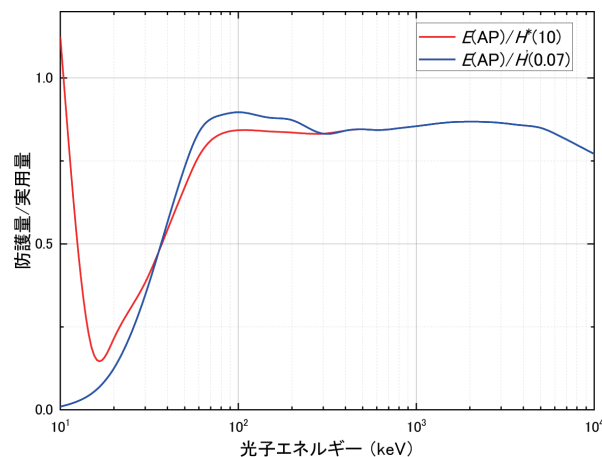


Fig. 5 Comparison of ratios of different occupational quantity to protection quantity.



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/page.cgi?id=87>, Accessed 17 July 2023.
- 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るべきものなので、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かっている。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；高気圧酸素療法の評価をレーザー血流計で行った急性放射線被ばくによる皮膚障害の1例，第50回日本集中治療医学会学術総会，4 March, 2023, 京都.
- 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).