

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^{*1,2}, 小田 啓二^{*1,3}, 笠井 篤^{*1,4}, 古渡 意彦^{*1,5,#},
阪間 稔^{*1,6}, 浜田 信行^{*1,7}, 福士 政広^{*1,8}

(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^{*1,2}, Keiji ODA^{*1,3}, Atsushi KASAI^{*1,4}, Munehiko KOWATARI^{*1,5,#},
Minoru SAKAMA^{*1,6}, Nobuyuki HAMADA^{*1,7} and Masahiro FUKUSHI^{*1,8}

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¹⁾。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¹⁾。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」²⁾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 γ 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^{3,4)}。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⁵⁾。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⁹⁾。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⁷⁾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 110⁸⁾)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 145⁹⁾)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¹⁰⁾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¹³⁷Cs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 145⁹⁾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⁻²)あたりに規格化した。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

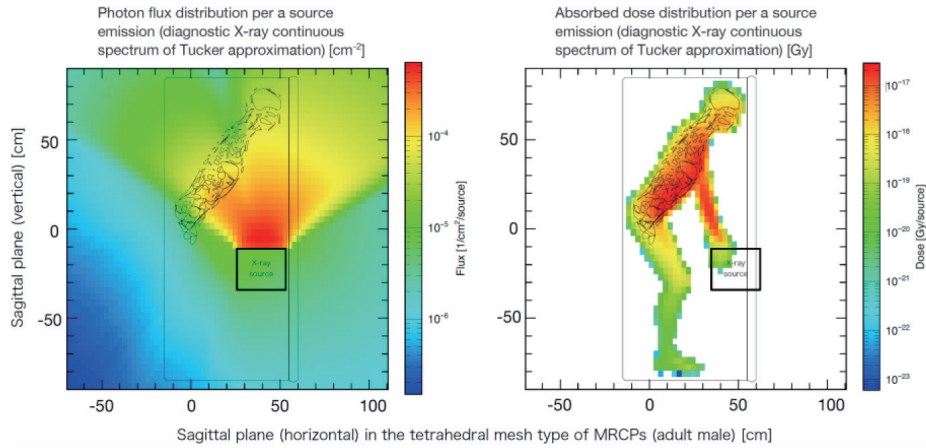
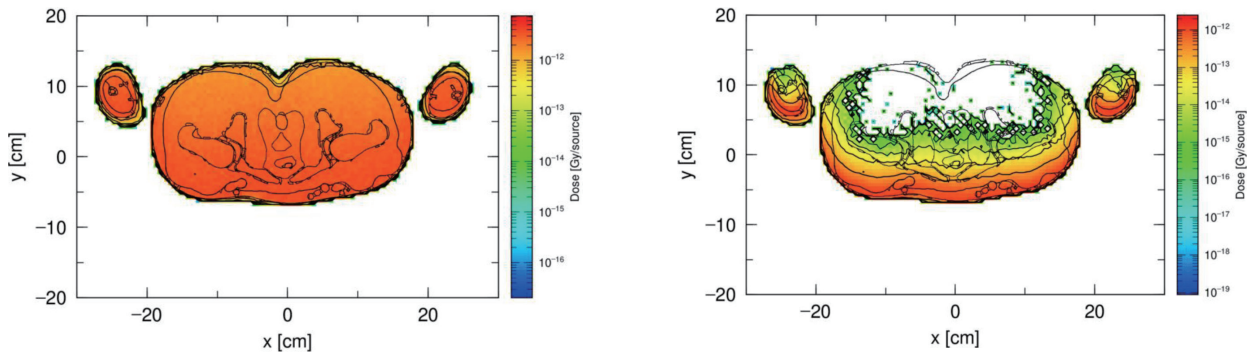
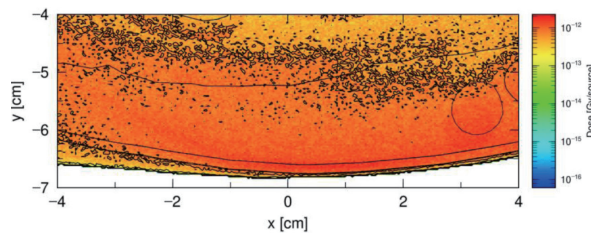


Fig. 1 Examples of exposure dose due to X-rays by introducing the tetrahedral mesh-type MRCP with posture of bending.



(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 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¹¹⁾。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 ¹³⁷Cs が

らの γ 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 γ 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}Cs からの γ 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¹²⁾。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 92¹³⁾や米国放射線防護審議会（NRC）のReport No. 181¹⁴⁾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^{15,16)}、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. エックス線装置からのエックス線計測について

4.1 検討結果

今回のエックス線被ばく事故の原因となった装置のような、産業用エックス線装置からのエックス線計測は、①連続照射でないエックス線装置の場合はパルス状に放射されること、及び②エックス線のエネルギーが低いこと、に起因する課題がある。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) 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、パルスエックス線校正場での特性評価試験と実際のエッ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エッ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エックス線場での校正、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。

エッ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エックス線装置の場合、発生するエックス線はパルス状に放射されると考えられる。エックス線源からのパルスエックス線は、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、エックス線管電圧 60 kV–120 kV、管電流 5 mA–1000 mA、パルス幅 1 ms–20 ms とエックス線装置の運転条件に幅がある。結果として、散乱線のエックス線エネルギーは 20 keV–100 keV で、個人線量当量率は、 5 mSv h^{-1} から 10 Sv h^{-1} に達すると報告されている¹¹⁾。

上述のような非常に高い線量率のエッ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、パルスエッ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¹⁷⁾。

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}Co γ 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 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 γ 線を正当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²¹⁾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

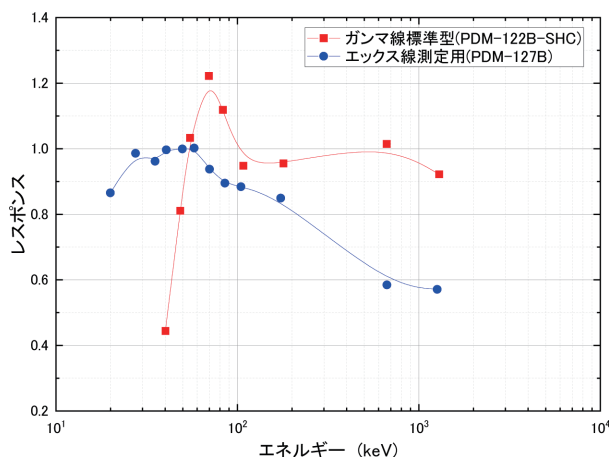


Fig. 4 Example of energy responses of electronic personal dosimeters. This was created by the author based on reference [16].

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 μm 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 μm 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 μm 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

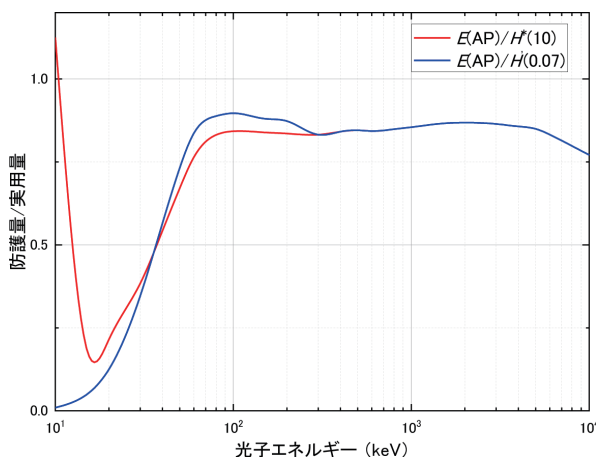


Fig. 5 Comparison of ratios of different occupational quantity to protection quantity.

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, 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).