

エックス線被ばく事故検討 WG
経過報告書

2022 年 7 月

目 次

総括.....	2
1. WGのスコープと活動方針	3
1.1. WG 設立趣旨、体制及び活動方針	3
1.2. WG における検討課題	4
2. 放射線事故等の公開情報及びエックス線事故等の概要.....	5
2.1. 国内外の放射線事故に関する公開情報	5
2.2. 大学等におけるエックス線トラブルの事例	10
2.3. 日本製鉄で発生した事故の概要	12
3. エックス線装置とそれらによる被ばくの特徴.....	17
3.1. 非破壊検査装置の特徴と利用等の現状	17
3.2. 大学・研究機関におけるエックス線装置とそれらによる被ばくの特徴	23
3.3. 学校教育現場におけるエックス線被ばくの可能性と管理	26
4. 安全文化に関する検討.....	30
4.1. エックス線被ばく事故の再発防止の観点からの検討	30
4.2. エックス線作業主任者養成の観点からの課題	33
4.3. 「職場の安全サイト」を参考にした労働安全の取組み	35
4.4. ウラン加工工場（JCO）臨界事故の教訓.....	38
5. 今後の検討課題.....	40
5.1. エックス線装置の規制	40
5.2. 放射線の管理と品質マネジメントシステム	48
5.3. エックス線被ばくに関する線量評価.....	50
5.4. 線量測定及び被ばく線量再構築時の課題	53
5.5. エックス線被ばくの放射線影響.....	55
附属資料.....	57
報道例	57

総括

日本保健物理学会は、2021年5月29日に日本製鉄（兵庫）で発生したエックス線被ばく事故の社会的な重大性を考慮し、2021年7月14日、エックス線被ばく事故検討ワーキンググループ（WG）を設置した。同WGでは、事故の背景と経緯、線量評価、健康影響などの情報収集を行い、1）事故の背景、経緯とその対応に関する情報を収集・分析し、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。情報発信においては、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。さらに、4）WG発足の経緯となった事故に留まらず、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。

経過報告書作成の2022年7月時点で、日本製鉄でのエックス線事故の背景、経緯とその対応の概要についての公式情報は、国際原子力機関（IAEA）におけるIAEA-supported Nuclear Events Web-based System（NEWS）への登録内容の他にはない。このような状況の中で、本WGではこれまで、日本製鉄でのエックス線事故についての公式情報を紹介すると共に、国内外での放射線事故・エックス線事故事例、エックス線装置に関する運用、安全管理、法令上の課題について検討してきた。また、放射線事故再発防止、エックス線装置の規制のあり方、放射線安全文化に資する放射線管理、品質マネジメントシステムの導入・運用、エックス線による被ばく線量の評価・測定、エックス線被ばくに対する健康影響等を今後の検討課題として議論を進めているところである。

本報告書では本WGにおける上記のこれまでの検討内容についてまとめ、紹介する。

令和4年7月29日
エックス線被ばく事故検討WG

1. WGのスコープと活動方針

1.1. WG 設立趣旨、体制及び活動方針

去る 2021 年 5 月 29 日、日本製鉄（兵庫）でエックス線被ばく事故が発生し、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ことが報道された。厚生労働省は同様の測定装置を扱う他の企業に被ばく防止の徹底を求めるとの通知を発出し、労働基準監督署などもこの事故の状況調査を開始している。

放射線防護の諸問題を扱い、放射線安全文化の醸成に関する活動を強化している日本保健物理学会は、この事故の社会的な重大性を考慮し、関連の情報を独自に収集して会員間で共有すると同時に、必要な情報を社会にも発信していくことが専門家集団としての責務であると考え、「エックス線被ばく事故検討 WG」を設置することにした。

本 WG では、事故の背景と経緯、線量評価、健康影響などの情報収集を行い、1) 安全管理上の対策・課題、2) 測定、線量推定に関する課題、3) 社会とのコミュニケーション上の課題、等を整理する。

WG 目的

被ばく線量評価、放射線防護、放射線安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。

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 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 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 電子科学研究所

川島恒憲 東芝エネルギーシステムズ

中村美和	日本アイソトープ協会
浜田信行	電力中央研究所
福土政広	つくば国際大学
笠井 篤	元日本原子力研究所
辻本 忠	安全安心科学アカデミー
橋本 周	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	大阪公立学（日本放射線安全管理学会推薦）
阪間 稔	徳島大学（日本放射線安全管理学会推薦）

1.2. WGにおける検討課題

WG設置の目的は、「被ばく線量評価、放射線防護、放射線安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。」である[1]。

本経過報告書では、上記(1)から(4)の観点で今回のエックス線事故の背景・経緯についての整理を進めるほか、より広い視野で放射線安全文化の更なる醸成に資する観点から、放射線関連の事故のリスクを可能な限り低減することを目指し、検討を進める。本経過報告書作成時点の2022年5月末時点で、エックス線事故の背景、経緯とその対応についての公式情報は、発災後の厚生労働省からの通知を除き、後述の国際原子力機関(IAEA)におけるIAEA-supported Nuclear Events Web-based System (NEWS)への登録の他にない状況である。従って、経過報告書では、事故の背景、経緯と関係各所による対応について取り扱っておらず、最終報告書にゆだねる。一方で、国内外での放射線事故・エックス線事故事例を紹介し(第2章)、エックス線の利用に関する広い視野、すなわち事故発生の要因となった同種の装置を含めたエックス線装置を使用する際に生じる運用上、安全管理上、及び法令上の課題について検討を進めた(第3章)。放射線安全文化の醸成については、エックス線事故を含めた放射線事故再発防止の観点で検討した(第4章)。さらに、エックス線装置の規制のあり方、放射線安全文化に資する放射線管理、放射線管理のための品質マネジメントシステムの導入・運用、エックス線による被ばく線量の評価・測定、並びにエックス線被ばくに対する放射線影響について、今後の検討課題として挙げた(第5章)。

参考文献

[1] <http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=87> access on 28th December 2021

2. 放射線事故等の公開情報及びエックス線事故等の概要

2.1. 国内外の放射線事故に関する公開情報

国際原子力機関（IAEA）では加盟国から報告された事故事例を収集している。日本放射線安全管理学会（JRSM）の海外の放射線施設の放射線事故に係る最新知見の収集WG（以下、『JRSMの海外最新知見の収集WG』）によってIAEA-supported Nuclear Events Web-based System（NEWS）への登録事例に関して情報がまとめられている[1][2]。

JRSMの海外最新知見の収集WGでは、Laka財団が公開しているIAEAに報告された事例データベース[3]に2000年1月から2021年12月の間に発生し報告された異常事象や事故事例のうち、国際原子力事象評価尺度（INES）レベル2以上（異常事象・事故）の事例（現在まで）について詳細情報を収集し、参考となる課題を抽出している。

以下にそれぞれの項目の概要を示し、それぞれの項目について2021年5月29日に日本製鉄（兵庫）で発生したエックス線被ばく事故事例での経緯を併記する（2022年5月末現在）。

(1) 線量・リスク評価に関する課題

JRSMの海外最新知見の収集WGでは線量・リスク評価に関する課題に関して、次のように提言されている。

- ① 局所的な被ばくに対しては、被ばくした身体部位の吸収線量の分布をできるだけ正確に把握して、将来起こり得る炎症等（放射線被ばくによる組織反応）の予測評価に供することが肝要である。
→2021年5月29日に日本製鉄（兵庫）で発生したエックス線被ばく事故事例（以下、本事例）では、国内では関連の情報が公表されていない（2022年5月末現在）。
- ② 事象が発生した時点で、線量評価に有用な情報（現場の写真、モニタリングデータ、関係者の供述／行動記録、衣類や爪など遡及的な線量推定に役立ち得る試料等）をできるだけ詳しく収集・保存し、規制当局や独立した専門機関による遡及的な検証を容易に行えるようにしておく必要がある。
→本事例では、個人情報保護のために独立した専門機関による遡及的な検証がなされているかどうかの詳細が未発表となっている。2022年5月末現在で、線量評価には至っていないがINESスケールで3と評価されている。
- ③ リスクに応じた管理の徹底（規制の整備）として、IAEA一般安全要件GSR part 3の段階的な放射線管理を規制に導入する。
→本事例では、事前のリスク評価に関する情報が不明である。

- ④ 電離則第 44 条の遵守と情報公開として、各事業所は電離則第 44 条を遵守し、行政機関は電離則第 44 条に基づき報告された事例を集計し IAEA に通報・公開する。
→本事例は日本政府から IAEA に情報提供がなされ 2022 年 5 月に IAEA-NEWS に掲載された。
- ⑤ 援助体制の整備として報告された事例に対して関係機関が協力し、当該事業所の背景も踏まえて解決の援助を行う。
→本事例では、日本保健物理学会は、日本放射線安全管理学会と連携して、原則公開情報を基に事故の検討をすることを決めたが、具体的な検討には踏み込めてはいない。

(2) 国内外でのこれまでの放射線事故の概要

国内外のこれまでの放射線事故とその概要について、本 WG の委員から情報の提供を求めたところ、欧州連合 (EU) における取り組み事例が報告された[4][5]。また研究用エックス線装置での事故事例の分析例が報告された[6]。この分析では以下が抽出されていた (表 1)。

表 1 研究用エックス線装置での事故事例の分析結果

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 放射線源であるという認識の不足または欠如がみられる。 2. 20 名の事故当事者のうち、15 名が学生。 3. 教育と経験が大切。 4. 事故原因が似かよっている。 5. いたずらという特殊事例を除くと、事故原因の大半が、シャッターと、カメラの部品であるビーム・ビューに関するもの。 6. シャッターに関するものでは、使っていない側のシャッターが開いていることに気づけなかった事例や使用中のシャッターが閉じているものと誤認して利用線錐中に手を入れた事例など。 7. ビーム・ビューに関するものでは、ビーム・ビューをつけ忘れた事例や、鉛ガラスがはずれた状態のまま覗いた事例など。 8. フィルムバッジの情報が役立つことがある。 9. 細いビームによる被ばくが問題となる。 |
|---|

装置の分解による被ばく事例は、1994 年に報告例があった[7]。また、インターロックの意図的な不作動による電子部品工場での軟エックス線局所被ばく事故が 2000 年に報告されていた[8]。2001 年の岩手県の高校の理科の授業での被ばく事故では、放射線医学総合研究

所（現量子科学技術研究開発機構）が質の高い線量評価を行っていた[9]。2005年には、光学機器事業所のクリーンルーム内で、レンズの静電気除去のための軟エックス線照射装置の前で実験中、スイッチが入っていることに気づかず、照射野で作業を行った事例が発生している[9]。この他、公開されていない事故事例の存在も本WGの委員から示唆された。

(3) 過去の事例における学会の取り組み

たとえば、日本原子力研究開発機構(JAEA)大洗プルトニウム汚染事故では、日本保健物理学会としての取り組みがなされて、その成果が報告されている。この事故では、日本保健物理学会の当該事故WGが「(1)保健物理を専門としない方が、JAEA等から公表された報告書等を理解するうえで手助けとなる情報を発信する。(2)事故とその対処に関する情報を収集し、専門家としての観点から分析を行う。(3)事故分析に基づいて教訓を抽出し、安全文化醸成に資する見解の発信を行う」を目的とし立ち上がり、JAEAで事故対応に係わった保健物理の関係者へのヒアリングも行い、提言をまとめている[10]。

また、医療安全の分野では、日本医療機能評価機構が医療事故の再発防止に資することを目的として医療事故情報収集等事業において死亡事故以外の事故情報も収集している[11]。

(4) 事故に対する各省庁の取り組み

厚生労働省は、様々な事例を収集・分析し、データベース化するとともに職場の安全サイト[12]を運営している。これまでに得られた安全確保のための教訓として表2に示される項目が提示されている。

表2 安全確保のために提唱されている項目

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">● 安全衛生管理体制の整備、安全衛生委員会の活性化、特に、エックス線装置製造・検査部門におけるライン管理者の日常の安全衛生管理活動の活発化● 作業標準の整備と徹底● 放射線業務従事者に係る非正常作業の標準化の整備とその徹底● 安全衛生教育訓練の実施、放射線業務従事者に対する安全衛生教育訓練、特に、放射線業務の危険有害性に関する再教育及び単独作業における『一人KY(危険予知)活動』の定着化のための教育訓練の実施 |
|---|

中央労働災害防止協会も事例を提示している。非正常作業に対するものとして、ガイドラインを通知している例がある（自動化生産システムの非正常作業における安全対策のためのガイドラインの策定について）[13]。このガイドラインは関係団体でも周知活動がされている（林業・木材製造業労働災害防止協会）[14]。

行政機関と連携した取り組みとして中央労働災害防止協会も事例を提示している[15]。

原子力規制庁でも試験講習等において RI 等規制法対象施設における事故の発生状況を提示している[16][17]。また、原子力安全委員会でも放射性物質及び放射線の関係する事故・トラブルの情報を整理して公開している。脆弱性に関して、『1. 新しい技術の導入に際して、従事者が不慣れであるか、システムに不備がある。2. 慣れすぎによるマニュアルの無視、手順の省略等がある。3. 運転条件、作業手順等の変更の際に確認の不備がある。4. 世代交代の際に、経験、知識、技能の継承に不備がある。5. 規制対象の範囲に問題がある。6. 責任の狭間にあたり、安全管理責任の受け渡しが不徹底である。』が提示されていた[18]。一方、事故の原因の分析が必ずしも妥当とは考えられない例もあった。例えば、排気濃度限度超過例に対して文部科学省から「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ついて」という通知が発出され、医療機関の測定の不備を指摘している[19]。しかし、実際には特定の製造会社の製品のみで事例が発生しており、消耗品の不適切な管理手順が医療機関に提示されていたことが直接的な原因であった[20]。このため、前述の通知は、本質を捉えていないと考えられており、専門の学会との連携がより本質的な対応に資すると考えられた。

(5) 事故調査資料の事故調査委員会以外での利用制限

事故調査で得られた情報の利用に関して、航空事故調査に関わる国際的な取り決めである国際民間航空機関 (ICAO) の国際民間航空条約第 13 付属書：航空機事故調査 国際基準及び勧告方式 (International Standards And Recommended Practices, Aircraft Accident And Incident Investigation, Annex 13, To The Convention On International Civil Aviation) において、以下のように事故調査資料を事故調査以外には利用しないこととしている[21]。

5.12 The State conducting the investigation of an accident or incident shall not make the following records available for purposes other than accident or incident investigation, unless the appropriate authority for the administration of justice in that State determines that their disclosure outweighs the adverse domestic and international impact such action may have on that or any future investigations:

- a) all statements taken from persons by the investigation authorities in the course of their investigation;
- b) all communications between persons having been involved in the operation of the aircraft;
- c) medical or private information regarding persons involved in the accident or incident;
- d) cockpit voice recordings and transcripts from such recordings; and
- e) opinions expressed in the analysis of information, including flight recorder information.

[翻訳]

5.12 事故、またはインシデントの調査実施国は、その国の関係司法行政当局が、その調査、または今後の調査に及ぼす国内外での悪影響を上回ると判断した場合でなければ、以下の記録を事故、またはインシデントの調査の目的以外に使用できるようにしてはならない。

- a) 調査当局が調査の過程で人々から得た全ての口述
- b) 航空機の運航に関係した人々の間の通信
- c) 事故、またはインシデントに関係した人々に関する医学的、または個人的情報
- d) 操縦室の音声記録及びその記録の読み取り記録
- e) フライトレコーダー情報を含む情報の分析において表明された意見。

ただし、この課題に関しては国会でも質疑がされており、捜査当局からの見解は示されていない（第151回国会 国土交通委員会 第9号（平成13年3月30日））。

また、医療事故調査制度においても刑事訴訟法、民事訴訟法上の規定を制限することはできないとしながら、責任追及を目的としていないことを明示している[22][23]。しかしながら、捜査が始まると調査に支障をきたすことになる。さらに、2003年7月15日の東京高裁判決では、事故調査の事情聴取部分は開示対象とはならないとの判断が示されているものの、調査で得られた資料が訴訟で使われることを拒否することが困難になりかねない。このため、ヒューマンエラーに着目するのではなくシステム的な視点で報告書をまとめることや事故原因調査と再発防止の検討の場を分けることが重要との指摘がある（「事故調」に制度根幹にかかわる法的問題」、滋慶医療科学大学長が指摘 医療安全特別セミナー「医療事故調査制度5年間を振り返って」レポート（2020年12月7日） 橋本佳子）。

(6) IAEAの取り組み

労働者を守る仕組みで訪問団もチームワークを機能させ、国際的なガイドラインをベースにして職業放射線防護評価事業 Occupational Radiation Protection Appraisal Service(ORPAS)が機能している[24]。自己評価を推奨し、客観的な評価が提供され、要改善点や良好事例が提示され、改善法も勧告しそれぞれが責任を果たすことを目指している。

また、IAEAは国際原子力事象評価尺度(International Nuclear and Radiological Event Scale, INES)を各国政府との協力の下に、原子力事故・故障の評価を公表している。IAEA-NEWSへの登録事例は各加盟国からの報告に基づいているため、各加盟国の規制などにも依存している。このため、日本からの報告は相対的に少ないと考えられている。その一方、放射線治療事故は日本から積極的に情報発信されており[25]、分野による違いがある。

2.2. 大学等におけるエックス線トラブルの事例

(1) 事故・トラブルの代表例とその原因

照射中に、意図的にエックス線装置のカバーを開けることができ、ダイレクトビームの影響が及ぶ範囲（照射野）に身体の一部を入れることができってしまうような、ある程度の被ばくリスクを伴う比較的古い時代のエックス線装置がある。大学や研究所等では、その便利さゆえにこのような装置をいまでも継続的に使用しているケースが多々見受けられる。このような古い時代からの装置では、インターロックを解除さえすれば、つまり解除キー（セーフティリリースキー）を使えば、いつでもビーム発生時に、ある目的でカバーを開けて作業することも可能となる。このような装置の利用の歴史では、以下のような代表的な被ばくトラブルが知られている。

<例1> 粉末エックス線回折装置を使って実験を行おうとしたとき、他者が実験中であることを確認せず、また、エックス線シャッターが開いていることを確認せずに閉じているものと思い込み、試料交換をしてしまった。そのときに指先を被ばくした可能性があった。

<例2> 実験で、封入エックス線管球の右横に小さなワイヤー状の試料を取り付けたデバيشェラーカメラを据え付けた。実験者はエックス線管球にスイッチを入れ、蛍光板によりビームの有無を確認するときに、カメラの中心部にある試料の位置が気になり、位置を調整するため試料の先端を指で触れようとしてしまった。その場に立ち会っていた実験補助者がとっさに注意したのですがすぐに手を引っ込めたが、指を被ばくしたかも知れないと不安になった。

<例3> エックス線ラウエ装置を使用しているとき、結晶の軸合わせの必要があった。エックス線口のシャッターが開いていることに気づかず、エックス線ビームの下流側から目視により結晶位置をコリメーター（直径数 mm）の照射口に位置を合わせてしまい、エックス線を浴びてしまった可能性があった。

被ばくの事故やトラブルが発生する主なタイミングは、試料または減衰板の挿入時、またはビームの照射位置の調整時が多いようである。被ばくの原因は、シャッター開閉の確認不足やエックス線発生時の ON/OFF 認知の欠如、装置を引継いだ際の伝達ミス等に基づく装置構造の理解不足、などが知られている。事故トラブルを防止するための対策として、以下の項目が、教育訓練の中で扱われている例がある。

- ① ビームの照射状態を確認する。
- ② 利用線錐の経路内には、むやみに身体部分を入れない。
- ③ 警報装置点灯時には管理区域内（装置の内部も含む）には侵入しない。
- ④ 試料交換作業時は可能な限り主電源を切ってから行う。やむを得ない場合には、エックス線の発生を止める、あるいはビームシャッターが閉じていることを確認する。
- ⑤ 管理区域には必ずエックス線作業主任者を選任して、エックス線装置の近くの見やすい場所に注意事項を掲示する。正副のエックス線作業主任者の氏名、連絡先を明記すると良い。
- ⑥ 管理区域設定が必要ない装置に関しても、装置管理責任者を選任し、安全管理や教育訓練についての業務を担当させるのが良い。
- ⑦ 非定常的な使用を行う場合は、上記のエックス線作業主任者や装置管理責任者に安全面について相談をするのが良い。

(2) エックス線装置メーカーとしての対応例

人為的なミスに基づくトラブルを回避するために、最近のエックス線装置では安全性がシステムとして高められており、たとえば最も事故トラブルが発生しやすい管球や試料を交換した際のビームの調整が自動化されているものがある。試料を照射野に自動搬送できるシステムも種々提案されている。また、照射野に入るためのインターロック扉の解除ボタンは装備されているものの、ビームが出ているときにビームシャッターを開けるための解除キーは用意されていないなどの工夫がみられる。つまり、最近の装置の場合は、被ばく等を伴う事故・トラブルの危険性はきわめて小さくなったといえる。

過去には、エックス線の発生部のみを販売、納品した事例もあったようである。研究者がその研究目的に見合った装置を独自に設計、整備して完成させた装置も多く、そのような装置こそが現在の被ばく事故トラブルの主たる原因になっている。現在は、設置型装置の場合には防エックス線カバーを備えていないもの、つまり、エックス線の発生部のみでの販売実績は無いようである。また、通常の規格から外れるような装置は原則販売しない方針とのことだが、まれに規格から外れる特注品の場合には、入念な説明の後に同意書の提出をお願いするなどの追加の対応をしているとのことであった。

今後には注意を要しそうなのは携帯型・小型のエックス線装置で、これらのニーズは高まっているようである。発生部そのものが対象となるので、その使用における安全システムの確立が論点になるかもしれない。研究用エックス線装置の事故トラブルの原因とその対策に関する具体例に加え、最近のエックス線装置の構造や用途、利用における安全講習の事例のさらなる収集をした上で、今後の安全対策のあり方について検討を進めたい。

2.3. 日本製鉄で発生した事故の概要

(1) 概要 (2022年5月31日現在)

- 事業所からの報告後、厚生労働省からは迅速に事実が公表された (次項参照)
 - 詳細については調査中とし、一般論に基づき注意喚起された
- 報道は、厚生労働省の事実公表後にそれぞれ独自になされていた
- 発災元の事業所も取材に応じていた
 - 会社として情報発信しない理由が説明された
- 日本政府からの情報提供に基づき IAEA の INES News から 2022年5月9日に情報が発信された[26]。

(2) 厚生労働省からの文書で示されている本事例の概要

本事例の概要は、厚生労働省から表 2.3.1 のように示されている[27]。なお、第 68 回「電離放射線障害の業務上外に関する検討会」では、「個別の労災請求事案に係る医学的事項について」として、兵庫労働局事案も扱われているが、本事例と関係しているかどうかは情報が公開されていない。

表 2.3.1 厚労省の通知の概要

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">● 2021年5月29日に、専用の測定室に設置された鋼材の膜厚を計測するエックス線装置の点検作業に従事していた作業員2名が被ばくする災害が発生しました。エックス線装置の点検作業に作業員2名が従事している間、当該装置からエックス線が照射されたままの状態になっており、大量の放射線に被ばくをしたものです。● 本件災害の詳細については調査中ですが、一般に鋼材等の計測に用いるエックス線装置は高線量のエックス線が照射されることから、エックス線が照射された状態で作業を行った場合には、点検等の短時間の作業であっても大量の放射線に被ばくするおそれがあります。● つきましては、類似の災害発生を防止するための当面の対応として、下記の事項に留意いただき、エックス線装置の点検作業等における被ばく防止の徹底を図っていただきますようお願い申し上げます。 |
|--|

(3) 報道で示されている事例の概要

この厚生労働省のアクションを受けて付属資料に示すような報道がなされた。放射線影響の観点から、後述の「5-4 エックス線被ばくに関する放射線影響」に「今回の被ばく事故の放射線影響について、報道等の公開情報に基づいて時系列順にまとめると、次の通りであ

る。」と整理されている。もっとも、報道等の公開情報には必ずしも一貫性はなく混乱もある。これらの報道は2021年6月になされており、その後の続報は2022年5月31日現在、確認できていない。

日本製鉄では、本事例に関して報道発表などを行っていないが[28]、休業災害事例としては計上していると考えられる[29]。

NHKの報道では、日本保健物理学会の取り組みに関しても以下のように言及されている。『提言の策定に向けて7月にもワーキンググループを立ち上げ、事故の経緯や当時の安全管理体制、装置のリスクなどに関する情報を独自に収集して原因や課題を分析する予定です。メンバーには、放射線防護や健康影響、エックス線装置などの専門家のほか、原子力発電所での放射線管理などに詳しいメーカーの技術者を選定するという事です。日本保健物理学会の吉田浩子会長は「安全管理が適切に行われずに被ばくしたと考えられる重大な事故で、専門家の観点から事故の原因や再発防止に必要な点などを精査する」と話しています。』

(4) IAEAのINES NEWSでの公表情報

2021年5月29日、日本製鉄の瀬戸内製鉄所（兵庫県姫路市）で蛍光X線を用いた厚さ計（出力50kV×40mA）の点検・校正が行われた。

本装置でX線を照射するための操作は大きく分けて以下の3つである。

- 本装置への電源供給
- X線管の電圧と電流を上げる。
- 照射窓のシャッターを開ける。

これらの操作は、通常、操作パネルで行うが、操作パネルはX線装置が設置されている照射室の外側にある。

当初、2名の作業者は照射室外の操作パネルを操作していたが、校正用の試料で異常値を示したため、装置に電源を入れたまま照射室内に入った。日本では、このようなX線装置に対して照射室のドアが開くと電源が遮断されるようなインターロックは事業者への法的要求事項にはなっていない。

照射室内に入った作業員2名はX線照射窓に付着物があるのを確認したため、作業員の1名がハンドツールで除去し、もう1名が補助を行った。

作業員2名は、照射室に入る際に照射窓のシャッターを閉めたと考えていたが、実際にはシャッターが閉まっていなかった。このため、作業中に装置から照射されるX線に曝された。

5月30日、作業員2名が致命的でないが腕や顔に紅斑などの症状が出現したため、病院に入院し治療を受けた。2名は2021年12月末までに退院し、2022年5月現在も外来治療中である。

専門家による被ばく線量の検証が行われているが、2022年5月現在では最終的な評価に

至っておらず、日本政府は、評価が確定し次第、IAEA に報告するとしている。

参考文献

- [1] 保田浩志, 山口一郎, 佐瀬卓也, 角山雄一. 放射線防護に係る海外の最新知見の収集. 令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(放射線防護研究分野における課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成)放射線防護対策の推進に関する調査と提言 [Internet]. 2021. Available from: http://www.umbrella-rp.jp/R2JRSM_report.pdf
- [2] 保田浩志, 山口一郎, 佐瀬卓也, 角山雄一. 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. 2021;20:68-73.
- [3] Landelijk Kernenergie Archief - National Nuclear Energy Archive. IAEA-database of nuclear and radiological incidents [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.laka.org/docu/ines/>
- [4] EU-OSHA. Tools and resources [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://osha.europa.eu/en/tools-and-resources>
- [5] The Health and Safety Executive. RR508 - Evaluation into the success of occupational health and safety regulators and organisations use of expert systems [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr508.htm>
- [6] 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. 1982;17:495-504.
- [7] 東京大学. 東京大学放射線取扱者再教育用資料 No.11 [Internet]. 1993 [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.ric.u-tokyo.ac.jp/reeducation/reeducation11-15.pdf>
- [8] 富永 隆子. 事業所における放射線事故対応 [Internet]. 2017 [cited 2022 Jul 4]. Available from: http://www.i-s-l.org/shupan/pdf/SE189_1_open.pdf
- [9] AKASHI M, HACHIYA M, TOMINAGA T, TATSUZAKI H, SUZUKI T, YAMADA Y. Radiation Emergency Medical Preparedness as social infrastructure. Journal of the Atomic Energy Society of Japan. 2011;53:336-43.
- [10] Plutonium Accident in JAEA-Oarai JWG for, IWAI S, SASAKI M, HIGAKI S, YAMANISHI H, KAI M. Report of the JHPS Working Group for Plutonium Intake Accident. Japanese Journal of Health Physics. 2018;53:271-81.
- [11] 公益財団法人日本医療機能評価機構. 医療事故情報収集等事業 [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.med-safe.jp>
- [12] 厚生労働省. 職場のあんぜんサイト [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/SAI_FND.aspx

- [13] 厚生労働省. 自動化生産システムの非定常作業における安全対策のための ガイドラインの策定について [Internet]. 1997. Available from:
<https://www.jaish.gr.jp/anken/hor/hombun/hor1-38/hor1-38-18-1-0.htm>
- [14] 林業・木材製造業労働災害防止協会. 木材製造業における非定常作業での留意点について [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from:
<https://www.rinsaibou.or.jp/safety/maintenance.html>
- [15] 中央労働災害防止協会. 安全衛生情報センター [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.jaish.gr.jp>
- [16] 原子力規制委員会. 過去の事故・トラブル情報（国立国会図書館インターネット資料収集保存事業(Warp)へリンク） [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from:
<https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/warp.html#suii>
- [17] 原子力規制委員会. 事故故障等の報告件数の推移等 [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/suii/index.html>
- [18] 原子力安全委員会. 放射性物質および放射線の関係する事故・トラブルについて [Internet]. 2002 [cited 2022 Jul 4]. Available from:
<http://www.joshrc.org/files/20020400-001.pdf>
- [19] 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 [Internet]. 2008 [cited 2022 Jul 4]. Available from:
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/2611605/www.mext.go.jp/a_menu/anzenkakuho/news/bousihou/1269687.htm
- [20] 梶本 和義. 最近の事故事例から学ぶ放射線安全管理『第7回 日本放射線安全管理学会（2008年） 企画セッション2』. 日本放射線安全管理学会誌. 2009;8:37-8.
- [21] International Civil Aviation Organization. Annex 13 — Aircraft Accident and Incident Investigation contains the international Standards and Recommended Practices for aircraft accident and incident Investigation Manual of Aircraft Accident and Incident Investigation (Doc 9756): [Internet]. 2013 [cited 2022 Jul 4]. Available from:
<https://www.icao.int/safety/airnavigation/AIG/Pages/Documents.aspx>
- [22] 一般社団法人日本医療安全調査機構. 医療事故調査制度について [Internet]. 2017 [cited 2022 Jul 4]. Available from:
https://www.medsafe.or.jp/modules/others/index.php?content_id=1
- [23] 厚生労働省. 医療事故調査制度に関する Q&A (Q 2 4) [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000061227.html>
- [24] IAEA. eSARIS Question Set [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from:
<https://gnssn.iaea.org/csn/sa/default.aspx>

- [25] 放射線治療品質管理機構. 2001 年ー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. 2020.
- [26] Nuclear Regulatory Authority J. Worker exposure to X-ray generator [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www-news.iaea.org/ErfView.aspx?mid=fb4ba5bc-9926-4b7b-af1f-91bd61a85d7f>
- [27] 厚生労働省労働基準局 安全衛生部労働衛生課長. エックス線装置の点検作業等における被ばく防止の徹底について [Internet]. 2021 [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.mhlw.go.jp/content/000787485.pdf>
- [28] 日本製鉄. ニュースリリース [Internet]. [cited 2022 Jul 4]. Available from: <https://www.nipponsteel.com/news/>
- [29] 日本製鉄. 統合報告書 2021 [Internet]. 2021 [cited 2022 Jul 4]. Available from: https://www.nipponsteel.com/ir/library/annual_report.html

3. エックス線装置とそれらによる被ばくの特徴

3.1. 非破壊検査装置の特徴と利用等の現状

(1) 工業用エックス線装置

(i) エックス線装置と関係法令

一般的には、エックス線を発生する機器全般が「エックス線装置」と言われている。この装置の使用に伴う被ばくを防ぐ観点からは、これらの行為を「危険又は有害な作業」として、法的規制をかける必要がある。しかしながら、エックス線の利用は多岐にわたるため、ひとつの共通な法令でカバーすることは難しい。こうした背景から、本節では、主に工業用に使われている装置を対象とすることとし、医療用や教育研究用の装置については、別の項目或いは本 WG 最終報告書（又は改訂版）で扱うことにする。

医療用機器については、「医療法」や「薬機法」（医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律：厚生労働省）等によって、また、高エネルギーの放射線発生装置等は「RI 等規制法」（原子力規制委員会）によって作業員（及び公衆）の被ばくを防止している。本節で取り扱う工業用エックス線装置及びそれらを扱う労働者の安全管理については、安衛法及び電離則（厚生労働省）の管轄となっている。安衛法は、「職場における労働者の安全と健康を確保するとともに、快適な職場環境の形成を促進することを目的」（安衛法第 1 条）としており、これを受けて電離則第 1 条で「事業者は、労働者が電離放射線を受けることをできるだけ少なくするように努めなければならない。」、即ち、対象を労働者に限り、被ばく線量を as low as possible としているところに特徴がある。

(ii) 法令（安衛法／電離則）上の定義

安衛法第 42 条で、「危険若しくは有害な作業を必要とするもの、危険な場所において使用するもの又は危険若しくは健康障害を防止するため使用するものうち政令で定めるものは、厚労大臣が定める規格又は安全装置を具備しなければ譲渡し、貸与し、又は設置してはならない。」とし、同施行令第 13 条の中で、「波高値による定格管電圧が 10kV 以上のエックス線装置（エックス線又はエックス線装置の研究又は教育のため使用のつど組み立てるもの、及び薬機法第 2 条第 4 項に規定する医療機器で、厚生労働大臣が定めるものを除く）」と規定し、これを「特定エックス線装置」と言い、後述のように安全機器装着等が義務付けられている。

一方、労働災害を防止するための管理を必要とする作業、つまり危険な作業を行う場合に

は、「作業主任者」を置いて労働者を指揮するよう規定しており [安衛法第 14 条]、そのひとつとして「放射線作業に係る作業（医療用又は定格管電圧が 1,000 kV 以上のエックス線装置を使用するものを除く） [施行令第 6 条] がリストされている。このように、装置（付属機器含む）及び作業内容の両面に制限をかけている。

(iii) 装置の分類

工業用エックス線装置を分類するには、エックス線の利用目的、検査・測定原理、定格管電圧・管電流（出力）、エックス線放射特性、管理区域の様態などいくつかの視点がある。表 3.1.1 および図 3.1.1 に代表的なエックス線利用機器をまとめておく。

表 3.1.1 代表的な工業用エックス線装置の分類

原理 相互作用	利用/目的	代表的な諸元 (管電圧等)	特徴	エックス線発生	図
透過 (減弱)	ラジオグラフィ	100-300 kV 3-4 mA	照射室内 屋外(石油プラント等)	側面一方向 全周方向	(a)
	(特殊なもの)	100-270 kV 0.01-1 mA バッテリー	パルス照射式 小型軽量		
	基板検査 (マイクロフォーカス)	90-160 kV 0.5 mA 以下	微焦点(0.1-100 μm)	管理区域はボックス内部	
	異物検査	60-100 kV 1 mA 程度	1 mm 焦点	同上	(b)
回折	残留応力測定	30 kV 1.5 mA 程度	ブラッグの法則 ゴニオメータ		(c)
後方散乱	セキュリティ検査 配管検査	70-140 kV 1 mA 程度	エックス線発生器と測定器が一体		(d)
分光 (特性エックス線)	金属分析	35-70 kV 1 mA 程度	設置型、卓上型 ハンドヘルド型		(e)



(a)ラジオグラフィ



(b)異物検査装置



(c)残留応力測定装置



(d)後方散乱エックス線検査装置



(e)蛍光エックス線金属分析器
(ハンドヘルド型)

図 3.1.1 代表的な工業用エックス線装置

出典は各メーカーのカタログ及びホームページ。(a)トーレック、(b)ポニー工業、(c)IHI
検査計測、(d)ポニー工業、(e)オリンパス

(2) 被ばく防止の観点から

エックス線装置使用に伴う被ばくを抑えるためにいくつかの方策がとられており、それらを大きく分けて、①装置本体に対する安全措置、②装置設置場所（利用場所）における安全規制、及び③装置の使用上の注意がある。

(i) エックス線装置構造規格

上述のとおり安衛法／電離則で定義された装置（特定エックス線装置）には、告示で規定されている「エックス線装置構造規格」（図 3.1.2）を満足しなければならない〔電離則第 10 条〕。この規格では、まず焦点から 1 m における空気カーマ率の上限値（2.6 mSv/h：管電圧 200 kV 未満、4.3 mSv/h：200 kV 以上）を設定することによって、利用する方向以外に漏れるエックス線を遮へいしておくことを課している。また、利用線錘（ビーム）の放射角を限定するため（遮へいの補強のため）の「照射筒」又は「絞り（スリット）」を、さらに、誤照射された場合に大きな被ばく線量になりかねない低エネルギーエックス線（軟エックス線）を除去するための「ろ過板（フィルター）」が取り付けられる構造でなければならないとしている（利用目的によっては例外措置あり）。

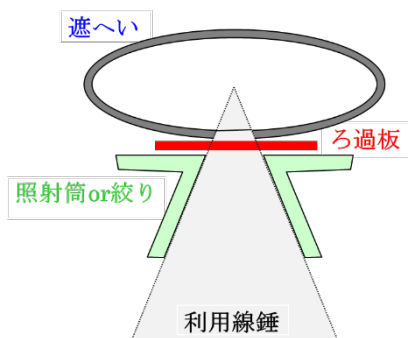


図 3.1.2 エックス線装置構造規格

1. 区域の設定

電離則で規定している区域を図 3.1.と図 3.1.4 に図示する。なお、この区域に立ち入る者を制限するとともに標識や注意事項を掲げることは、RI 等規制法等など法令と同じである。

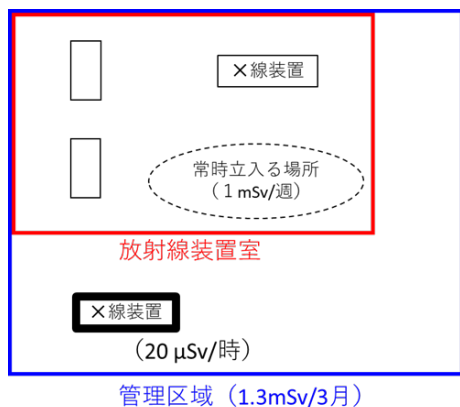


図 3.1.3 区域設定（屋内）

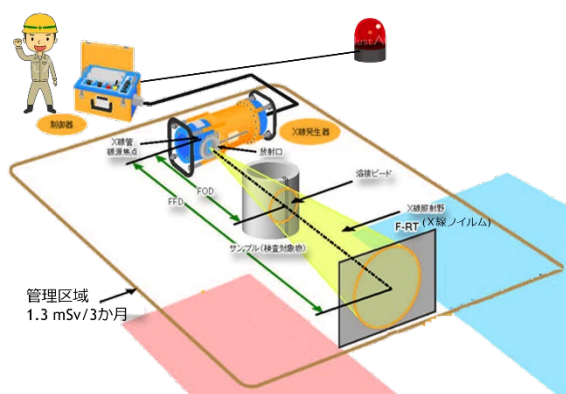


図 3.1.4 区域設定（屋外）

他の放射線発生装置や放射性同位元素等と同様に、事業所敷地内に「管理区域」〔電離則第 3 条〕（実効線量が 3 月間で 1.3 mSv を超える区域）を設定し、さらにこの区域内にエックス線装置を置いて使用する専用の室、「放射線装置室」を設け〔電離則第 15 条〕、この室内で人が常時立ち入る場所における実効線量を 1 週間につき 1 mSv になるように遮へいすることを求めている〔電離則第 3 条の 2〕。放射線装置室内に置かない例外として 2 つのケースがあり、ひとつは、装置外側での 1 cm 線量当量率が $20 \mu\text{Sv/時}$ 以下になるように十分遮へいされている場合である。もうひとつは、大型機器やプラント機器の検査等のように、どうしても屋外で使用しなければならない場合で、これについては、エックス線装置の焦点及

び被照射体から 5 m かつ 1 週間につき 1 mSv を超える空間を「立入禁止区域」として、労働者が入らないようにしなければならない〔電離則第 18 条〕。この場合には、さらにその外側に管理区域が設定されることになる。

以上が通常のエックス線装置の区域設定であるが、小型の検査装置のように、「エックス線の照射中に労働者の身体の一部がその内部に入ることのないように遮へいされた構造の放射線装置等を使用する場合であって、その外側のいずれの箇所においても、実効線量が 3 月間につき 1.3 mSv を超えないものについては、当該装置の外側には管理区域が存在しないものとして取り扱って構わない。」とされている〔労働基準局長通知、基発第 253 号〕。その例として、インターロックを有している照射ボックス付きエックス線装置、出入口には労働者の手指等が装置内に入ることがないように 2 重の含鉛防護カーテンで仕切られている空港の手荷物検査装置、同様な被ばく防止機能を有するものがある。

II. 被ばく低減のための措置

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」を義務付けている〔電離則第 17 条〕。また、「間接撮影」及び「透視」については、作業中の注意事項を述べている。前者では、照射野の制限（受像面を超えない）や遮へいの確認（装置の接触可能表面から 10 cm における空気カーマ率の設定）など〔電離則第 12 条〕が、後者では、作業位置での停止操作、過剰電流の自動制御、照射野の制限など〔電離則第 13 条〕の措置が定められている。

労働者が受ける被ばく線量の測定と記録、作業環境の測定と結果の掲示・記録、健康診断の実施等ほか他の法令と同様である。また、RI 等規制法で義務付けられている教育訓練（管理区域立入前と 1 年毎の再教育）に対応するものとして、「エックス線装置を用いて行う透過写真の撮影業務」について、当該業務に初めて従事する時に「特別の教育」を行わせることになっている〔電離則第 52 条の 2、安衛法第 59 条、同規則第 36 条〕。また、局長通知〔基発第 39 号〕により、安全衛生教育指針に基づき、従事後は定期的（おおむね 5 年ごと）に健康教育を行うことになっている。

(3) 安全管理体制

労働者の安全衛生管理は、一義的には事業者には責任がある。事業者は、総括安全衛生管理者を選任し、安全管理者・衛生管理者・作業主任者等の指揮に加えて、危険・健康障害を防止するための措置、安全・衛生のための教育の実施等を行わせることになっている。こうした安全衛生管理体制の下で、前節で述べたエックス線利用に伴う被ばく防止措置がとられるが、それら関連する職務を事業者の責任と「エックス線作業主任者」の職務に分けると表 3.1.2 のようにまとめることができる。

表 3.1.2 電離則に規定されている職務

事業者	エックス線作業主任者
<ul style="list-style-type: none"> ・ 標識による明示 ・ 照射等の安全器具の使用 ・ 撮影／透視時の措置 ・ 被ばく線量の低減 ・ 警報装置等の措置 ・ 立入禁止区域の設定、標識等 ・ 被ばく線量の測定、記録など ・ 緊急時の措置、事故の報告・記録 ・ エックス線作業主任者の選任 ・ 特別の教育の実施 ・ 作業環境測定、結果の掲示、記録 ・ 健康診断の実施、結果の報告 ・ 放射線測定器の整備／調達／校正 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 標識の設置 ・ 照射筒等の安全器具の適切使用 ・ 撮影／透視時の措置 ・ 被ばく低減のための照射条件の調整 ・ 警報装置の設置、動作確認 ・ 立入禁止区域への立入の確認 ・ 測定器の適正な装着の確認

補足すると、放射線障害予防規程の制定及び改廃の審議への参画、放射線施設の新設・変更等に関する審議への参画、申請・届出・報告等の審査、教育訓練の立案への参画、記帳・記録類の監査、組織の長への意見具申、その他重要事項の審議への参画、など、つまり、安全管理に関する「審議への参画・監査・意見具申」が職務とされている「放射線取扱主任者」（RI 等規制法）と比べると、組織内安全管理体制における立場に差があると思われる。

以上、本節では、安衛法・電離則を中心とした工業用エックス線装置に関する安全管理について要約した。同法令で取り扱わない（除外された）エックス線装置や作業など、他の法令がカバーするもの、複数の法令の規制を受けるもの、及びどの法令でも扱っていないものが存在する。将来的に、本 WG か或いは関連学会等と連携してこの問題に取り組めればと考えている。

謝辞

本節をまとめるに当たり、一般社団法人 日本非破壊検査工業会の猿渡 保 理事（ポニー工業株式会社）には、情報・資料提供、本 WG での講演、規制の現状や問題点に関する意見交換など、色々と協力を賜りました。紙面を借り、御礼申し上げます。

3.2. 大学・研究機関におけるエックス線装置とそれらによる被ばくの特徴

(1) エックス線装置の用途・分類

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[1]。一方、医学系や病院などではCT・エックス線カメラなどの撮影装置やがん治療を目的としたライナックなどの照射装置が大半を占める[2],[3]。また同じ使用目的であっても機種により、管理区域が装置内部のみにあるタイプや装置の外に管理区域を設けなければならないものもある。また時代とともに装置の小型も進んでおり、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がある。

市販のエックス線装置には、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インターロック安全装置やエックス線の発生時に点灯する自動警報装置などが備え付けられている[4]。しかしながら一部の市販のエックス線装置や自作の装置では、エックス線照射下での試料調製や撮影等に便利な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もある。また可搬型ポータブルエックス線装置を使用する際には管理区域も装置に付随して移動するので照射方向前方を含む周囲を管理区域に設定することに留意すべきである。

(2) エックス線被ばく事故・ヒヤリハット事例とその要因

大学や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[5]。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に気付かず手、眼、頭部などの体の一部を利用線錐に入れて被ばくする例などがある[6]。特にエックス線装置の安全装置と外付けのカメラや分析装置の電源が連動していない場合などには注意が必要である。また警告灯が作業スペースからは見えにくい位置に設置されているなど装置の構造上の問題が作業者の認知・判断を遅らせることもある。後者の「あえて型」の事例は前者と比較すると少ないが、非定常的にチャレンジングな条件下でエックス線が発生させることは重大な被ばく事故に繋がる可能性がある。

(3) 再発防止と安全教育

エックス線被ばく事故の要因の大半を占めるヒューマンエラーを防止するためには、外

付け装置を含めたエックス線装置（ハード面）の工夫と安全教育・啓蒙活動（ソフト面）を通じた安全文化の醸成が必要である。ハード面の対応として、インターロック装置やタイマーの取付け、利用線錐へのアクセスをできるだけ最小限に抑えるための防護板の設置などが挙げられる。また作業者がエックス線発生を認知しやすいように作業スペースから見やすい位置に警告灯を設置することや警告音での注意喚起なども有効である。管理区域が装置の外に広がるタイプの装置を使用する際には個人線量計の装着はもちろんのこと、必要に応じて安全メガネや鉛エプロンなどの保護具を用意しておく。ソフト面に関しては、事業所全体で行うような一般的な教育訓練だけではなく、装置特有の安全取扱いや同類装置のヒヤリハット事例を紹介するなど研究室レベルでの安全教育を行うことがより効果的である。特に大学などでは学生がエックス線装置を利用する際には、熟練者が立ち会って作業工程における安全確認の意識付けを図ることが望ましい。また共同研究などで他機関や国外からの研究者を受け入れる際にもエックス線の取扱経験の有無にかかわらず、受け入れ先での安全教育を実施することで思い込みや認識の違いなどによるヒューマンエラーを削減することができる。近年では、空きスペースを有効活用したオープンラボも増えつつある。エックス線装置の所在だけではなく、緊急時の連絡先・対応なども含めて管理者・利用者ともに情報共有を密にする必要がある。

(4) 大学・研究所における安全文化の育成と維持

エックス線による被ばく事故の発生確率を抑えるには、個人や研究室レベルだけではなく部局や大学・研究所など組織単位で安全を最優先にした価値観の共有と安全確保への取り組みを実践していくことが不可欠である[7]。そのためには組織責任者・管理実務者・利用者の中で放射線に関する正しい知識を共有し、意見や情報を交換する機会を設け、事故が起きた際に報告、連絡、相談がしやすい風通しの良い環境を日頃から整えておく必要がある。また利用者が放射線を安全に利用しているかを検証・評価するために放射線の専門知識を有する者を派遣して定期的に現場巡視を行うことも大切である。巡視の際に作業手順や放射線装置を稼働した状況における作業者の動作および機器の状態を確認・検証することで有効なリスクアセスメントを実施が可能になる。また組織責任者・管理実務者・利用者の間では、安全を最優先にしつつ、教育・研究の遂行が阻害されないように協議を重ね、またマネジメントの品質を高めるためのPDCAサイクル(Plan-Do-Check-Act cycle)を機能させていくことにより組織全体の安全文化を育成していくことが肝要である。さらに大学等の研究施設では放射線だけではなく、特定化学物質、有機溶剤、感染性微生物など多様な危険因子・危険物が隣り合わせで存在しているため、様々なヒヤリハットが起こる可能性がある。そのため、これら危険物のヒヤリハットに共通する要因や水平展開できる対策等を抽出していくことも事故を未然に防ぐのに役立つ。大学や研究所においては、教職員や学生を含め人の流動性が比較的高いため安全文化を維持していくには難しい側面もある。個人や大学等の研究組織による献身や努力のみでは限界もあるため、国や関連学会は研究組織

と相互コミュニケーションを円滑に図り、協力関係を構築していくことが大切である。

参考文献

- [1] エックス線取扱の基礎 電子科学研究所
- [2] 放射線機器学Ⅰ 青柳泰司 安部真治 小倉泉 コロナ社
- [3] 放射線機器学Ⅱ 齋藤秀敏 福土政広 藤崎達也 コロナ社
- [4] 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 2009;58:195-207 RADIOISOTOPES
- [5] 厚生労働省「職場の安全サイト」 <https://anzeninfo.mhlw.go.jp> access on 9th June 2022
- [6] 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- 1982;17:495-504. 保健物理.
- [7] 健全な安全文化の育成と維持に係るガイド 2019 ; 原規規発第 1912257 号-5 原子力規制委員会

3.3. 学校教育現場におけるエックス線被ばくの可能性と管理

学校教育現場での被ばく事故としては、2001年11月に岩手県の高校で起きた、エックス線装置（ソフテックス）に手を入れて透過像をスクリーンに映し出す実験を行ってしまった事故が知られている[1]。この装置は扉のマイクロスイッチによりインターロックがかけられるようになっているが、改造されており無効化されていたようである[2]。また、説明書には「皮膚への透視は絶対厳禁」等の注意書きがあったが、当該の高校では説明書が保管されておらず、エックス線装置としての管理も、教員がエックス線作業主任者免許を取得していることも無かったと考えられる。結果として最も線量の高い生徒では局所的な皮膚の吸収線量は数 Gy に達し、紅斑を生ずるなど「急性放射性皮膚炎」と診断された。

この事故を受けて文科省は2002年5月に「学校におけるエックス線装置を使用した実験等について」という通知[3]を出しており、安衛法及び電離則などの抜粋を示しており、エックス線装置の届出を行うように促している。

一方で、2021年度より中学校の新しい学習指導要領において「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」という内容が新たに追加となり、その解説において「クルックス管などの真空放電の観察」が謳われているクルックス管について、漏洩するエックス線の安全管理を行う必要がある。クルックス管はレントゲン博士が1895年にエックス線を発見した際に使用されていた装置であり、その当初からエックス線が放出されていたことが知られているわけであるが、具体的にどの程度の線量なのかは教員の間で十分認識されていない[4]。クルックス管からのエックス線の漏洩はこれまでも何度か注意喚起がされており[4],[5]、製品および運用法によっては高い線量（管面からの距離5 cmの70 μ m線量当量率が173 mSv/h）が知られていたが、残念ながら全国的に周知されることはなく、一般の教員に知られることはなかった。2019-2020年度の日本保健物理学会の「教育現場における低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会」において、各方面の専門家の協力を得て、測定法、線量の制御法、国内外の規制等について研究を行い、運用条件を規定（放電極距離20 mm以内、生徒への距離1 m以上など）した状態で全国の学校の装置で安全が確保できるかの実態調査を行った上で、実験を行う上での注意点をまとめた[6],[7]。その内容を元に新学習指導要領準拠の教科書に合わせて発行された教師向け指導書には、中学理科教科書を出版する5社のうち4社において特集記事として注意点の掲載が行われ、広く周知するに至っており、コロナ禍により対面授業自体が困難となったこともあり新学習指導要領の全面実施後も今のところ問題の報告は行われていない。今後継続的に知識をどのように継承するかが課題となる。なお、クルックス管は授業では電子の流れを観察するための装置として用いられているため、本質的に線源を観察することになり、眼の水晶体への被ばくが危惧されたが、実験を行う上での注意点を守っていれば、ほとんどの装置で水晶体の等価線量は年間100 μ Svにも満たないため、日本保健物理学会放射線防護標準化委員会で策定されたガイドラインにおいてモニタリングの必要は無いと

結論づけられている[8]。

学校教育現場における放射線安全管理の問題点として、

- ① ほとんどの教員は放射線取扱業務従事者ではなく、学生は労働者ですらないため、規制を行う法律が存在しない
- ② 現在の教員の多くは自分自身が放射線に関する教育を受けていない
- ③ 線量評価を行うための線量計が多くの場合存在せず、東京電力福島第一原子力発電所事故後に普及した簡易的なサーベイメータでは低エネルギーエックス線の評価が行えない
- ④ エックス線装置の定義が明確でない
- ⑤ 教員は極めて多忙かつ予算が極めて少ないため、安全管理にリソースを割きにくい

という点が挙げられる。

①については法的な拘束力を持たない勧告ではあるが、ICRP Publication 36 「科学の授業に於ける電離放射線に対する防護」(1983)において年間の実効線量当量 0.5 mSv、個々の授業ではその 1/10 と定められているが、実効線量当量という用語から分かるようになり古い内容となっており、実効線量当量限度が、作業者は 50 mSv/年、公衆は 5 mSv/年の時代の勧告であるため、自主的な管理、規制の目安としてこの更新が望まれる。

②については、1977 年の学習指導要領改訂において放射線関係の授業がなくなり、1998 年の改訂（いわゆるゆとり教育）ではさらに真空放電についても削除された。しかし、2008 年の改訂では中学 2 年での真空放電に加えて中学 3 年でのエネルギーに関連した放射線の内容が復活し、2017 年の改訂（2021 年度施行）で「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」という内容が新たに追加となっている。近年センター試験などにおいても放射線に関する問題が頻出しており、改善は見られているが、現役の教員に向けて組織的な知識習得の機会提供が望まれる。

③については、多くの簡易な線量計は Cs-137 の 661 keV γ 線に対して校正されており、低エネルギーでは著しく感度が落ちるため特にクルックス管からの 20 keV 程度のエックス線に対しては正常な値を示すことが出来ない。また、多くの放射線管理者が信頼している NaI シンチレーターも 50 keV 以下はカットオフされており、パイルアップにより波高が高くなった場合に若干計数される程度で実際の線量とかけ離れた値を示す。正確な測定には電離箱か、ガラス線量計や OSL 線量計などの固体線量計が必要であり、学校教育現場で自主的に措置することは非常に困難である。このため、箔検電器を用いたスクリーニング手法の提案が行われており[9]、さらに無料貸し出しが行われている簡易な線量計を用いた手法についても検討中である。

④については、電離則において特定エックス線装置については令第十三条第三項第二十二号に、定格管電圧が 10 kV 以下の物もしくは「エックス線又はエックス線装置の研究又は教育のため、使用のつど組み立てるもの」は対象外と免除規定がありクルックス管は後者

に該当するため対象外であるが、エックス線装置として様々な規制対象となるかについては定義が存在せず不明確である。しかし、2003年に示された厚生労働省の見解 [10]では、エックス線装置とは、エックス線を発生することを目的とした装置であり、副次的にエックス線が発生する装置は含まれない、とのことであるため現在のところ管理対象外であると認識されている。なお、前述の厚生労働省の見解では、「電離則第15条第1項第1号～第3号のエックス線装置等放射線装置については、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」とまとめられているが、現在までのところ進捗は見られない。なお、ソフテックスなどの装置については疑問の余地無くエックス線装置であり、法令に従った管理が必要である。

⑤については極めて問題の根は深く、容易に解決できる物ではない。組織としての対応が必要であるが、教育現場が抱える問題は放射線だけでは無いため、外部からのサポートが不可欠である。出前授業などはその好例である。

最後に、学校教育現場に限ったことではないが、クルックス管からのエックス線をはじめとした低エネルギーのエックス線について、その被ばく線量（実効線量）の評価については現在評価手法が確立されていない。整列拡張場における強透過性放射線 ($H_p(0.07) \leq 10H_p(10)$) では全身一様に被ばくし 1 cm 線量当量が全身の被ばく線量を代表する。逆に弱透過性放射線 ($H_p(0.07) > 10H_p(10)$) では 70 μ m 線量当量によって皮膚線量のみを考慮すれば良い。しかし 20 keV 程度のエックス線の半価層は 1 cm 程度で $H_p(0.07) = 2H_p(10)$ となり強透過性放射線に分類されるものの 1 cm の深さでの吸収線量は全身を代表せず大幅な過大評価となる。ICRP Publication 116 Fig.5.2 は 1 cm 線量当量と実効線量の比のエネルギーによる変化を示しており、20 keV で正面からの照射の場合実効線量/1 cm 線量当量は 0.2 弱である。ただし、現状では 20 keV 程度付近は飛び飛びの値となっておりなおかつ大きく変化しているためブロードなスペクトルを持つ漏洩エックス線 [11] の評価は困難であるため、今後低エネルギー領域での詳細なデータベースが必要である。また、線源に近く距離による線量の差が大きい場合は整列拡張場とは見なせない。いずれも安全管理上は 1 cm 線量当量で評価し、最も線量の大きい点での測定値で均一に被ばくしたとすれば安全側であるため問題は無いが、余りに過大評価が過ぎると評価値を見た教員や生徒が抱く心配が増す可能性があるため、現実に即した評価が必要である。

参考文献

- [1] 軟 X 線発生装置を利用した高校生物理授業における手指被曝事故の考察, 放射線防護分科会, 日本放射線技術学会, 16 (2003) 13-24.
- [2] 高校生の X 線被ばく事故を知って, 前越 久, 健康文化, 34 (2002) 1-4.

- [3] 学校におけるエックス線装置を使用した実験等について, 文部科学省, 14 初教課第三号, 文部科学省初等中等教育局教育課程課長・文部科学省スポーツ・青少年局学校健康教育課長通知
- [4] 学校教育における放電管の使用状況と放射線管理のあり方, 田原隆志, 新見克彦, 草間朋子, 吉澤康雄, 物理教育, 35 (1987) 150-153.
- [5] クルックス管から漏洩する X 線の実態とその対策, 大森 儀郎, 神奈川県立教育センター研究集録, 13 (1994) 21-24.
- [6] 学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用, 秋吉 優史, 放射線教育, 23 (2019) 23-32.
- [7] Radiation Safety Exploration Using RPL Dosimeter for Crookes Tubes in Junior and Senior High School in Japan, Masafumi Akiyoshi, Duy Khiem Do, Ichiro Yamaguchi, Tomohisa Kakefu, Toshiharu Miyakawa, Journal of Radiation Protection and Research, 46 (2021) 106-111.
- [8] 眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン, 日本保健物理学会 放射線防護標準化委員会, 2020 年 7 月, p.62-63.
- [9] 箔検電器によるクルックス管からの X 線の線量率測定, 森 千鶴夫, 緒方 良至, 秋吉 優史, 白井 俊哉, 村上 浩介, 羽澄 大介, 中村 嘉行, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 神谷 均, 宮川 俊晴, 田中 隆一, 掛布 智久, Radioisotopes, 69 (2020) 1-12.
- [10] 厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認, 2003 年 9 月,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12231839/www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf> access on 9th June 2022
- [11] Investigation of Characteristics of Low-energy X-ray Radiated from the Crookes Tube Used in Radiological Education, Duy Khiem Do, Hirokazu Ando, Hiroto Matsuura, Masafumi Akiyoshi, Radiation safety management, 18 (2019) 9-15.

4. 安全文化に関する検討

4.1. エックス線被ばく事故の再発防止の観点からの検討

放射線は、今日では医療（エックス線撮影、CT 検査、医療器具の滅菌など）、工業（非破壊検査、厚さ計/液面計、ガストロマトグラフィなど）、農業（品種改良、害虫駆除、殺菌など）など様々な分野で利用されている。放射線を利用している国内の事業所数は、2006 年以降に右肩上がりに増加しており、2020 年 3 月末時点では 7,535 にまで及んでいる。機関別に見ると、民間企業が 4,487、医療機関が 1,141、研究機関が 407、教育機関が 485、その他の機関が 1,015 となっている[1]。このような現状にあるため、より一層、放射線の安全・安心な利用が望まれる。

放射線の利用に際しては、原子炉等規制法や RI 等規制法に基づく放射線障害防止対策がなされている。しかし、その利用が適切に行われなかった場合、例えば、法で定める基準が充たされていない、放射性物質を取扱う際に単純な過ちを犯す、その管理に不備があったりすると、放射線被ばく事故の発生に至る。原子力規制委員会が報告している 2000 年以降の国内で発生した放射線被ばく事故としては、①国立病院において医療用リニアックの調整を行っていた際、リニアック CT 室の天井裏に作業者が入っていることに気付かず、放射線の照射テストを行ったため、納入業者の作業者が被ばくした。被ばくによる急性症状はなかったが、全身の平均線量で 200 mSv を超えないと推定された（2001 年 12 月（東京都））[2]、②サイクロトロン冷却用チューブが破裂し、水漏れがあったため修理作業を実施した。この際、強い放射能をもつデフレクタ電極の周囲で作業を行っていた 1 名が 52 mSv の被ばくをした（2008 年 9 月（愛媛県））[2]、③密封線源（イリジウム 192）を内蔵したガンマ線透過試験装置を使用して配管腐食の有無の検査を行っていた。その際、線源が遮へい機能を有した線源容器に収納されず、作業員 1 名が 9 mSv の被ばくをした（2019 年 4 月（山口県））[3]、④一般総合病院において作業員 1 名が、PET 薬剤を生成中に放射性同位元素（炭素 11）の入った小瓶を落下させ、当該放射性同位元素が室内に漏れ出し、0.05 mSv の被ばくが発生した（2020 年 12 月（宮崎県））[3]などがあげられる。

このように放射線被ばく事故は件数としては決して多くないが後を絶たない。また、その事故の原因を見てみると、単純な過誤や安全の軽視といったヒューマンエラーによるものと機器の故障に伴うものであり、基本的な対策に欠如があったことが認められる。放射線被ばく事故を防止し、労働者の安全を確保するためには、事故再発防止に向けた新しい取り組みを考える必要がある。

先に述べた事故事例を見ると、再発を防ぐためには業務に従事する個人の努力だけでは不十分であることがわかる。放射線を利用する企業・機関が組織として放射線リスクマネジメントを展開していくことが重要となる。

そこで、本節ではエックス線被ばく事故の再発防止に向けて、労働安全衛生マネジメント

システムを放射線分野に適用していくことを考えていく。

(1) 労働安全衛生マネジメントとは

労働安全衛生マネジメントシステムとは、事業者が労働者の協力の下に労働災害の防止を図るとともに、労働者の健康の増進及び快適な職場環境の形成の促進を図り、事業場における安全衛生の水準の向上に資することである[4]。このシステムを放射線分野にも適用して、放射線の利用に伴うリスクを可能な限り減少させるよう取り組む。手順としてはリスクの洗い出し、リスク対策の検討・実施、モニタリングの順で実施する。

1-1) リスクの洗い出し

過去の放射線事故の情報を収集・分析し、作業者にどのようなリスクが生じるかを予測する。

1-2) リスク対策の検討・実施

予測されるリスクから事故防止の方策を確立し実行する。安全手順の改善に繋げていくことが重要である。

1-3) モニタリング

慣れや慢心からくる不注意を無くし、安全手順が遵守されているか定期的に監視する。これにより、日常業務の安全手順を遵守する動機が高まり、安全意識が向上し、事故のリスクの低減が可能になると思われる。

(2) 放射線発生装置の点検および安全装備の改善

2-1) 日常点検

装置の異常・故障による事故は日常の点検で最小限にすることができると考えられる。点検すべき項目（例えば、X線管、インターロック、冷却チューブなど）をリストアップし、使用前に必ず点検する体制を整える。また、装置の不調を早期に発見し、買い換えする時期の適切な予測にもつとめるべき必要がある。

2-2) 装置の安全装備

放射線の誤照射は作業者に重大な放射線障害与えるため、未然に防ぐ安全装備が必要である。

<人感センサー>

赤外線を用いて、人の体温を感知し、照明機器等のスイッチをオン・オフさせる機能（人感センサー）が多く家電等で利用されている。この人感センサーをエックス線装置の照射部に付け、指先などが不意に照射野に入ってしまった場合に照射が緊急停止するようにする（図 4.1.1）。

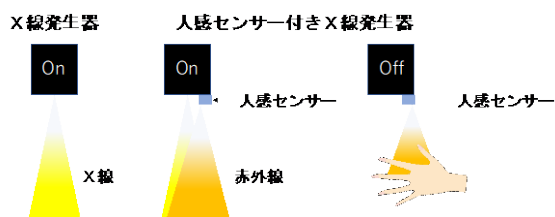


図 4.1.1 人感センサー付きエックス線装置

<遠隔操作システム>

医療の分野で用いられる診断用エックス線装置は、通常、室外に備えられたハンドスイッチで照射の ON/OFF ができる。これは医療従事者の被ばくを避けるためである。この仕組みを非破壊検査用のエックス線装置にも応用する。具体的には、Wi-Fi を利用して、遠隔からタブレット端末で照射の ON/OFF を操作できるようにする。(図 4.1.2)。これにより、1) 装置の近くに作業者がいる必要はなくなる、2) 照射野付近に作業者が万が一入った場合でも遠隔から緊急停止させることができる。

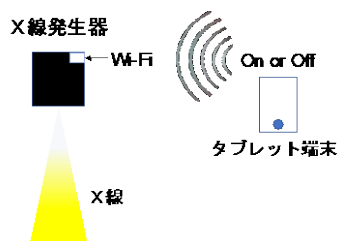


図 4.1.2 エックス線装置の遠隔操作

<ブザーや警告灯の強化>

エックス線発生時は常にブザーと警告灯が点滅し、目や耳でわかるようにする。

以上から、装置を製造する企業側も作業者の不意な被ばくを防ぐ努力が必要であると考ええる。

参考文献

- [1] <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2021/zentai.pdf> access on 9th June 2022
- [2] <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12234022/www.nsr.go.jp/data/000153717.pdf> access on 9th June 2022
- [3] <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11949256/www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/suii/index.html> access on 9th June 2022
- [4] <https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/000591670.pdf> access on 27th June 2022

4.2. エックス線作業主任者養成の観点からの課題

エックス線作業主任者とは、エックス線装置（医療用又は波高値による定格管電圧が 1000 kV 以上の装置を除く）を用いる作業などを行う場合、エックス線による障害を防止する直接責任者としてエックス線作業主任者免許を受けた者のうち、管理区域ごとの選任が必要であり、エックス線による労働者の健康障害防止や被ばく低減措置の職務に従事する者である。

エックス線作業主任者免許を取得するには、エックス線作業主任者免許試験を受験する必要があり、試験科目は下記となる。

試験科目

- | | |
|------------------------|-------------|
| ● エックス線の管理に関する知識 | 10 問 (30 点) |
| ● 関係法令 | 10 問 (20 点) |
| ● エックス線の測定に関する知識 | 10 問 (25 点) |
| ● エックス線の生体に与える影響に関する知識 | 10 問 (25 点) |

なお、受験者数は年間約 5 千人で合格率 50 % 台である。合格基準は科目ごとの得点が 40 % 以上で、かつ、その合計が 60 % 以上であること。また、試験方式は 5 肢択一のマークシート方式である。

さらに、科目免除規定があり、第二種放射線取扱主任者免状取得者は、エックス線の測定に関する知識、エックス線の生体に与える影響に関する知識が免除され、ガンマ線透過写真撮影作業主任者免許取得者は、エックス線の生体に与える影響に関する知識が免除される。

次に、エックス線作業主任者免許を受ける資格を有する者として、

- ① エックス線作業主任者免許試験に合格した者
- ② 診療放射線技師免許を有する者
- ③ 原子炉主任技術者免状を有するもの
- ④ 第一種放射線取扱主任者免状を有する者

となっている。

エックス線作業主任者養成の観点からの課題としては、前述のエックス線作業主任者免許を受ける資格を有する者のうち、エックス線作業主任者のみが学科試験だけで取得可能な資格である点である。ややもすると放射線測定機器等に関する実技を全く行わずに、直接現場で作業を行い、管理者となることである。

エックス線作業主任者の実態としては、中小零細企業に所属する割合が多く養成に経費や時間を割くのは厳しい現実がある。しかし、今後より良い管理文化を現場実装し、このような事故を防ぐために、エックス線利用に付随した知識のみならず、管理実務上に必要となる技能をどのように広めていくか、検討していく必要がある。そのことが過剰被ばく事故軽

減策の一助となるものと思われる。

4.3. 「職場の安全サイト」を参考にした労働安全の取組み

事故やトラブル等の異常事態の多くは、放射線に限ったことではないが似通った事象であることが多い。厚生労働省の「職場の安全サイト」[1]では、事故やヒヤリハット事例を集めて情報を発信し、労働者の安全を推進する活動を行っている。リスクマネジメントにおいては、これらを分析し対策をとることが安全管理へのアプローチのひとつであり、事故事例等の情報は重要とされている。そこで、本節ではこのサイトの取組みについて確認した。

(1) 規制について

まずは、放射線を規制する関係法令は、放射線の種類及び利用方法から図 4.3.1 のように分類される。

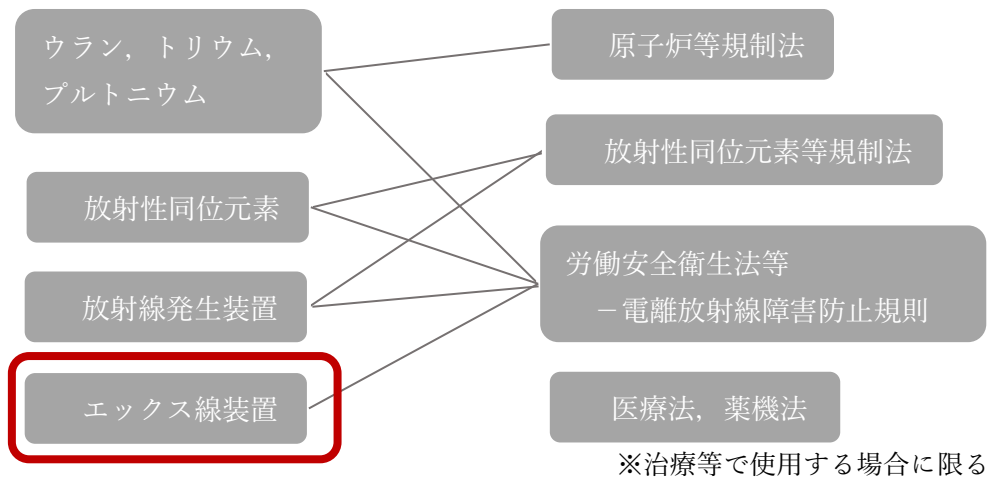


図 4.3.1 放射線の種類と法令の対応関係

エックス線を発生する装置はそのエネルギーにより、法令上は放射線発生装置またはエックス線装置に区分され規制する方法が異なる。放射線発生装置とは、電子線や1 MeV以上のエックス線を発するもののうち RI 等規制法によって定義された装置をいい、その利用での安全確保は原子力規制委員会により確認される。一方、それ以外のエックス線装置は放射線のエネルギーが低く、労働災害の防止のための規制はかかっているが前述のように原子力規制委員会は関与せず、厚生労働省が監督官庁となる。労働基準監督官向けには労働大学校で専門的な研修がなされている。

原子力規制委員会のホームページには、放射性同位元素や放射線発生装置の情報が掲載されており、利用実態、法規制等を容易に知ることができる。事故に関しては、当該事業所から報告された経過報告、原因究明、再発防止策などが同ホームページにて閲覧することができる。その他本学会を含め放射線関連の学会等から多数情報が発信されている。

(2) 職場の安全サイトについて

職場において発生した災害の統計や事例等をまとめられたコンテンツで、事例等の確認のみならず職場での災害防止対策や教育ツールとして、労働者、事業主ともに利用できるサイトである。過去に発生したエックス線被ばく事故の事例もあり、内容を知ることができるコンテンツとなる。

• 労働災害統計

厚生労働省が発表する労働災害に関する統計データ（労働災害の発生速報、統計、原因要素の分析など）が閲覧できる。死亡または死傷災害における種々のデータがある。これらは、各都道府県労働局への報告や動向調査が元になっている。一例として、令和 2 年の労働災害統計[2]「業種別・事故の型別」によると、死亡災害報告では「墜落・転落」、次いで「交通事故（道路）」が多くそれぞれ 150 件を超える。労働者死傷病災害報告では、「転倒」が 30000 件を超え、次いで「墜落・転落」、「動作の反動・無理な動作」がそれぞれ 20000 件程度となる。この分類では、（電離）放射線の被ばくは「有害物との接触」に該当し正確な件数は把握できないが、「業種・起因物(小)」の集計にて「放射線」の災害数を確認することができた（令和 2 年度 0 件）。また、業務上疾病発生状況等調査[3]の業務上疾病発生状況（業種別・疾病別）には、（電離）放射線の被ばくによる疾病件数が集計されている。

• 災害事例

労働災害事例[4]について、発生状況や原因、対策について平易な文言で示され、イラストもあるので読みやすい。事例集には 2576 件の事例が掲載されており、3 件の（電離）放射線の被ばくによる事例がある（令和 4 年 5 月末時点）。うち、2 件はエックス線装置によって被ばくした事例であるが、いずれも照射中であることに気づかず手を入れてしまったことが原因であった。

また、災害には至らない様々なヒヤリハット事例もイラスト付きでわかり易く紹介されている。

• 各種教材・ツール

安全衛生教育ビデオ（11 か国語対応）、安全衛生リーフレット、キーワード検索、リスクアセスメント実施支援ツール、フルハーネス型墜落制止用器具の動画など安全教育等に關する情報が閲覧できる。

(3) 機械に関する危険性等の通知情報の提供

業種、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）[5]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。

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。また、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求められる。

参考文献

- [1] <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11486820/anzeninfo.mhlw.go.jp/index.html>
access on 9th June 2022
- [2] <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11676291/anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/anst00.htm> access on 9th June 2022
- [3] https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12044527/www.mhlw.go.jp/stf/newpage_19933.html access on 9th June 2022
- [4] https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10181078/anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/SAI_FND.aspx access on 9th June 2022
- [5] <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12251586/www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei14/dl/130918.pdf> access on 9th June 2022

4.4. ウラン加工工場（JCO）臨界事故の教訓

1999年（平成11年）9月30日10時35分、東海村のウラン加工工場で濃縮ウラン溶液作製時に臨界事故が発生し、3名の作業者が高線量被ばくした。そのうちの2名が死亡した。3名の被ばく線量の推定値はそれぞれ16~20 GyEq以上、6.0~10 GyEq、1~4.5 GyEqと算定されている。

一般住民に対しては350 m以内の住民125人に避難要請、10 km以内住民に屋内退避勧告が出された。さらに3 km以内の道路が封鎖され、JR常磐線は一時運転が中止された。

この事故は、日本における最初の臨界事故である。事故が起こった日の午後に時の政府は事故対策本部を設置して、第1回事業対策本部会議を開催している。

さらに、当時の原子力安全委員会の中に原研・動燃・放医研の研究者から構成される緊急技術助言組織が設置されて技術的対応がされた。

これら一連の政府の対応はかなり早いものであったと評価されている。それだけこの臨界事故の深刻さが物語っていると云える。

この臨界事故は、ウラン加工工場で濃縮ウラン溶液を3名の作業者によって作成している最中に起こった。この一連の作業には予め決められた手順マニュアルがあった。しかし作業者は従来慣例として行っていた方法を踏襲した、マニュアルとは異なった方法で作業を行っていた。それは極めて杜撰な方法であった。

従来行っていたのはウラン235濃縮度が2~3%の溶液であった。ところが、臨界事故が起きたウランの濃縮度は、それより高い5%であった。濃縮度が高いウラン溶液を従来の慣例と同じ方法で作業を行っていたことが臨界を引き起こした要因である。

この臨界事故は多くの問題点、課題を抱えていた。それに対応するため、同年10月に原子力安全委員会にウラン加工工場臨界事故調査委員会が設置され対策と調査が開始された。

その一か月後に緊急提言を含めた中間報告書が公表された。そしてその年の12月24日にウラン加工工場臨界事故調査委員会最終報告書[1]が公表された。この報告書には臨界事故の詳細な経緯、原因、今後の対応、課題が記述されている。その中で特筆される項目を次に掲げる。

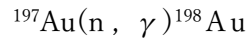
- ① 原子力産業における効率性と安全性
- ② 原子力産業における事業者・技術者の社会的責任と倫理
- ③ 原子力事業者における安全確保の徹底
- ④ 原子力安全文化の定着と21世紀の安全社会システムの構築

さらに原子力に限らず、国と社会の安全にまで言及している。また、事故調査委員会委員長が所感を報告書の緒言にかえている。このように安全性の基本、原子力安全文化の醸成にまで踏み込んでいる点は、極めて特徴的である、と云える。

この臨界事故を収束される過程で行われたいくつかの技術的課題もまた多くの参考になるので、それを次に挙げる。

- 中性子線の測定

臨界事故の特徴として中性子の測定が重要になるが、中性子測定器が不足しがちで中性子被ばくの評価が十分に行えない。これを補う方法として、住民の中性子被ばくを評価するために住民が所持している金装身具、金箔の測定を行った。それは、次の核反応によるものである。



この ^{198}Au 量を γ 線スペクトル分析で求めて入射した中性子線密度を求め評価した。

- 緊急被ばく医療の在り方

作業者が高線量被ばくをしたことによって、緊急被ばく医療体制が問題として浮かび上がった。それを受けて、緊急被ばく医療体制のマニュアル化、法整備の検討に着手した。

この一連の検討、活動には当時の放射線医学総合研究所（放医研）の先生方が精力的にされたことは特筆される。

- 法体系の改定

本事故を受けて、原子力災害対策法体系の改定が行われた。新たに原子力災害対策特別措置法が制定された。

- 事故の教訓

本臨界事故は先に述べた通り、日本における初めての原子力事故である。したがって、いくつかの課題と教訓を残している。その大きな課題は原子力における安全文化の醸成である。さらに、原子力の安全神話である。これらの課題に対して警告をも発している。これが本 JCO 臨界事故の教訓である。

しかし、その 12 年後の 2011 年に東京電力福島第一原発事故が起きる。事故のきっかけは地震津波ではあったが、福島原発事故の経緯対応などが、はたして JCO 臨界事故で指摘された教訓が生かされていたのかが改めて問われる。その意味でも JCO 臨界事故を再認識することは重要であると考えられる。

参考文献

[1] ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告： 原子力安全委員会・ウラン加工工場臨界事故調査委員会、平成 11 年 12 月 24 日

5. 今後の検討課題

5.1. エックス線装置の規制

今回の事故で使用していたエックス線装置の取扱いにあたっては、安衛法及び電離則の規制を受けるものである。以下に、それぞれの法令において、適用を受けるであろう条文の番号とその見出しを表 5.1.1 に示す。事故の発生経緯が未公表であることから、現時点で、今回の事故におけるこれらの規制や管理の有効性を検討できる状況にはないが、事故の詳細が公表された際には、これらの規制や管理が有効に機能していたかを確認することは有意義であろう。

また、本事故に関する規制や管理の有効性の評価において、その視点や尺度について IAEA 安全基準類が参考になる。参考とすべき項目を抜粋し、以下にそれらの要点を示すとともに、各項目の全文を表 5.1.2 に示す。

IAEA 安全原則 No. SF-1 (Safety Fundamental Principles, IAEA Safety Standards Series, No. SF-1, 2006 IAEA)

「原則 8：事故の防止」 事故を防止するための実行可能な全ての努力が求められている。深層防護の取組みが求められる。

「原則 9：緊急時の準備と対応」 放射線の異常に対する準備の事前の取り決めが求められている。合理的に予測可能なあらゆる事象を考慮するとともに、いかなる人への影響も緩和するための実施可能な措置を講じるべきとされている。

IAEA 放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準 GSR Part3 (Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General safety Requirement Part 3, No. GSR Part3. 2014 IAEA)

「要件 15：事故の防止及び緩和」 事業者は事故を防止し、事故の影響を緩和するための実行可能なあらゆる対策を講じることが求められている。それには国内外の基準との適合、組織的継続的な安全維持、保安上の品質の維持、経験や教訓の範囲を確実に行うべきことが含まれる。

「要件 17：放射線発生装置及び放射性線源」 事業者は線源の安全を確保することが求められている。線源の製造者は保安に係る品質を確保し、また使用者は製造者や規制機関とのコミュニケーションにより防護と安全の確保に確実に取り組むべきとされている。

表 5.1.1 エックス線装置に係る規制条文（一部）の概要

労働安全衛生法	
(作業主任者) 第 14 条	[施行令第 6 条 (作業主任者を選任すべき作業) 第 5 項]
(事業者の講ずべき措置) 第 22 条	
(譲渡等の制限) 第 42 条	[施行令第 13 条 (厚生労働大臣が定める規格又は安全装置を具備すべき機械等) 第 22 項]
(安全衛生教育) 第 59 条	[労働安全衛生規則第 36 条 (特別教育を必要とする業務) 第 28 項]
(就業制限) 第 61 条	[労働安全衛生規則第 62 条 (免許を受けることができる者)]
(計画の届出等) 第 88 条	[労働安全衛生規則第 85 条 (計画の届出をすべき機械等)]
電離放射線障害防止規則	
(放射線障害防止の基本原則) 第一条	(事故に関する測定及び記録) 第四十条
(定義等) 第二条	五条
(管理区域の明示等) 第三条	(エックス線作業主任者の選任) 第四
(施設等における線量の限度) 第三条	十六条
の二	(エックス線作業主任者の職務) 第四
(放射線業務従事者の被ばく限度) 第	十七条
四条	(エックス線作業主任者免許試験の試験
(緊急作業時における被ばく限度) 第	科目等) 第五十条
七条	(透過写真撮影業務に係る特別の教育)
(特例緊急被ばく限度) 第七条の二	第五十二条の五
(線量の測定) 第八条	(作業環境測定を行うべき作業場) 第
(線量の測定結果の確認、記録等) 第	五十三条
九条	(線量当量率等の測定等) 第五十四条
(ろ過板) 第十一条	(健康診断) 第五十六条
(間接撮影時の措置) 第十二条	(健康診断の結果の記録) 第五十七条
(透視時の措置) 第十三条	(健康診断の結果についての医師からの
(放射線装置室) 第十五条	意見聴取) 第五十七条の二
(警報装置等) 第十七条	(健康診断の結果の通知) 第五十七条
(立入禁止) 第十八条	の三
(透過写真の撮影時の措置等) 第十八	(健康診断結果報告) 第五十八条
条の二	(健康診断等に基づく措置) 第五十九
(退避) 第四十二条	条
(事故に関する報告) 第四十三条	(放射線測定器の備付け) 第六十条
(診察等) 第四十四条	(記録等の引渡し) 第六十一条の二
エックス線装置構造規格	

表 5.1.2 IAEA 安全基準より事故防止及び放射線発生装置に関する要件の抜粋

○IAEA 安全原則 No. SF-1 ((旧) 独立行政法人原子力安全基盤機構による翻訳)より抜粋

原則 8：事故の防止

原子力または放射線の事故を防止及び緩和するために

実行可能な全ての努力を行わなければならない。

3.30. 施設と活動から生じる最も有害な影響は、原子炉の炉心、核連鎖反応、放射性線源またはその他の放射線源に関する管理の喪失から生じている。したがって、有害な結果をもたらす事故の可能性がきわめて低いことを確実にするために、次の措置を講じなければならない。

- － そのような管理の喪失に至る可能性がある故障または異常な状態（セキュリティの破綻を含む）の発生防止
- － 発生する何らかの故障または異常な状態の拡大防止
- － 放射性線源あるいはその他の放射性線源の紛失あるいは制御の喪失防止

3.31. 事故の影響の防止と緩和の主要な手段は「深層防護」である。深層防護は、それらが機能し損なったときにはじめて、人あるいは環境に対する有害な影響を引き起こされ得るような、多数の連続しかつ独立した防護レベルの組み合わせによって主に実現される。ひとつの防護のレベルあるいは障壁が万一機能し損なっても、次のレベルあるいは障壁が機能する。適切に機能する場合、深層防護は、単一の技術的故障、人為的あるいは組織上の機能不全だけでは有害な影響につながる可能性がないこと、また、重大な有害影響を引き起こすような、機能不全が組み合わせで発生する確率が非常に低いことを確実にする。異なる防護レベルの独立した有効性が、深層防護の不可欠な要素である。

3.32. 深層防護は、次の事項を適切に組み合わせ提供される。

- － 安全に対する経営層の強力なコミットメントと強固な安全文化を伴う効果的なマネジメントシステム
- － 適切な敷地選定及び主に次の手段の採用による安全裕度、多様性及び多重性を実現する優れた設計と工学的施設の導入。
 - ・ 高い品質と信頼性を持った設計、技術及び材料
 - ・ 制御系、制限系及び防護系並びに監視施設
 - ・ 固有の安全特性と工学的安全施設の適切な組み合わせ
- － 包括的な運転手順と行為及びアクシデントマネジメント手順

3.33. アクシデントマネジメント手順をあらかじめ作成し、原子炉の炉心、核連鎖反応またはその他の放射線源に関する制御機能が喪失した場合にそれらの制御機能を回復するための手段、及びいかなる有害な影響も緩和するための手段を確立しなければならない。

原則 9：緊急時の準備と対応

原子力または放射線の異常事象に対する緊急時の準備と対応のための
取り決を行わなければならない。

3.34. 原子力または放射線の緊急時に対する準備と対応は、次の事項を主な目標とする。

－ 原子力または放射線の緊急時に対する、現場及び必要に応じて地域、地方、国及び国際間のレベルでの効果的な対応を行うための取り決めが定められていることを確実にすること。

－ 合理的に予測可能な異常事象に対して、放射線リスクが軽微なものとなることを確実にすること。

－ 発生する何らかの異常事象に対して、人の生命、健康及び環境に対するいかなる影響も緩和するための実施可能な措置を講じること。

3.35. 許認可取得者、事業者、規制機関及び適切な政府の部門は、現場、地域、地方及び国のレベル、並びに諸国間で合意されているなら国際間のレベルで、原子力または放射線の緊急時に対する準備と対応の取り決を、あらかじめ確立しておかなければならない。

3.36. 緊急時の準備と対応の取り決めの範囲と程度には、次の事項を反映させなければならない。

- － 原子力または放射線緊急時の発生可能性及び考え得る影響
- － 放射線リスクの特性
- － 施設と活動の特質と場所

上記の取り決めには次の事項を含む。

－ 異なる防護措置をいつ講じるべきかを決定する際に用いられるあらかじめ設定された基準一式

－ 緊急時において、現場の人員及び必要に応じて公衆を防護し、情報を提供する措置を講じる能力

3.37. 緊急時対応の取り決めを作成する際、合理的に予測可能なあらゆる事象を考慮しなければならない。緊急時計画は定期的に訓練を行い、緊急時対応で責任を負う組織の準備を確実なものにしなければならない。

3.38. 緊急時において早急な防護措置を即座に取らねばならないような時は、十分な説明による同意に基づき、緊急時の作業者は、通常適用される職業線量制限を超えるが、あらかじめ規定された値までの線量を受けることが許容される。

出典：

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000013228.pdf> access on 9th June 2022

○一般安全要件 GSR Part3「放射線防護と放射線源の安全：国際基本安全基準」（原子力規制庁による翻訳）より抜粋

要件 15：事故の防止及び緩和

登録者及び許可取得者は、良好な工学事例を適用し、事故を防止し、それらが起きた場合の影響を緩和するための実行可能なあらゆる対策を講じなければならない。

良好な工学事例

3.39. 登録者又は許可取得者は、他の責任のある当事者と協力し、施設又はその一部分の立地、位置、設計、製造、建設、組立、試運転、運転、保守及びデコミッションング（又は閉鎖）が、適宜、以下の良好な工学事例に基づいていることを確実なものとしなければならない：

- (a) 国際的な基準及び国の基準を考慮している；
- (b) 施設の寿命全体を通じて防護と安全を確実なものとするを目的とし、管理的及び組織的に支持されている；
- (c) 通常運転時における信頼性のある性能を確実なものとするよう、施設の設計及び建設並びに施設に関わる運転に十分な安全裕度を含み、事故の防止、それらの影響の緩和及び将来の被ばくの制限に重点を置いて、必要な品質、冗長性及び検査のための能力を考慮している；
- (d) 技術判断基準に関連する開発及び防護と安全に関する研究の結果並びに経験から学んだ教訓の反映を考慮している。

深層防護

3.40. 登録者及び許可取得者は、潜在被ばくの起こり易さと大きさに見合った防護と安全のための一連の独立した対策である多層の（深層防護）システムが、登録者及び許可取得者が認可された線源に対して適用されることを確実なものとしなければならない。登録者及び許可取得者は、もし一つの防護レベルが機能しなくなった場合、それに続く独立した防護レベルが機能することを確実なものとしなければならない。そのような深層防護は、以下の目的のために適用されなければならない：

- (a) 事故を防止すること；
- (b) 発生した事故の影響を緩和すること；
- (c) そのような事故の後、線源を安全な状態に戻すこと。

事故防止

3.41. 登録者及び許可取得者は、施設と活動のための防護と安全に関する、ソフトウェ

アを含む、構築物、系統及び機器が、合理的に実行可能な限り事故を防止するように設計、建設、試運転、運転及び維持されることを確実なものとしなければならない。

3.42. 施設若しくは活動の登録者又は許可取得者は、以下のために適切な取決めをしなければならない：

- (a) 施設又は活動において合理的に予想される事故を防止する；
- (b) 発生した事故の影響を緩和する；
- (c) 潜在被ばくを制限するのに必要な情報、指導、研修及び機器を作業者に提供する；
- (d) 施設の管理及び合理的に予想される事故の管理に対する適正な手順があることを確実なものとする；
- (e) 安全上重要なソフトウェアを含む構築物、系統及び機器並びに他の設備について、異常な状態又は不十分な性能をもたらす可能性のある劣化について、定期的に検査し試験できることを確実なものとする；
- (f) 防護と安全のための規定の維持に適した保守、検査及び試験を、過度の職業被ばくなしに行えることを確実なものとする；
- (g) 適切であればいつも、運転条件が規定範囲外にある場合に施設を安全に停止するか又は施設からの放射線放出を低減させるための自動システムを提供する；
- (h) 適時に是正処置をとるために、十分迅速に応答するシステムによって、防護と安全に重大な影響を及ぼす可能性のある異常な運転条件が検出されることを確実なものとする；
- (i) 全ての安全に関連する文書が、使用者に理解可能かつ適切な言語で利用できることを確実なものとする。

緊急事態への準備と対応

3.43. もし安全評価が、作業員又は公衆の構成員のいずれかに影響を及ぼす緊急事態が十分に起こり得ることを示すならば、登録者又は許可取得者は、人と環境の防護のための緊急時計画を備えなければならない。この緊急時計画の一部として、登録者又は許可取得者は、緊急事態を迅速に同定するための取決めと適切な緊急時対応のレベルを決定するための取決めを含まなければならない。登録者又は許可取得者による現場での緊急時対応の取決めに関連して、緊急時計画は、特に、以下を含まなければならない：

- (a) 個人モニタリング及びエリアモニタリングに関する規定並びに治療の取決め；
- (b) 緊急事態の影響を評価し、緩和するための取決め。

3.44. 登録者及び許可取得者は、自らの緊急時計画の実施に責任を持たなければならない。線源の制御の喪失につながる可能性のある状況の発生又はそのような状況の拡大を防ぐため、登録者及び許可取得者は、適宜、以下を行わなければならない：

- (a) 線源の制御の喪失を防止し、必要に応じて線源の制御を取り戻すための手順を開

発、維持及び実行する；

(b) 必要になる可能性のある設備、計装及び診断支援機器を利用可能にする；

(c) 従うべき手順に関係する職員を研修し、定期的に再研修して、その手順を訓練させる。

要件 17：放射線発生装置及び放射性線源

登録者及び許可取得者は、放射線発生装置及び放射性線源の安全を確実なものとしなければならない。

3.49. 放射線発生装置及び放射性線源の生産者又は他の供給者である登録者及び許可取得者は、該当する場合、以下の責任が果たされることを確実なものとしなければならない：

(a) 以下のような良好に設計、製造、構築された放射線発生装置又は放射性線源及びそれらを含む装置を供給する：

(i) 本基準の要件に適合する防護と安全を提供する；

(ii) 工学、性能及び機能仕様を満足する；

(iii) ソフトウェアを含む系統、機器の防護と安全の重要性に見合った品質基準を満足する；

(iv) 操作盤の鮮明なディスプレイ、指示計及び操作表示を、使用者が理解できる適切な言語で提供する。

(b) 当該仕様に適合していることを実証するため、放射線発生装置及び放射性線源が試験されることを確実なものとする。

(c) 性能仕様、運転及び保守の説明書並びに防護と安全の説明書を含む、放射線発生装置又は放射性線源の適正な設置及び使用並びにその付随するリスクに関する情報を、使用者が理解可能な適切な言語で利用できるようにする。

(d) 遮蔽及び他の防護器具によって提供される防護が最適化されていることを確実なものとする。

3.50. 該当する場合、登録者及び許可取得者は、放射線発生装置及び放射性線源の供給者、規制機関及び当該当事者と、以下の目的のために適切な取決めをしなければならない：

(a) 防護と安全のために重要となり得る使用条件及び運転経験に関する情報を取得する；

(b) 他の使用者の防護と安全に関係する又は放射線発生装置及び放射性線源の防護と安全に対する改善の可能性に関係するフィードバックと情報を提供する。

3.51. 放射線発生装置又は放射性線源を使用又は保管する場所を選定する場合、登録者及び許可取得者は以下を考慮しなければならない：

(a) 放射線発生装置又は放射性線源の安全管理及び制御に影響を及ぼす可能性がある

要因；

(b) 放射線発生装置又は放射性線源により引き起こされる職業被ばくと公衆被ばくに影響を及ぼす可能性がある要因；

(c) 工学設計に前述の要因を考慮することの実現可能性。

3.54. 登録者及び許可取得者は、放射線発生装置及び放射性線源の彼らの在庫記録から、要請に応じて規制機関に適切な情報を提供しなければならない。

3.55. 登録者及び許可取得者は、放射線発生装置及び放射性線源の喪失又は損傷を防止し、認可されていない者が 3.5 項で定める活動のいずれかを実施することを防止するために、以下を確実なものとすることによって、それらを管理下に置かなくてはならない：

(a) 放射線発生装置又は放射性線源の管理が、登録又は許可証に指定される全ての該当要件に適合する場合にのみ放棄される；

(b) 規制機関が、喪失若しくは所在不明又は管理下でない、放射線発生装置又は放射性線源に関する情報を速やかに通知される；

(c) 受取者が必要な許認可を保有している場合にのみ、放射線発生装置又は放射性線源が引き渡される；

(d) 放射線発生装置又は放射性線源が所定の場所であり管理下にあることを確認するために、3.53 項で要求される在庫量が定期的に点検される。

3.60. 登録者及び許可取得者は、放射線発生装置及び放射性線源を使用しないことを一旦決定したら、適切な資金提供を含む、安全な管理及び制御のための取決めを迅速に行うことを確実なものとしなければならない。

出典：

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12234022/www.nsr.go.jp/data/000354300.pdf>
access on 8th December 2021

5.2. 放射線の管理と品質マネジメントシステム

企業活動の中で、製品・サービスの提供に当たり品質マネジメントシステム（QMS：Quality Management System）を整備し、継続的な改善を行っていくことが必要とされている。放射線に限らず、企業活動の中で何らかのトラブルが発生した場合は、トラブルの真因を明らかにし、同様トラブルの再発防止を図ることが重要となっている。品質管理の世界で真因追及のために使用される RCA 分析（根本原因分析、Root Cause Analysis）手法の一つであるなぜなぜ分析について紹介した。

なぜなぜ分析とは実際に発生した事象（FACT）を出発点として、なぜこの事象が起きたのかの問いかけを、重ねていくことで真因を追及するもので、課題解決、再発防止を図る手法である。なぜなぜ分析を行うためには、問題となる事象とそこに至る経緯を明らかにし、その上でなぜの問いかけを重ねて行うのが重要である。今回事象ではいまだ事故の詳細、経緯等が明らかになっていないことから本来の分析はできないものの、想定される要因(図 5.2.1)に基づく、分析例(図 5.2.2)を提示して、分析手法を紹介した。

何が、どういう状況で起こったのか？	
神戸新聞報道 日本製鉄などによると、2人は5月29日午前工場内で、鋼板のめっきの厚みを測る装置を整備した。	
発生事象 X線照射中に作業員が照射野に入る	
事象発生時の作業発生時の状況	想定要因
メーカーによる新規設置・調整	設置・調整マニュアルの不備 設置手順の不備
メーカーによる既設品の点検・調整・校正	インターロックとの不整合 フェールセーフ対策の設計ミス 点検・調整マニュアルの不備
トラブルによる緊急応動（日本製鉄社員）	緊急対応マニュアルの不備 作業員の理解不足

図 5.2.1 事象発生に至る想

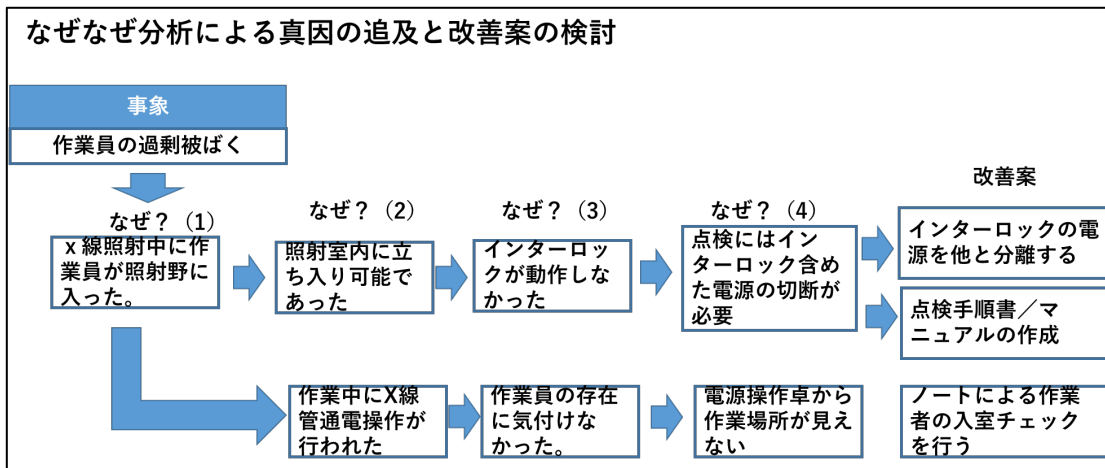


図 5.2.2 想定に基づくなぜなぜ分析の例

5.3. エックス線被ばくに関する線量評価

放射線関連の事故発生を考える空間スケールは、原子力災害事故などの空間的な拡がり
が大きいレベルから、今回のような工業用エックス線厚さ計などの検査測定装置の点検事
故のような比較的小さなレベルまで、空間スケールのダイナミックレンジが広い。放射線と
いう物理現象は、当然のことながら放射線自体が持つエネルギーが物質と相互作用（エネ
ルギー付与）しなければ、空間的な永遠の拡がりでもって輸送される。

今回の被ばく者となっている 2 名の作業者が、後者のような空間スケール内に設置され
たエックス線メッキ膜厚さ計の点検作業中に、エックス線を発生させた状態のまま点検作
業に従事し、年間限度量を大幅に超過する被ばく線量を受けた模様で、翌日、体調不良を訴
えた。このような有事災害の際は、被ばく患者の治療に携わる医療従事者にとって、当然の
ことながら迅速且つ正確な線量評価を提供することが求められる。

そのためには、被ばく者がどのような状況、すなわち放射線（エックス線）の発生（線源）、
放射線輸送の空間スケール（ジオメトリー）、その空間に配置されている装置も含めた物体
の環境、線源からのどの位置、どのような姿勢で作業していたか？ などの被ばく者自身の
作業環境、といった情報が、本節で紹介する放射線輸送モンテカルロシミュレーション計算
でも必要となる。逆に言うと、そのような詳細な情報が得られなくても放射線輸送モンテカ
ルロシミュレーション計算で、線源情報や空間スケールの情報、人体組織データの多くのパ
ラメータの様々な条件設定で、より多くの線量評価計算結果を出力することができ、その結
果から被ばく患者の線量評価値の多角的な被ばく事故状況を類推・考察することが可能で
あることを意味している。しかしながら、過度に放射線挙動のシミュレーション計算結果で
導出された数値データや、2次元・3次元線量分布値を信じて頼り切ることは適切でない
と考えている。当然のことながら、目に見えない一つの放射線挙動は、原子・原子核レベルの
極小領域での衝突・輸送・衝突の相互作用の繰り返しであり、その一つの放射線だけで放射
線飛跡図や線量値分布を描写することは絶対にできない。シミュレーション計算は、その事
象を乱数ベースのモンテカルロ法で解いた平均化された事象を再現して、放射線発生の総
和を積み上げたものに過ぎない予測値である。そのことを確実に理解した上で、今回のよう
なエックス線事故の被ばく者の線量評価する人にとっても、また事故を広報（教育も含む）
する側の人にとっても、放射線挙動の視覚的な印象や理解を受けてイメージを理解した後
は、シミュレーション計算で得られた結果はあくまでも予測値であること忘れてはいけな
い。

近年、計算機速度の日々凌駕する技術革新に相まって、放射線輸送モンテカルロシミュ
レーション計算が許容レベルの時間内で十分に実行できる時代となってきた。世界で汎用さ
れる放射線輸送モンテカルロシミュレーション計算コード（PHITS, MCNP, GEANT4, EGS,
EGSnrc, SuperMC, FLUKA）には、原子レベルの物質内部の個々の放射線（粒子・エクス
線）を逐次シミュレーションしていくアルゴリズムで設計がなされているのが主流であり、

この個々の莫大な物理現象アルゴリズムを再現するための高性能なマイクロプロセッサの存在で、計算実行できるようになってきた。本節では、高性能計算機上で実行させる PHITS 計算コードを用いて、当該有事の高線量エックス線被ばく作業患者に対して、その患者等の被ばく状況を推測しながら線源情報、空間スケールのジオメトリ情報 (3DCAD データ)、医療で汎用される人体組織ファントム情報を計算入力し、迅速且つ正確な線量評価の可能性を紹介する。

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) は、日本原子力研究開発機構、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の 3 機関の共同研究開発で行われており、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渡って幅広く利用されている。現在、国内外の PHITS ユーザー数は 5000 人まで達している。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、光子の輸送計算シュミ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 EGS が母体となって、PHIT 計算コード記述に組み込まれている。) この PHITS 計算空間上に、今回のエックス線被ばく事故で従事していたであろう 2 名の成人男性を模擬するために、現在のシミュレーション計算における標準ファントムである ICRP ボクセルファントム (ICRP Publication 110) や、最新の人体ファントムとされる四面体構造メッシュによる高精細人体ファントム (ICRP Publication 145, Adult Mesh-type Reference Computational Phantoms) を配置させることで、被ばく患者体内の各臓器の平均吸収線量を評価する。

今回のエックス線被ばく事故では、メッキ膜厚さ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、被ばく者自身が個人保護具や個人被ばく線量計の着用していたかの点についての報道及び公式な発表もないので、どのようなメッキ膜厚さ計であるか、どのような姿勢体制で被ばくしたのかなどの情報は皆無に等しい。この数少ない情報の中でも、WG メンバー相互間で事故経緯とその対応につながる情報を収集・精査しながら、今回、人体ファントムと PHITS による放射性輸送モンテカルロシミュレーション計算を行うことにした。エックス線被ばく事故の被ばく者の線量評価値をこの数少ない情報状況で求めることはできないことから、今ある状況の中で、特に、人体ファントム標準姿勢 (直立姿勢) の四面体構造メッシュタイプ標準計算ファントム (MRCPs) だけでなく、5 つの基本姿勢の中で Bending 姿勢 (身をかがめる姿勢) の人体ファントムを PHITS 計算上へ取り込むことができるかを検証することにした。このような姿勢変形の MRCPs ファントムは、漢陽大学 (韓国) の Chansoo Choi ら [1] によって近年開発されたもので、このような新しい人体ファントムの PHITS への取り込みを行い、簡易的なメッキ膜厚さ計のエックス線発生部を設定記述して、試験的な放射線輸送計算を実行した。

図 5.3.1 は、エックス線発生に伴う放射線飛跡分布とそのエックス線が人体臓器組織群との相互作用により、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が通過していく人体へのエネルギー付与、すなわち平均吸収線量分

布の2次元カラーマッピングは、WG が目標として掲げている社会とのコミュニケーション上の側面の観点、つまり放射線防護を専門としていない人たちへの放射線安全文化への視覚的な印象付けに大きく貢献する素材となるのではないかといえる。またさらに、エックス線を発生するメッキ膜厚さ計から付属装置類などの全構造体から、その構造体を含む部屋全体の配置状況などの正確なジオメトリ情報を3次元化することで、3次元の放射線輸送マッピング（延長上には、放射線輸送の飛跡やエネルギー付与の時間的な変化を表す動画アニメーション化もある。）を表すことができるならば、その視覚的な印象効果からの放射線安全意識向上への波及効果は、さらに加速し、放射線被ばく事故への防止意識が醸成していくと期待できる。

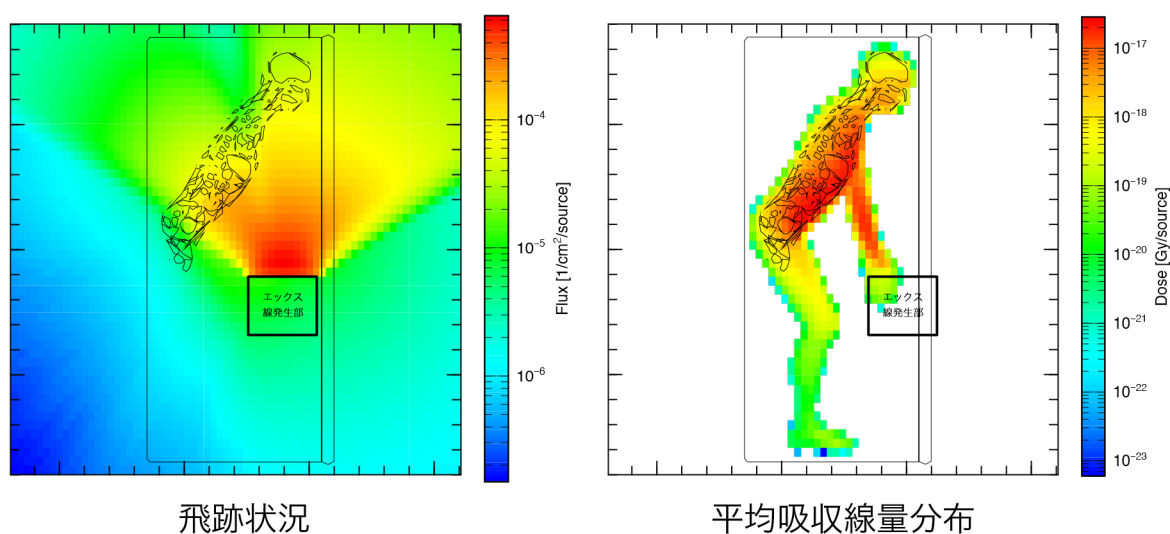


図 5.3.1 四面体構造メッシュタイプ MRCPs 人体ファントム (Bending 姿勢) 臓器組織を含む

Bending 姿勢の四面体構造メッシュタイプ MRCPs を用いた PHITS モンテカルロシミュレーション計算出力。この2次元マッピングは、エックス線発生部からのエックス線飛跡状況と平均吸収線量分布の様子を表している。

参考文献

- [1] Chansoo Choi, et al., Posture-dependent dose coefficients of mesh-type ICRP reference computational phantoms for photon external exposures, *Physics in Medicine and Biology*, 64(7) ab0917 (2019)

5.4. 線量測定及び被ばく線量再構築時の課題

本 WG で検討を進めているエックス線被ばく事故は、作業員 2 名がメッキ膜厚さ計からのエックス線による被ばくである。被ばく者を確実に救命するためにも、被ばく者が高線量被ばくしたかどうかによるトリアージの後、高線量被ばくを受けた患者に対して迅速な治療が行われなければならない。被ばく医療に資する線量評価の観点から、エックス線被ばくに対する被ばく患者の線量評価では、1) 被ばく医療に資する線量評価上の課題、及び 2) 被ばく源となるエックス線に起因する課題がある。

被ばく患者の線量評価では、被ばくが外部被ばくの場合、被ばく患者の採血の結果等の医学的所見からの線量評価、染色体等生物学的線量評価、(あれば) 装着していた線量計の読み値等からの物理学的線量評価の複数を組み合わせて線量評価を行う。上記の手法で得られた線量情報に基づき治療方針を決定する。物理学的線量評価では、線量再構築のため、線源から放射線(エックス線)を発生させるばく露試験を行う場合がある。事故の再構築について、関係者より聞き取りを行い、被ばく状況を確認するが、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。2 名以上で放射線作業を行っていて被災した場合、作業員の記憶が残っているか、作業員間の主張に食い違いがないかについても十分検証される必要がある。被ばく時の状況の検証・確認するため映像記録等が用いられる場合もある一方、被ばく源のある作業環境で防犯カメラ等が設置されておらず、被ばく時の映像記録がない場合もある。被ばく状況の再現では、特に線源位置と被ばくした時点での被ばく患者の姿勢が重要となるが、上述の理由により、聞き取りのみ、被ばく患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。ばく露試験時ではファントムと呼ばれる人体を模擬した模型を使用して実際にファントムをばく露する。一方、姿勢を再現できる可動する四肢のついた物理ファントムは存在しないため、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。

被ばく源となるエックス線に起因する線量評価上の課題について、今回のエックス線事故での被ばく源となったメッキ膜厚さ計の管電圧は低く、被ばく源は弱透過性放射線に分類される。物理学的線量評価上の課題でいうと、①上述の線量再構築時のばく露試験、及び②線量測定及び測定値の解釈が挙げられる。国際電気機関(IEC)では、場の線量を測定するサーベイメータ等の線量計、及び個人の被ばく量をモニタリングする個人線量計について、30 keV から性能要求されているが、それよりエネルギーの低いエックス線に対する線量計の応答は保証されていない。さらに、30 keV 以上のエックス線に対しても、エックス線用でない原子力施設等で使用される線量計については、良好な応答を有しているとは言えない。これらの点を考慮して、ばく露試験時の線量測定で使用される線量計・放射線測定器については、別途エネルギー応答特性を把握しておく必要がある。エックス線装置に注目すると、診断領域で使用されるエックス線装置には、鮮明な画像取得の目的で瞬間的(1 msec 以下)に大線量率を発生させる、パルス状にエックス線を発生する装置がある。パルス状の

エックス線を線量計で測定する場合、①1パルス当たりの線量率が極めて高いため数え落としを起し線量を過小評価する、及び②1パルスの持続時間が短すぎて、回路処理が追い付かず数え落としを起し過小評価する、ことは不可避である。前述の測定上の課題を考慮し、特別な放射線測定器（壁厚の薄い電離箱式検出器、半導体検出器（Si、CdTe）等）を準備したうえで、被ばく状況での場の放射線の測定を行うことが望ましい。場の放射線の線量から被ばく患者の臓器線量を推定することになるが、被ばく源となるエックス線の被ばく患者の体内でのエネルギー分布の情報は治療方針決定のために極めて重要である。低エネルギーのエックス線は着衣でも容易に減衰し、被ばく患者の線量の体内分布も一様にならない。特に皮膚の被ばく線量について評価する場合には注意が必要である。

5.5. エックス線被ばくの放射線影響

今回の被ばく事故の放射線影響について、報道等の公開情報に基づいて時系列順にまとめると、次の通りである。(本項は2022年4月11日時点での情報に基づき執筆)

- 2021年5月29日午前、日本製鉄 瀬戸内製鉄所(兵庫県姫路市)でメッキ膜厚さ計を定期点検中の男性作業員2名(30代と50代)が被ばくした。2021年5月30日に作業員が体調不良を訴え(主訴は腕の腫れと発熱)、姫路市内の病院を受診し、被ばくの可能性を指摘される。日本製鉄:労働基準監督署や警察に連絡。
- 2021年6月1日に厚生労働省が「エックス線装置の点検作業に作業員2名が従事している間、当該装置からエックス線が照射されたままの状態になっており、大量の放射線に被ばくをしたものです。」(原文)とする通知(基安労発0601第1号)を発表。
- 2021年6月2日から月末にかけて報道があったが、同年7月以降は皆無。
- 被ばく線量は、年線量限度の数倍から数十倍に及ぶ可能性とする報道があったが、線量や被ばく部位は不明。広島大学への入院(少なくとも2021年6月29日までは)が報道されたが、容体は不明。

上記の情報に基づく、課題は次の通りである。

- 厚生労働省通知に記載された「大量の放射線」、報道された「年線量限度の数倍から数十倍」が、体のどの部位へのどのくらいの線量か不明である。
- 被ばくの翌日に発熱とあるが、それがどの程度の熱か、放射線起因か不明である。 ≥ 2 Gyの急性被ばく後、急性放射線症の前駆症状として発熱を呈することがあり、IAEAのSRS No. 2[1]によると、2-4 Gy後1-3時間に1-8割が体温上昇、4-6 Gy後1-2時間に8-10割が発熱、 ≥ 6 Gy後 ≤ 1 時間に10割が高熱を呈するとされている。
- 被ばくの翌日に姫路市の医療機関が被ばくの可能性を指摘したと報道されているが、その根拠は不明である。血球減少であるとする、急性被ばく後 ≤ 1 日で減少が認められるのはリンパ球のみで、そのしきい線量は0.25 Gyである。毛細血管拡張による皮膚の一過性初期紅斑であるとする、 ≥ 3 Gyを被ばく後1-3日に発症するとされている。
- 入院先でバイオドシメトリー(染色体解析などによる線量推定)が実施されたか不明である。
- メッキ膜厚さ計から、どのような線質のエックス線を被ばくしたのか不明である。放射線防護では、エックス線はエネルギーによらず、放射線加重係数(w_R)を1としているが、低エネルギーエックス線は高エネルギーエックス線より数倍程度、生物学的効果比(RBE)が高いことが知られている[2]。今回の被ばく

事故を含め被ばくの線量と影響の評価において重要な課題である。

参考文献

- [1] IAEA. 1998. Diagnosis and treatment of radiation injuries. Safety Reports Series No. 2.
- [2] NCRP. 2018. Evaluation of the Relative Effectiveness of Low-Energy Photons and Electrons in Inducing Cancer in Humans. NCRP Report No. 181.

附属資料

報道例

- 朝日新聞:放射線被曝、社員 2 人が入院 兵庫・姫路の日本製鉄工場
2021 年 6 月 2 日 23 時 55 分
<https://www.asahi.com/articles/ASP627DVWP62PIHB01M.html> access on 8th December 2021
- 神戸新聞 NEXT:エックス線の装置点検中か 作業社員 2 人が被ばく、体調崩す
日本製鉄・広畑
2021 年 6 月 3 日 12 時 37 分
<https://www.kobe-np.co.jp/news/sougou/202106/0014383024.shtml> access on 8th December 2021
- NHK:日本製鉄工場で社員 2 人被ばくか 年間限量の数十倍の可能性も
2021 年 6 月 11 日 18 時 24 分
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210611/k10013080591000.html> access on 8th December 2021
- 読売新聞:点検中に X 線照射されたまま、作業員 2 人が被曝…日本製鉄の工場
2021 年 06 月 11 日 21 時 48 分
<https://www.yomiuri.co.jp/national/20210611-OYT1T50238/> access on 8th December 2021
- 時事通信:エックス線照射のまま作業 日鉄工場社員、大量被ばくか一兵庫
2021 年 06 月 11 日 22 時 08 分
<https://www.jiji.com/jc/article?k=2021061101268&g=soc> access on 8th December 2021
- 毎日新聞: 日本製鉄工場で 5 月に被ばく事故 2 人入院 兵庫県警が捜査
2021 年 6 月 26 日 17 時 10 分 (最終更新 6/26 17:10)
<https://mainichi.jp/articles/20210626/k00/00m/040/164000c> access on 8th December 2021
- NHK 兵庫:姫路 被ばく事故あった製鉄所 ほかに死亡事故相次ぐ
2021 年 6 月 28 日 21 時 07 分
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210628/k10013108681000.html> access on 8th December 2021
- NHK:製鉄所被ばく事故 専門学会が事故防止の提言へ
2021 年 7 月 12 日 22 時 12 分
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210712/k10013135771000.html> access on

8th December 2021

執筆者一覧

章	原稿執筆
第 1.1 章	飯本武志
第 1.2 章	古渡意彦
第 2.1 章	山口一郎
第 2.2 章	飯本武志 高橋賢臣 榎本 敦
第 2.3 章	山口一郎
第 3.1 章	小田啓二
第 3.2 章	榎本 敦
第 3.3 章	秋吉優史
第 4.1 章	小嶋光明
第 4.2 章	福土政広
第 4.3 章	中村美和
第 4.4 章	笠井 篤
第 5.1 章	橋本 周
第 5.2 章	川島恒憲
第 5.3 章	阪間 稔
第 5.4 章	古渡意彦
第 5.5 章	浜田信行