

# ICRP

*Publication 142*

## 産業プロセスにおける 自然起源放射性物質 (NORM) に対する放射線防護



# 産業プロセスにおける 自然起源放射性物質（NORM） に対する放射線防護

2019年7月 主委員会により承認



**ICRP**

*Publication 142*

# Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes

Editor-in-Chief

C. H. CLEMENT

Associate Editor

H. FUJITA

Authors on behalf of ICRP

J-F. Lecomte, P. Shaw, A. Liland, M. Markkanen, P. Egidi,  
S. Andresz, J. Mrdakovic-Popic, F. Liu, D. da Costa Lauria,  
H.B. Okyar, P.P. Haridasan, S. Mundigl

---

Copyright © 2024 Nuclear Regulation Authority, Japan. All rights reserved.  
Authorized translation from the English language edition published for  
The International Commission on Radiological Protection by SAGE Publications Ltd.  
Copyright © 2019 The International Commission on Radiological Protection  
Published by SAGE Publications Ltd. All rights reserved.

*No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in  
any form or by any means electronic, electrostatic, magnetic tape, mechanical photocopying,  
recording or otherwise or republished in any form, without permission in writing from the  
copyright owner.*



Japanese Translation Series of ICRP Publications  
Publication 142  
Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)  
in Industrial Processes

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Toshimitsu HOMMA

Translated by

Kazuki IWAOKA

Editorial Board

The Japanese Translation Committee of ICRP Publications  
Translation Project of ICRP Publications,  
Nuclear Regulation Authority, Japan

working in close collaboration with Japanese ICRP & ICRU members.

---

◆ Committee members ◆

Gen SUZUKI (Chair)

Michiya SASAKI (Vice-chair)

Keiji ODA

Nobuyuki KINOUCHI<sup>3)</sup>

Sachiko SAKODA<sup>1)</sup>

Hideki HANGAI<sup>4)</sup>

Michiaki KAI<sup>1)</sup> (Vice-chair)

Kazuko OHNO

Isao KAWAGUCHI

Yoshihiko TANIMURA<sup>6)</sup>

Yasuhito SASAKI\*

Hiroshi YASUDA

◆ Supervisors ◆

Michiaki KAI (ICRP, MC)

Kotaro OZASA (ICRP, C1)

Kazuo SAKAI\* (ICRP, C1)

Jiro INABA\* (ICRP, C2)<sup>5)</sup>

Yoshiharu YONEKURA\* (ICRP, C3)

Toshimitsu HOMMA\* (ICRP, C4)

Ohtsura NIWA\* (ICRP, MC)

Yoshiya SHIMADA (ICRP, C1)<sup>2)</sup>

Tatsuhiko SATO (ICRP, C2)

Makoto HOSONO (ICRP, C3)

Hiroko YOSHIDA (ICRP, C4)<sup>2)</sup>

Norio SAITO<sup>†</sup> (ICRU)

---

\* Former ICRP member.    † Former ICRU member.

<sup>1)</sup> From April 2021, <sup>2)</sup> From September 2021, <sup>3)</sup> Until March 2022, <sup>4)</sup> From April 2022 until March 2023, <sup>5)</sup> From June 2022, <sup>6)</sup> From April 2023.

## 邦訳版への序

本書は、ICRPの主委員会で2019年7月に承認され2020年1月に刊行された、産業プロセスにおける自然起源放射性物質（NORM）に対する放射線防護に関する報告書

Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)  
in Industrial Processes

(Publication 142. *Annals of the ICRP*, Vol.48, No.4 (2019))

をICRPの承諾のもとに翻訳したものである。

本書の翻訳は、量子科学技術研究開発機構の岩岡和輝氏によって行われた。この翻訳稿をもとに、ICRP刊行物翻訳委員会において推敲を重ねるとともに、前ICRP第4専門委員会の本間俊充氏の監修をいただき、最終稿を決定した。原文の記述への疑問は原著関係者に直接確認して訂正し、また原文の意味を正しく伝えるために必要と思われた場合は、多少の加筆や修正、訳注を付した。

地球上には原始放射性核種と呼ばれる元素が存在する。これらの元素は、過去の超新星爆発等により宇宙に飛び散っていたガスや塵や岩石などに含まれていたと想定されており、太陽系の生成時に地球に降り積もった。これらの原始放射性核種および宇宙線により大気中で生成される核種に由来する放射性物質を自然起源放射性物質（NORM）と呼ぶ。NORMの中でも $^{232}\text{Th}$ 壊変系列、 $^{238}\text{U}$ 壊変系列の子孫核種（娘核種）や $^{40}\text{K}$ を含む物質が人および環境の被ばく源として注目されている。一般にNORMによる被ばくが組織反応（確定的影響）を起こす被ばくレベルになるとは想定されていないが、がん誘発などの確率的影響を引き起こすリスクがある。実際、 $^{238}\text{U}$ 壊変系列のラドンガス（ $^{86}\text{Ra}$ ）は、疫学調査により肺がんリスクがある事が確認されており、ICRPは、*Publication 126*において、その放射線防護に関する勧告を発表している。

NORMは、地球環境に遍く存在しているが、産業活動の工程（採掘、運搬、加工、生産物、副産物、残渣、廃棄）でその物理化学的性質が変化し、濃度分布が変わる。これに伴いNORMの影響をうける集団も変わる。産業活動の工程毎にどのような被ばく

があるのかを調査することが、対策の基本となる。一方、NORMの一部は放射線以外のハザード、すなわち重金属や化学物質としての毒性、あるいは粉塵として健康ハザードとなっている場合があり、既に対策が施されている場合もある。このため、ICRPは、NORMに対する対策を独立した放射線学的対策ではなく、既存の産業衛生対策に組み込んだアプローチ（統合的アプローチ）を推奨しており、産業工程に応じて、かつリスク・ハザードの大きさや対策の費用効果などを勘案したアプローチ（グレーデッド・アプローチ）を推奨している。

本出版物が主に想定する読者は、NORMの輸出入や加工、廃棄に関わる産業衛生および放射線学的な規制当局者、およびNORMを扱う施設の管理者および産業衛生に携わる専門家である。付属書A「NORM被ばくが生じる活動」には、どのような産業活動で被ばくが生じ得るかを簡潔にまとめているので、あわせて読んでいただきたい。

本書の翻訳の進行と編集は、事務局の日本エヌ・ユー・エス株式会社が担当した。

当翻訳事業の成果は、すべてICRPのウェブサイトにてPDF版にて公開される。また、原子力規制委員会も、令和2年度から当翻訳事業で翻訳したICRPの出版物を以下のURLで公開している ([https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku\\_04.html](https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html))。この翻訳が、我が国の放射線防護に資することを、完成までの過程に携わったすべての方々とともに心より願うものである。

2024（令和6）年2月

ICRP 刊行物翻訳委員会  
委員長 鈴木 元

原子力規制庁  
国内規制に係る国際放射線防護委員会刊行物の調査事業  
ICRP 刊行物翻訳委員会

委員長 鈴木 元 (保内郷メディカルクリニック)  
副委員長 甲斐 倫明<sup>1)</sup> (日本文理大学)  
佐々木道也 ((一財)電力中央研究所)  
委員 大野 和子 (京都医療科学大学)  
小田 啓二 ((一財)電子科学研究所)  
川口 勇生 ((国研)量子科学技術研究開発機構)\*  
木内 伸幸<sup>3)</sup> ((国研)日本原子力研究開発機構)  
迫田 幸子<sup>1)</sup> ((公社)日本アイソトープ協会)  
佐々木康人 (湘南鎌倉総合病院 湘南先端医学研究所)  
谷村 嘉彦<sup>6)</sup> ((国研)日本原子力研究開発機構)  
半谷 英樹<sup>4)</sup> ((国研)日本原子力研究開発機構)  
保田 浩志 (広島大学原爆放射線医科学研究所)

\*本書の校閲担当

監修者

---

甲斐 倫明 (ICRP 主委員会, 日本文理大学)  
丹羽 太貫 (前 ICRP 主委員会, (公財)放射線影響研究所)  
小笹晃太郎 (ICRP 第1専門委員会, 京都府立医科大学)  
島田 義也<sup>2)</sup> (ICRP 第1専門委員会, (公財)環境科学技術研究所)  
酒井 一夫 (前 ICRP 第1専門委員会, 東京医療保健大学)  
佐藤 達彦 (ICRP 第2専門委員会, (国研)日本原子力研究開発機構)  
稲葉 次郎<sup>5)</sup> (元 ICRP 第2専門委員会, 元放射線医学総合研究所)  
細野 眞 (ICRP 第3専門委員会, 近畿大学)  
米倉 義晴 (前 ICRP 第3専門委員会, 大阪大学)  
吉田 浩子<sup>2)</sup> (ICRP 第4専門委員会, 東北大学)  
本間 俊充 (前 ICRP 第4専門委員会, 原子力規制庁)  
齋藤 則生 (前 ICRU 委員, (国研)産業技術総合研究所)

<sup>1)</sup> 2021年4月から, <sup>2)</sup> 2021年9月から, <sup>3)</sup> 2022年3月まで, <sup>4)</sup> 2022年4月から2023年3月まで, <sup>5)</sup> 2022年6月から, <sup>6)</sup> 2023年4月から





## 抄 録

本刊行物の目的は、自然起源放射性物質（NORM）を伴う産業における放射線防護に関するガイダンスを提供することである。これらの産業は、複数のハザード\*<sup>1</sup>を生じる可能性があり、放射線のハザードは必ずしも主要なものではない。NORMを伴う産業は多様であり、防護対策の考慮が必要な人と環境の被ばくを伴うことがある。場合によっては、適切な管理対策が考慮されなければ、作業者と公衆が日常的に有意に被ばくする可能性がある。また、大量のNORMの放出は放射性と非放射性の成分により環境へ有害な影響を与える。しかし、NORM産業は、組織反応や直ちに生命の危機につながるような放射線緊急事態を実際に引き起こす可能性はない。36項のNORMを伴う産業における放射線防護は、とられる対策の正当化と参考レベルを用いた防護の最適化の原則に基づいて適切に取り組むことができる。作業員、公衆、および環境の防護のために、統合的アプローチおよびグレーデッド・アプローチ\*<sup>2</sup>が勧告される。この取り組み方では、放射線のハザードの考慮に放射線以外のハザードへの考慮を統合し、放射線防護プログラムの諸要案を適用する際に、それぞれのハザードと整合させて必要以上の負荷がないように、防護のアプローチを最適化（グレーデッド）する。作業員に対しては、この手法は、被ばく状況の特徴の把握と、必要に応じて職場の他のハザードを管理するための既存ないし計画中の防護戦略を補完する具体的な放射線防護対策を統合することから始まる。被ばく状況の特性とハザードの大きさに応じて関連する参考レベルが選択され、適切な集団または個人の防護措置が講じられるべきである。ラドンによる被ばくも、*Publication 126*で説明される通り、まずは典型的なラドンの防止と低減技術の適用に基づいて、グレーデッド・アプローチを用いて対処する。公衆被ばくに対しても、状況の特徴の把握の後、排出物、廃棄物、残渣の管理を通して同様のアプローチが実施されるべきである。ヒト以外の生物種の防護が必要な場合は、その状態に適した放射線被ばくの評価を行い、すべてのハザードと影響を考慮に入れて対処されるべきである。これには、環境中の被ばくした生物の同定が含まれるべきで、被ばく制御のための選択肢に関する決定を知らせるために関連する誘導考慮参考レベル（DCRL）が使用されるべきである。

キーワード：放射線防護、NORM、最適化、統合的アプローチ、グレーデッド・アプローチ

---

訳注\*<sup>1</sup> 危険有害要因。

\*<sup>2</sup> リスクの大きさと可能性、被ばく状況の複雑さ、およびその時点で広く見られる状況に見合った方法で防護体系を実施するために勧告される方策（*Publication 146*用語解説より）。



## 目 次

	頁 (項)
抄 録 .....	v
招待論説 .....	ix
要 点 .....	xiii
1. 緒 言 .....	1
1.1 背 景 .....	1 (1)
1.2 範 囲 .....	3 (12)
1.3 本刊行物の構成 .....	5 (20)
2. NORM 被ばくの特徴 .....	7
2.1 遍在性と多様性 .....	7 (21)
2.2 NORM についてのゆりかごから墓場までという視点 .....	12 (29)
3. 委員会の放射線防護体系の NORM への適用 .....	13
3.1 被ばく状況のタイプと被ばくのカテゴリー .....	13
3.1.1 被ばく状況のタイプ .....	13 (32)
3.1.2 被ばくのカテゴリー .....	15 (40)
3.2 防護戦略の正当化 .....	16 (47)
3.3 防護の最適化 .....	17 (52)
3.3.1 線量判断基準 .....	18 (57)
3.3.2 最適化プロセス .....	19 (63)
4. NORM を伴う産業プロセスに対する放射線防護体系の実施 .....	21
4.1 作業者の防護 .....	21
4.1.1 概 論 .....	21 (68)
4.1.2 作業者の参考レベルの選択 .....	22 (75)
4.1.3 必要条件の選択と実施 .....	23 (79)
4.2 公衆の防護 .....	28 (104)
4.2.1 NORM を伴う産業からの排出物 .....	28 (108)

viii 目 次

4.2.2 廃棄物	29	(113)
4.2.3 残 渣	30	(116)
4.2.4 建 築 材	30	(119)
4.2.5 レガシーサイト	31	(126)
4.3 環境の防護	32	(132)
5. 結 論	35	(142)
参 考 文 献	37	
付属書 A. NORM 被ばくが生じる活動	39	(A1)
A.1 希土類の抽出	39	(A2)
A.2 金属トリウムとその化合物の製造と使用	39	(A3)
A.3 鉱石（ウランを除く）の採鉱と加工	39	(A4)
A.4 石油・ガスの採掘	40	(A6)
A.5 二酸化チタンの製造	41	(A8)
A.6 リン鉱石加工業	41	(A9)
A.7 ジルコン・ジルコニア産業	42	(A13)
A.8 金属製錬	42	(A14)
A.9 石炭の抽出・燃焼	42	(A15)
A.10 水 処 理	43	(A17)
A.11 建 築 材	43	(A18)
A.12 レガシーサイト	44	(A20)
A.13 参 考 文 献	45	
謝 辞	47	

## 招待論説

自然放射線源による被ばくは普通 (NORMal) であるが、  
職場での被ばくはそうあるべきではない！

もしあなたがこの論説を読んでいるなら、私はあなたが今朝起きて、体内で壊変した多数のカリウム 40 の原子核や、夜間に身体を通過した二次宇宙線について特に気にしていなかったと確信している。あなたの人間としての感覚では、これらの放射線に気づくことも、組織内のエネルギーの蓄積を感じることもできなかつただろう。それにも関わらず、カリウム 40 と宇宙線の両者は、バックグラウンド線源、すなわち自然起源放射性物質からの通常の放射線量に年間約 0.3 mSv 寄与するだろう。宇宙放射線からの線量は、あなたのいる緯度と高度、そして 11 年の太陽周期のどのあたりの時点にいるかによって多少変化する。さらに、私たち誰もが地域の土壌と岩石、自宅と職場の建築材に含まれる天然ウランやトリウム系列の放射性核種からのガンマ線で被ばくするだろう。実際、あなたの家には花こう岩の天板があるかもしれないし、職場の建物に装飾的な石材が使われているかもしれない。これらは年間の放射線量に寄与するだろう。そして、これらすべての被ばくよりも、私たちが屋内ラドンから受ける線量のほうがはるかに大きい可能性もある。自然放射線源からの放射線の被ばくは普通である。

放射線防護の専門家として、私たちが日常生活では避けることができない一定レベルの放射線被ばくや特定の線源があることを理解しており、このような状況は何千年も続いてきた。自然放射線の、このように透過性で複雑に入り組んだ放射線場は実質的に遮蔽することはできず、同じことが航空飛行中の宇宙放射線被ばくにも当てはまる。しかし、我々はその職業上被ばくする人の線量を計算し追跡することができる。これは、妊娠中の航空機乗務員にとって特に重要なことである。過去 50 年間で一般公衆の航空輸送が大幅に増加しており、このことが新しい日常 (NORMal) となっていると思われる。従って、ICRP は *Publication 132* (ICRP, 2016) においてこれを取り上げてきた。

近年、私たちは、家庭でのラドン被ばくが有意なリスク因子で肺がんの原因であり、家庭、学校、および職場の建物における地中の土壌減圧システムの使用は、潜在的なラドン被ばくを低減するのに非常に効果的であると認識している。ICRP はラドン被ばくによる肺がんのリスク (ICRP, 2010) とラドンの放射線防護対策 (ICRP, 2014) に関する刊行物を公表している。ICRP によって策定され、各国の規制機関によって実施されている現行の放射線防護体系によ

ると、「現存」、「計画」、および「緊急時」被ばく状況がある。前述したように、私たちは日々放射線を受けているが、急性の組織損傷を引き起こす可能性は低く、緊急の介入や対策を要するものではない。しかしこれは、これらの放射線被ばくのリスクがゼロであることを意味しているわけではない。近年、さまざまな産業プロセスに存在する天然ウランとトリウム系列の放射性核種が、作業者と公衆の放射線量を増大させ、環境汚染をもたらす可能性があるという課題が認識されているということである。現在、私たちは、被ばくの「正当化」と「最適化」という放射線防護原則の適用と、職場における NORM に関連する線量への「制限」の適用という課題に直面している。過去の産業活動でも、鑑定または査定と浄化を要する遺産（遺跡・遺物）の汚染を生み出した可能性もある。廃止措置、除染、放射性廃棄物処分は、とりわけ大量の廃棄物が含まれる場合、多額の費用がかかる可能性がある。NORM ではこのようなケースが多い。

本刊行物は、さまざまな産業プロセスにおける NORM の取扱いのための優れた枠組みを提供している。NORM が移動したり、技術的に濃度が高められることで、作業員や公衆に被ばくをもたらす可能性のある業種として、採鉱、金属抽出、水処理、リン酸塩、肥料、エネルギー（例えば石炭、石油、ガス）が挙げられる。比較的低レベルの放射線被ばくを伴い、日常的に低濃度の NORM に遭遇することを考えると、影響を受ける産業だけでなく規制当局に対しても「グレーデッド・アプローチ」が勧告される。安全の専門家と管理者にとって重要なことは、濃度が高められた NORM の存在を認識することである。認識後は、環境、原材料、生産物、廃棄物の特徴を把握することが重要である。これには、複数の外部放射線場と内部（体内）摂取の可能性が含まれる。そこから、有資格者は、作業員や公衆にどのような被ばくが、また、環境にどのような影響が生じるか予測できる。本刊行物に記載されている情報には、さまざまな業種における典型的な放射線被ばくに関する優れた要約と、これらのデータの参考文献が含まれている。管理が必要な放射線被ばくや放射能レベルの場合、「放射線防護管理計画」の策定が推奨される。このような計画は、NORM の適切な取扱い、放射線測定機器、日常的な調査や評価を行う詳細な手順、そして NORM を含む生産物や廃棄物の梱包、管理票、ラベル表示、輸送方法について概説するものとなる。

NORM は人工線源ではないことから、歴史的に、原子炉や加速器で生成された物質として管理の対象とされてこなかった。近年、国際的および各国の放射線防護研究機関や規制当局が、このギャップを埋めようと試みている。本刊行物は、これらの規制機関と放射線防護実務者に役立つ豊富な情報を提供する。著者たちは本刊行物を誇りに思うべきである！

ペンシルバニア州環境保護局  
DAVID J. ALLARD

## 参考文献

- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115. *Ann. ICRP* **40**(1).
- ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP* **43**(3).
- ICRP, 2016. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132. *Ann. ICRP* **45**(1).





## 要 点

- 自然起源放射性物質（NORM）を伴う産業活動から生じる被ばくは制御可能であり、防護措置の正当化と防護の最適化を通じて防護が達成される。
- NORM は、組織反応や直ちに生命の危機につながるような放射線緊急事態を実際に引き起こす可能性はない。作業者と公衆のための防護対策では、長期的な外部被ばく、放射性物質の摂取、ラドンやトロンの吸入を考慮すべきである。
- 作業者、公衆および環境の防護には、被ばく状況の特徴の把握、および他のハザードの管理のために既に実施されている、あるいは計画されている防護戦略を補完する放射線防護措置の最適化を含む、統合的アプローチおよびグレーデッド・アプローチが勧告される。
- 作業者の防護のための参考レベル（ラドンとトロンによる被ばくを除く）は、被ばくの分布を反映すべきであり、大部分の場合、年間実効線量で数 mSv\*未満であろう。非常にまれに、年間実効線量で 10 mSv を超える値が予想されることもある。
- 公衆の防護のための参考レベルは、被ばくの分布を反映すべきであり、一般に年間実効線量で数 mSv\*未満になる。
- ラドンとトロンの被ばくは、*Publication 126*（ICRP, 2014b）で勧告されているように、まず建物内のラドンの予防と緩和対策に依拠し、グレーデッド・アプローチを用いて管理すべきである。

---

\*訳注 原文は a few mSv



# 1. 緒 言

## 1.1 背 景

(1) 地質学的性質を持つすべての鉱物と原材料は、自然起源の放射性核種を含んでいる。主な放射性核種は、 $^{40}\text{K}$ と $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ の壊変系列の放射性核種である。 $^{232}\text{Th}$ と $^{238}\text{U}$ は、一連の放射性核種を経てそれぞれ、「娘核種」あるいは「子孫核種」として知られる安定同位体の $^{208}\text{Pb}$ と $^{206}\text{Pb}$ に崩壊する。他の原始放射性核種については存在量かはるかに少なく放射線防護上の重要性が非常に低い。

(2) 鉱物や原材料が関わるほとんどの人間活動において、原始放射性核種の壊変系列による被ばくのレベルは放射線防護上懸念されない。しかしながら、自然に存在する放射性核種を含む物質の回収、加工、使用、移動によって、結果として、放射線被ばくが高まるような状況が多く存在する。これらの被ばくが高められる過程に関わる物質は、自然起源放射性物質(NORM)であると考えられている。例えば、一部の商用のものも含め、ある種の鉱物は、カリウム、トリウム、ウランの子孫核種を有意な濃度で含有している可能性がある。

(3) さらに、放射性核種は鉱物の抽出と加工の間に分散し、および／または、物理化学的性質が変化し、その結果、生産物、副産物、排出物、残渣、その過程で生じる廃棄物に不均一に分布するかもしれない。放射性核種の放射能濃度は元の鉱物中の濃度を時には数桁上回ることがあり、これは、作業者と公衆の構成員の被ばくを著しく増大させ、環境の汚染につながる可能性がある。

(4) 1896年にベクレルが放射能を発見したわずか2年後、マリー・キュリーはウラン含有量の多い鉱石であるピッチブレンドを数トン加工した後、ラジウムとポロニウムを発見した。その数年後、ラドン(当時「ラジウムエマネーション」と呼ばれていた)が、地上に運ばれた石油と天然ガスの中で発見された。その後、いくつかの研究が行われ、堆積岩、石油、地下水、塩水に関連する放射能についての最初の総説が報告された(Monicard and Dumas, 1952)。自然線源からの放射性残渣の発見は、英国や米国の石油製造施設などで1950年代に初めて報告された(Schmidt, 2000)。しかし、産業におけるNORM被ばくに起因する潜在的な健康、安全、環境リスクは、1980年代以降になってようやく広く認識されるようになったのである(Miller et al., 1991)。

(5) *Publication 26* (ICRP, 1977)において、委員会は、いくつかの行為が「自然バックグラウンド放射線からの被ばくレベルを上げる」(235項)可能性があり、人工線源とほぼ同じ

ような方法で制御しなければならないレベルの自然放射線があるかもしれないことを認識した。委員会は、そのような制御の原則に関する実用的なガイダンスを与えなかった。同年、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）は、国連総会の報告書（UNSCEAR, 1977）において、「技術的に高められた自然放射線による被ばく」に関する章を設けた。

(6) *Publication 39* (ICRP, 1984) とその後の *Publication 60* (ICRP, 1991) において、委員会は、自然線源、特に原始放射性核種と子孫核種の放射線による作業者と公衆の被ばくを制限するための原則を提案した。委員会は、「通常は放射性とはみなされないが、微量の自然放射性核種を有意に含む物質を扱う操業およびその物質の貯蔵」(ICRP, 1991, 136 項) に関しては、職業被ばくの一部として、いくつかの自然線源による被ばくを含めるべきであると述べた。

(7) 長期被ばくに対する公衆の防護を目的とした *Publication 82* (ICRP, 1999) において、委員会は、「産業開発は、自然起源の放射性物質 (naturally occurring radioactive materials, 通常、NORM と呼ばれる) 中の放射性核種濃度を技術的に高めることによって、さらに人々の「自然の」被ばくを増やした」(6 項) と言及することで、初めて「NORM」という用語を認めた。*Publication 82* は、長期被ばくをもたらす行為への放射線防護のために、*Publication 60* (ICRP, 1991) の体系の適用に焦点を当てている。経済的かつ社会的要因を考慮して、線量が「合理的に達成可能な限り低く」なることを確実にするために、最適化の適用が期待された。その後、*Publication 101* (ICRP, 2006) において、委員会は最適化の原則の適用に関する詳細なガイダンスを提供した。この刊行物では、行為に関する線量拘束値と線量限度は、NORM 被ばくに適しているかもしれないが、「注意と柔軟性」をもって適用されるべきであると勧告している。

(8) *Publication 103* (ICRP, 2007a) において、委員会は *Publication 60* (ICRP, 1991) の放射線防護体系を改訂した。このアプローチは従来採用されたプロセスに基づくアプローチではなく、今や放射線被ばく状況の特徴に基づいている。この防護体系は、線源の規模や起源に関わらず、あらゆる線源からの電離放射線によるすべての制御可能な被ばくに適用されるが、全体として、被ばくの線源または個人が受ける線量をもたらす被ばく経路のいずれかが、何らかの合理的な手段で制御できる状況にのみ適用できる。この改訂の重要な意味は、NORM からの被ばくを含むすべての被ばくが、今や防護体系の範囲内にあり、正当化と最適化の原則が常に適用されるということである。*Publication 103* (ICRP, 2007a, 284 項) は、現存被ばく状況の例として、NORM を伴う多くの産業から生じる人と環境の被ばくを挙げている。

(9) *Publication 104* (ICRP, 2007b) では、NORM の被ばく管理に関する国際的な合意が必要であること、また NORM を伴う産業は放射線防護に関してさまざまな規制を受けてきたことを認めた。なぜならば、放射線防護体系は操業開始後に導入され、既存の産業衛生管理により放射線被ばくの可能性がすでに制限されている（例えば、空气中ダストの管理）からである。NORM を伴う産業や活動に対して、数値基準を用いた除外と免除は役に立つかもしれないが、しばしば必要とされる定性的な判断に欠けている。そこで、*Publication 104* は、作業者の防護

と公衆衛生を促進することを全体の目的とし、その時点で広く見られる状況と人々のリスクを考慮して、NORMの被ばく管理におけるグレーデッド・アプローチを提唱した(137項)。

(10) 2007年勧告(ICRP, 2007a)以降、環境防護についてより明確に取り上げることを目的としたいくつかの刊行物が発表された。具体的には、*Publication 108* (ICRP, 2008)では標準動物および標準植物(RAP)が導入され、*Publication 124* (ICRP, 2014a)では異なる被ばく状況での環境防護の適用が扱われている。

(11) 委員会は最近、放射線防護体系を現存被ばく状況に適用するための一連の刊行物に取り組んだ。*Publication 126* (ICRP, 2014b)では、ラドン被ばくの防護に関する勧告が改訂された。*Publication 132* (ICRP, 2016)では、航空飛行時の宇宙放射線からの防護が扱われている。放射線緊急事態後の緊急時被ばく状況と長期汚染地域の居住に関する*Publication 109*と*111* (ICRP, 2009a,b)は、現在改訂中\*である。また、過去の産業、軍事、および原子力の活動による汚染サイトにおける被ばくについての刊行物も準備中である。

## 1.2 範 囲

(12) 委員会のNORMに対するアプローチは、*Publication 103* (2007年勧告)、*Publication 104* (放射線防護体系の適用範囲)、*Publication 124* (環境の防護)、*Publication 126* (ラドンとトロンからの防護) (ICRP, 2007a,b, 2014a,b)に基づいている。その焦点は、採鉱や鉱物抽出のような産業プロセスや、放射線防護の検討が必要と確認された地質由来のNORMによる被ばくにつながりうる他の産業活動に置かれている。また、「産業」という用語には、小規模な事業活動も含まれる。多くの場合、原材料(例えば、化石燃料)は高いレベルのNORMを有さないが、その後の活動と産業プロセスは、生産物、副産物、排出物、残渣、あるいは廃棄物においてより濃縮された放射性核種を発生させる。産業プロセスはさらに、作業者と公衆の構成員、あるいはどちらか一方の被ばくを増加させる可能性と同時に、人とヒト以外の被ばくを伴う環境への放射性物質の排出をもたらす可能性、あるいはどちらか一方の可能性がある。NORM被ばくを伴う可能性のある活動については、2章および付属書Aに詳しく記載されている。

(13) 本刊行物では、講じられる対策の正当化、防護の最適化、適切な個人線量基準の使用を通して、NORM産業に起因する被ばくがどのように管理できるかを概説する。被ばくが計画被ばく状況としてより適切に管理されているNORMの産業や取引は含まれない。これに

---

\*訳注 ICRP *Publication 146* Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident : update of ICRP Publications 109 and 111 として2020年に発刊された。邦訳版(大規模原子力事故における人と環境の放射線防護——ICRP Publication 109と119の改訂——)は、2022年12月に発刊された。

は、放射性、核分裂性、または核分裂核種生成性の特性を利用して鉱石からウランやトリウムなどの物質を抽出する目的で設置された採鉱施設が含まれるが、必ずしもそれら施設に限定されない。

(14) NORM 被ばくに寄与するものは、( $^{238}\text{U}$ の壊変による)ラドン ( $^{222}\text{Rn}$ ) ガスと、寄与度は少ないが、( $^{232}\text{Th}$ の壊変による)トロン ( $^{220}\text{Rn}$ ) ガスである。近年、ICRP は疫学的研究を見直すことにより、ラドンとトロンからの肺がんリスクに関する情報を提供 (ICRP, 2010) し、作業者と公衆の防護に関する勧告を策定 (ICRP, 2014b) し、ラドンの新しい線量係数を提供 (ICRP, 2017b) した。*Publication 126* (ICRP, 2014b) では、委員会は、建物の用途を問わず、可能な限り建物や場所の管理によりラドン被ばくを制御するための統合的アプローチを勧告している。このアプローチは、職場のさまざまな線源 (例えば、地面、建築材、NORM を含む鉱物) から生じるラドンとトロンに有効である。したがって、NORM を伴う産業におけるラドンとトロンの被ばくは、*Publication 126* の手法に従って管理されるべきであろう。

(15) 多くの NORM を伴う産業は長い歴史を持つことから、サイトは NORM 残渣と過去の活動からの廃棄物によって汚染されている (レガシーサイト\*<sup>1</sup>) と認識されてきた。2014 年に、ICRP は過去の産業活動により汚染されたサイトによる被ばくに、委員会の勧告をどのように適用するかについての報告書を作成するためのタスクグループを設立した。そのため、ここではこのトピックについて深く取り上げない。

(16) 2007 年勧告 (ICRP, 2007a) は、植物相や動物相を含む環境の防護をより明確に扱うために、放射線防護の体系を拡張した。その後、*Publication 108* (ICRP, 2008) では、委員会は、RAP の導入を通じた環境防護の枠組みと、それを放射線防護体系内でどのように適用すべきかを述べている。*Publication 124* (ICRP, 2014a) は、さまざまな被ばく状況での環境防護の適用を扱っている。2007 年勧告 (ICRP, 2007a) で確立された手法を基礎として、本刊行物は NORM 被ばくの環境防護を具体的に取り上げる。本書の補足として、*Publication 114* (ICRP, 2009c) は RAP に関する移行パラメータを提案、*Publication 136* (ICRP, 2017a) はヒト以外の生物相に関する線量係数を勧告する。RAP の線量評価に適用するための放射線加重係数の導出に関連する報告書は準備中\*<sup>2</sup>である。

(17) 放射線防護体系の倫理的根拠は、*Publication 138* (ICRP, 2018) で記載した、善行／無危害、慎重さ、正義、尊厳という 4 つの中核となる倫理的価値に依拠している。NORM 被ばくに対する防護戦略において組み込まれるべき重要な倫理的課題がある。放射線防護体系を適用することは、害よりも多くの益をもたらす (善行／無危害)、不必要なリスクを避け (慎重さ)、公正な被ばくの分布を確立し (正義)、そして人々に敬意を持って接する (尊厳) 決定

\*<sup>1</sup>訳注 負の遺産を抱えるサイト。

\*<sup>2</sup>訳注 ICRP *Publication 148* Radiation Weighting for Reference Animals and Plants として 2021 年に発行された。

への止むことのない探求である。

(18) NORM からの人と環境の防護を考えると、電離放射線が考慮されるかもしれないが、一般的には、放射線が唯一のハザード<sup>†</sup>ではなく、おそらく最も主要なハザードでもない。実際、NORM の残渣と廃棄物は、人の健康と環境に有害となり得る放射線以外の有毒な成分（例えば、重金属類）を含んでいる可能性がある。本刊行物は、産業衛生と環境規制によって制御する必要のあるこれらの成分の管理に関するガイダンスは提供しない。しかしながら、委員会は、放射線と存在するかもしれない他のすべてのハザードの管理のために、すべての懸念に対して包括的な方法で防護が最適化されるよう、統合的アプローチを用いることを勧告する。

(19) 本刊行物における NORM を伴う産業における放射線防護のための勧告は、*Publication 103, 104, 124, 126* (ICRP, 2007a,b, 2014a,b) といった以前のすべての関連勧告に置き換わるものである。

### 1.3 本刊行物の構成

(20) 2章では、NORM 被ばくの特徴、NORM 被ばくが発生する可能性のある産業や行為の概要、NORM サイクルに関連した要素を紹介する。3章では、被ばく状況のタイプ、関連する被ばくのカテゴリー、適用される基本原則を含む、NORM 被ばくに適用される委員会の放射線防護体系を説明する。4章では、被ばくを受けるさまざまな作業員、公衆、環境に対して、統合的アプローチおよびグレーデッド・アプローチを用いた放射線防護体系の実施に関する指針を提供する。結論は5章で提供される。付属書 A には、NORM 被ばくを伴う可能性のある活動の詳細が記載されている。

---

<sup>†</sup> 訳注 危険有害要因を意味する。





## 2. NORM 被ばくの特徴

### 2.1 遍在性と多様性

(21) 自然起源の放射性核種は、どこにでも存在し、地球上のほぼすべての物質の中に存在する。それらは、一般的には放射線防護上の懸念の対象とならない。しかしながら、一部の人間活動は、これらの物質からの放射線被ばくを高める可能性がある。

(22) 多くの機関が、作業員、公衆、環境の NORM に関連する放射線被ばくの可能性がある産業について包括的なレビューを行っている (UNSCEAR, 1982, 2008; EC, 1999a; IAEA, 2006; EURATOM, 2013)。関連産業の例を以下に示す。さらに、過去の産業サイトは NORM を扱っていた可能性があり、これらのレガシーサイトは注意が必要となる可能性もある。そのような産業活動の詳細は付属書 A に記載されている。

- 希土類元素の抽出
- 金属トリウムとその化合物の製造と使用 (すなわち、核分裂性、核分裂核種生成性、放射性の特性ではなく、それらの金属の特性のためである)
- 鉱石の採鉱と加工 (核燃料サイクル用のウランやトリウムを除く)
- 石油とガスの回収処理
- 二酸化チタン顔料の製造
- リン酸採鉱と加工業
- ジルコン、ジルコニア産業
- 金属 (錫、銅、鉄、鋼、アルミニウム、ニオブ・タンタル、ビスマス等) の製造
- 化石燃料 (主に石炭) の燃焼
- 水処理
- 地熱エネルギー生産
- セメント製造とクリンカ焼却炉の保守
- 建築材 (残渣や副産物から製造した建築材を含む)

(23) NORM を伴う典型的な産業は、異なるレベルの放射能濃度を有するさまざまな原材料を加工処理し、多様な生産物、副産物、排出物、残渣、廃棄物を生産する。これらの産業が放射線防護上の懸念対象となりうるか、そうでないかは、取り扱われる原材料中の放射能濃度、採用されるプロセス、最終生産物の用途、残渣の再利用と再生利用、廃棄物の処分に依存する。

(24) プロセスの範囲によって、以下を含む職場での放射線被ばくのシナリオは多岐にわ

たる。

- 大量の鉱石、原材料の備蓄、残渣や廃棄物など
- 少量でも鉱物精鉱、スケール、スラッジなどの濃縮された放射性核種を含む物質
- スラッグ、集塵器のダスト、加熱炉の蒸気など、高温処理で揮発した物質

(25) NORM を伴う作業活動は、放射線の外部被ばくおよび内部被ばくを引き起こす可能性がある。外部被ばくは、低い線量率での長時間の（ガンマ線）被ばく、機器の内部保守・スラッグ・スケール・スラッジの保守を行うことによる高い線量率での短時間の（ガンマ線、時にはベータ線）被ばく、もしくはこれらの組み合わせから生じる可能性がある。内部被ばくの可能性は、職場での NORM の発生経路や、作業者の装着する個人用防護具（PPE）によって主に左右される。ラドンは、屋内や地下の空気における被ばくの重要な線源となり得る。屋内ラドンの被ばくは、土壌、処理された NORM、施設の建築材から生じることがある。大規模な採鉱と粉碎作業では、空気中ダストは一般的な産業ハザードであり、とりわけ、より高い放射能濃度（例えば、数十  $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  を超える）が存在する場合、NORM の吸入による内部被ばくは有意となることがある。対照的に、水中の NORM の摂取による内部被ばくは、通常低い（EC, 1999a）。しかしながら、職場の状況、含まれる放射性核種、放射性核種が組み込まれる物理化学的母材、発生源に応じて、かなりの差異が出る可能性がある（UNSCEAR, 2016）。

(26) 世界で非常に多くの作業者が NORM に被ばくしている可能性があり、そのデータは人工線源の職業被ばくデータよりも限られているが、自然放射線源に被ばくした作業者の世界的な被ばくレベルは年間 30,000 人 $\cdot$ Sv（約 1,300 万人）と推定されている。（UNSCEAR, 2008）。1996 年に電離放射線の防護のための国際基本安全基準（IAEA, 1996）が実施されるまで、ほとんどの国は自然放射線源による職業被ばくの評価に特に関心を持っていなかった。表 2.1 [IAEA (2006) より引用] は、NORM を伴ういくつかの産業における作業者の被ばくの範囲を示している。大半の職場では、作業者が受ける平均線量と最大線量は、年間数  $\text{mSv}^{\ast 1}$  未満と評価されているが、特定の職場では、場合によっては数十  $\text{mSv}^{\ast 2}$  程度のより高い線量が生じることがある（非常にまれだが、地下鉱山で約 100  $\text{mSv}/\text{年}$ ）。

(27) 公衆被ばくに関しては、直接的な外部被ばく（つまり、そのサイトにおける NORM による被ばく）は通常無視できるが、これには例外がある。NORM サイトを伴ういくつかの特定の産業では、工場のすぐそばの代表的個人で  $\text{mSv}$  範囲の年間線量を受けることがあると報告されている（UNSCEAR, 2008）。一般に、NORM による公衆の線量は、主に、日常的な排出物として大気と水中に放出される放射性核種と建築材等の製品の副産物（NORM を含む）の使用によって生じる。まれに、飲料水中の NORM が問題となることがある。関連する産業の多様性、被ばくに関連する地域の状況、サイト固有の放射線学的評価の全体的な欠如によっ

訳注<sup>\*1</sup> 原文は a few  $\text{mSv}$  per year

<sup>\*2</sup> 原文は a few tens of  $\text{mSv}$  year<sup>-1</sup>

表 2.1 作業者の線量評価の例 (外部被ばくとダストによる内部被ばく、ただしラドン被ばくを除く)

活動内容	最も放射能濃度の高い放射性核種	年間実効線量 (mSv)			分布
		最小	平均値	最大	
トリウム鉱の加工*	<sup>232</sup> Th (原料, 生産物)	3.0	7.8	7.8	
トリウム化合物の生産†					67% < 1
希土類鉱物の採鉱‡	<sup>238</sup> U, <sup>232</sup> Th 系列 (原料)	0.24 ~ 1			
希土類鉱物の選鉱‡		0.28 ~ 0.61			
モナザイトの取扱い	<sup>232</sup> Th 系列		0.3	0.3	
希土類の分離・精製	<sup>228</sup> Ra (残渣)		0.3	0.3	
希土類施設の廃止措置§	<sup>228</sup> Ra (残渣)	0.2	7.2	8.94	
ウラン鉱以外の採鉱	<sup>238</sup> U, <sup>232</sup> Th 系列 (通常の場合)	1.3	3	5	
海上における石油・ガスの生産	<sup>226</sup> Ra (スケール/スラッジ)		0.5	0.5	
陸上における石油・ガスの生産			0.05	0.05	
石油の生産・配管洗浄‡¶			0.6	3	80% < 1
二酸化チタン顔料の生産	● <sup>232</sup> Th (原料)			0.27	
	● <sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra (スケール)				
リン鉱石の貯蔵	<sup>238</sup> U 系列			0.28	
リン酸肥料の製造	● <sup>238</sup> U (原料, 生産物)			0.5	
	● <sup>226</sup> Ra (残渣)				
ジルコンの生産	● <sup>238</sup> U 系列 (原料)			0.4	
バストネスサイト (ジルコニア) の生産	● <sup>210</sup> Po (集塵器中)			0.4	
ジルコンの製造・使用	● <sup>238</sup> U (溶融ジルコニア/生産物)	0	2.3	2.3	87% < 1
耐火セラミックスの製造・使用		~ 0.01	1.5	1.5	98% < 1
ジルコニアセラミックスの製造		.....	ごくわずか	.....	

(次ページに続く)

表 2.1 作業者の線量評価の例（外部被ばくとダストによる内部被ばく、ただしラドン被ばくを除く）（続）

活動内容	最も放射能濃度の高い放射性核種	年間実効線量 (mSv)			
		最小	平均値	最大	分布
錫、アルミニウム、チタン、ニオブ鉱石の加工	● <sup>232</sup> Th (原料, 生産物, スラグ) ● <sup>228</sup> Ra (残渣)	0		3.2**	69% < 1
銅の製錬	<sup>226</sup> Ra (スラグ)			< 1	
金属スクラップの再生利用	<sup>210</sup> Po, <sup>210</sup> Pb (集塵器)	.....	.....	.....	.....
石炭の採掘	● <sup>238</sup> U		2.75		
石炭燃焼	● <sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra (Ra 流入水の多い石炭)			0.4	
石炭燃焼	<sup>210</sup> Po (スケール)	0		< 1	
石炭燃焼				0.13	
飲料水処理	<sup>226</sup> Ra (スラッジ)			< 1	
鉱物絶縁の製造 <sup>††</sup>	NA	0.0011		0.0173	

NA：不明

\* 線量にはトロン吸入による寄与が含まれる。

† 1 mSv/年を超える線量は、主にダスト吸入によるもので、調査を行った6つの作業場のうち2つで確認された。線量低減対策（作業者に呼吸器の防護具を装備、定期的な作業場の清掃、エアフィルターの設置）を実施した後、評価を繰り返し返している。

‡ 外部被ばくのみ。線量。

§ 9 か月間の廃止措置期間で受けた線量。

¶ 5 か月間の改修期間で受けた線量。

\*\* 2008 年以前の最大線量は 6 mSv であった。

†† 鉱物は石炭、ボーキサイト、玄武岩、セメントであった。

表 2.2 公衆に対する線量評価の例（ラドン被ばくを除く）

活動内容	最も放射能濃度の高い放射性核種	年間実効線量 (mSv)
希土類の採鉱	$^{232}\text{Th}$ (汚染土壌)	0.044
希土類の選鉱	$^{232}\text{Th}$ (汚染土壌)	0.043
希土類と製鋼からのスラグの住宅用レンガの使用	$^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ (レンガ)	~ 0.2
トリウム電極棒の生産	NA	ごくわずか
ウラン鉱以外の採鉱		<1 としか特定されていない
大量の鉱物残留沈殿物, $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ が $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{232}\text{Th}$ および $^{238}\text{U}$ 系列	0.05 ~ 0.26
石油・ガスの生産	NA	<1 としか特定されていない
リン元素の生成		<0.04
リン酸ニカルシウム動物飼料の使用	$^{210}\text{Po}$ , $^{210}\text{Pb}$ (鶏の中)	<0.02
農業でのリン酸石膏 (PG) の使用	$^{226}\text{Ra}$ (肥料中)	ごくわずか
住宅建設での PG の使用	$^{226}\text{Ra}$ (建築材中)	
壁と天井, PG パネル		0.02 ~ 0.2
壁, 天井と床, 中空 PG パネル		0.46
壁, 天井, 床, 充填 PG パネル		4.5
壁, PG 板ライニング		0.15 (インド) またはわずか (オーストラリア)
壁, レンガ・セメント内の PG		≤1.4
ジルコン/ジルコニアセラミックスの製造		ごくわずか
鋼鉄の製造	$^{232}\text{Th}$ , $^{228}\text{Ra}$ (ダスト中/排気中)	<0.01
道路建設における金属再生利用からのスラグの使用	$^{226}\text{Ra}$ (スラグ)	<1 としか特定されていない
石炭の燃焼	NA	ごくわずか
飲料水の処理	NA	ごくわずか
埋立地への水処理残渣の処分	$^{226}\text{Ra}$ (スラッジ)	0.01
排出物の水処理, 旧ウラン鉱山	NA	<1 としか特定されていない
住宅建設用の一般的な建築材の使用	NA	<0.3 ~ 1

PG: リン酸石膏, NA: 不明

て、完全なレビューは困難となっている。表 2.2 に、NORM の公衆被ばくに関する一部のデータを示す [IAEA (2010) より引用]。これらの推定値は、統計的な不確実性の影響を受けやすく、しばしば保守的である。表 2.2 では、建築材にリン酸石膏が広く使われるようなまれな場合を除いて、NORM による公衆の年間実効線量は、 $1 \text{ mSv}/\text{年}$  をはるかに下回ると推定される。

(28) *Publication 103* (ICRP, 2007a) では、環境の放射線防護を示す枠組みの開発のための手法が述べられている。しかしながら、今日まで、ウラン採鉱活動（または類似の活動）以外で NORM が環境に及ぼす影響を評価した例はほとんどない。それぞれのケースは、存在する

すべてのハザード、対象となる核種、主要な環境条件、他の特性を考慮に入れて、統合的アプローチおよびグレーデッド・アプローチを用いて、個別に評価されるべきである。

## 2.2 NORM についてのゆりかごから墓場までという視点

(29) NORM を伴ういくつかの製造段階は、特定することが可能である。一部の産業では、これらの段階のほとんどすべてが関与していることもあるが、他の産業では、これらのうち一部のみが関与していることもある。

- 鉱物の抽出
- 鉱物の選鉱と加工
- 生産物の製造
- 生産物と副産物の使用
- 残渣の再利用と再生利用
- 廃棄物の管理
- 解体または修復と復旧

(30) 放射性核種濃度が高い NORM の存在は、いかなる段階においても問題となる可能性があり、適切に制御されなければ、作業者と公衆の有意な放射線被ばく、環境の汚染、そしてそれに続く動植物の被ばくにつながる可能性がある。

(31) NORM を伴う産業からの副産物と残渣は、NORM を伴う他の産業や一般的な活動で原料（例えば、建築材）として使用される可能性がある。このような事情では、NORM が発生した後に（または別の手段によって産業分野に取り入れられた後に）、場合によっては NORM が無限のサイクルに入ることになる（すなわち、NORM は転々と移動し再加工される）。したがって、NORM による被ばくの拡大は、サイクルのすべての段階で起こる可能性がある。

## 3. 委員会の放射線防護体系の NORM への適用

### 3.1 被ばく状況のタイプと被ばくのカテゴリー

#### 3.1.1 被ばく状況のタイプ

(32) 委員会は、被ばく状況を、自然または人工の放射線源から始まり、放射線や放射性物質のさまざまな経路を通じた移行、個人や環境の被ばくにつながる「事象と状況のネットワーク」と定義する (ICRP, 2007a, 169 項)。防護は、線源や個人の被ばく経路上の点において対策を取ることにより達成できる。

(33) *Publication 103* (ICRP, 2007a) の 176 項によると、委員会は、その勧告が、すべての線源および、すべての考え得る事情を扱う次の 3 つのタイプの被ばく状況、すなわち、現存被ばく状況、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況において、放射線に被ばくする個人に適用されるよう意図している。

(34) 委員会の放射線防護体系における健康上の目的は、被ばくを管理し、制御すること、その結果、確定的影響を防止し、確率的影響のリスクを合理的に達成できる程度に減少させることである (ICRP, 2007a, 29 項)。状況に基づくアプローチは、グレーデッド・アプローチを構築するために考案されていて、予想され得るリスクレベル、とりわけ確定的影響の可能性に見合った手法をとる。緊急時被ばく状況は、確定的影響を避けるために緊急の防護措置が必要とされる状況である。多くの計画被ばく状況でも、適切に制御されない場合、確定的影響の可能性はある。これは主に、放射性、核分裂性、もしくは核分裂核種生成性の特性を持つ放射性核種を使用することや X 線などの放射線を発生させる装置を使用することによる結果である。一方、現存被ばく状況では、緊急時とは異なり、放射性核種の種類、形態、濃度は、実際には短期間で確定的影響を及ぼす見込みはないため、緊急の行動を必要としない。

(35) 委員会は、NORM を伴う多くの産業から生じる被ばくを、現存被ばく状況の例とみなしてきた (ICRP, 2007a, 284 項, 288 項)。ほとんどの NORM 産業では、線源はその放射性の特性を利用するために意図的に産業プロセスに取り入れられたわけではない。一般に、放射線緊急事態や確定的影響は予想されない。原材料中の NORM が濃縮され、物理化学的形態が変化し、放射性物質の放出、残渣、廃棄物が生じる工程は、新しい放射線源を取り入れることが目的ではなく、管理しなければならないが、偶発的に生じたものである。しかし、委員会は、NORM が放射性、核分裂性、核分裂核種生成性の特性を意識して加工される場合、これを計画被ばく状況と考える。



(36) NORM を伴う産業の明確な特徴とは、線源が、時には意図的に、元の状態から変更されることである。この特徴により、規制当局は、特に作業者の防護のために、人工線源に用いられるものと同じ種類の規制プロセスを実施する傾向がある (EURATOM, 2013; IAEA, 2014)。これは、既存の活動に重大な放射線のハザードがある可能性があり、継続的な放射線防護プログラムを必要とすることを認識した結果であろう。同様に、もし新たな活動が放射線に関係すると認められた場合、一般的に、同様のリスクを持つ人工線源に対する放射線防護計画や規制構造と同じ手法を用いる必要性が示唆されるかもしれない。しかしながら、この特徴は、本刊行物で勧告している統合的アプローチおよびグレーデッド・アプローチの妥当性を変えるものではない。

(37) 上記の通り、*Publication 103* (ICRP, 2007a) の理念は、*Publication 60* (ICRP, 1991) と比較すると、すべてのタイプの被ばく状況を管理するために一貫したアプローチを勧告するものである。このアプローチは主に、適切な線量判断基準を用いた最適化の原則の適用に基づいている。現存被ばく状況では、関連する線量判断基準は参考レベルである。ただし、現存被ばく状況において、放射線のハザードの継続的な管理を適切に実施する必要がある場合、通常、許可された計画被ばく状況において用いられる、線量限度などの規制の手法の使用が適切である可能性がある。この規制の手法の適用は被ばく状況の特徴や特性を変えるものではないが、便宜的に、規制上の指定が変わる可能性がある。被ばく状況に基づく考え方は、線源と被ばくの関係の検討や対応する放射線防護原則の実施の検討に有用であるが、委員会は効果的な防護を実現するために柔軟な規制の手法の利用を勧告する。ヒト以外の生物種の防護のためには、誘導考慮参考レベル (DCRL) に基づく環境の参考レベルの使用も勧告する (ICRP, 2014a)。被ばく状況のタイプが何であれ、その目的は、予想されるリスクのレベルと釣り合いのとれた防護基準を達成することである。

(38) 経済や社会のような考慮事項だけでなく、リスクレベルにも見合ったグレーデッド・アプローチは、産業の経済的重要性、大量の残渣と廃棄物、管理のための限られた選択肢、中程度の線量レベル、および被ばく低減にかかる高い規制コストの可能性のため、NORM を伴う産業に適しているし、特に適切である。NORM を伴う産業は、一般に、複数のハザードと汚染物質が存在する状況にある。放射線リスクは、主要なハザードではないかもしれないので、その結果、放射線防護の認識が全くないか、または限られていることが多い。このような状況において、放射線防護体系は、必ずしも安全性を推進する唯一の原動力ではなく、すべてのハザードに対する統合的アプローチが取られるべきである。防護のグレーデッド・アプローチでは、まず、産業上のハザードの管理における各産業の既存の知識と経験を考慮し、次に、放射線防護の目的のために必要な追加の対策を実践的に統合すべきである。

(39) NORM が濃縮される工程での線量は、どのような状況であっても比較的低く保たれると予想される。同様に、NORM を伴う産業における放射性物質の制御喪失の想定シナリオは、

線量、組織反応や直ちに生じる生命の危機などのその後の健康影響という点では、影響は限定したものである。したがって、NORMを伴う産業では実際に放射線緊急事態を引き起こす可能性はなく、すなわち、緊急時被ばく状況を引き起こす可能性は低いが、放出物と排出物により環境と公衆に被ばくをもたらす可能性はある。

### 3.1.2 被ばくのカテゴリー

(40) 委員会は、職業、公衆、医療の3つの被ばくカテゴリーを区別している。職業被ばくとは、作業の結果として作業者が被る放射線被ばくである。しかしながら、放射線はどこにでも存在するため、委員会は伝統的に、「職業被ばく」の定義を、操業管理者の責任であると合理的にみなされ得る状況の結果として作業で被る放射線被ばくに限定している。医療被ばくは、医学の診断と治療の過程における患者の被ばくである。公衆被ばくには、職業被ばくと患者の医療被ばく以外の人間のあらゆる被ばくが含まれる。

(41) NORMを伴う産業は、職業被ばくと公衆被ばくの両方を引き起こす可能性があるが、医療被ばくは引き起こさない。

(42) ほとんどの場合、NORMを伴う産業における作業者の被ばくは、NORMの放射性という特性を利用するために意図的に追加しなくても、加工される物質中にNORMが存在することは自然の事実であるので付随的であり、作業者は、しばしば職業被ばくを受けているとはみなされない。*Publication 126* (ICRP, 2014b, 59項)にある*Publication 65* (ICRP, 1993)の引用で記載される通り、放射線に職業上被ばくしているとみなされない作業者は、通常、公衆の構成員と同様に取り扱われる。しかしながら、彼らの被ばくは考慮されるべきである。放射線リスクを他のハザードと統合し、合意された労働安全衛生基準に従い、すべてのハザードに対処するのは操業管理者の責任である。

(43) 4.1節で説明する通り、NORMを伴う産業における作業者の防護に関しては、参考レベルの選択と合理的な防護措置の選択と実施に基づいたグレーデッド・アプローチが勧告される。このアプローチでは、上記で説明したように、ハザード管理に対するより全体的で相乗的なアプローチにおいて、他のハザードの制御手順に放射線防護を統合することも考慮すべきである。

(44) まれに、線量のレベルが高いままであったり、放射線防護の目的のために特別な作業手順の適用が必要とされる場合がある。このような場合、職業上被ばくする作業者に推奨される対策が適用される (ICRP, 1997)。委員会の勧告は、状況に関わらず防護プログラムのすべての要素を必要とする、と解釈されるべきではない。アプローチは、存在するハザードに基づいて相応にグレード付けされるべきである。

(45) 4.2節で説明する通り、公衆被ばくは、NORMの排出物、廃棄物、残渣（再利用と再生利用を含む）、可能性のあるレガシーサイトの管理を通して対処する。

(46) また、NORM を伴う産業は抽出、輸送、貯蔵、加工、廃水、排出、事後的放出を通して、環境にも被ばくを生じさせる。4.3 節で説明する通り、環境の被ばくも、共通の環境基準に基づき、NORM の存在を考慮したグレーデッド・アプローチで対処する。

## 3.2 防護戦略の正当化

(47) 正当化の原則は、すべての被ばく状況に適用される 2 つの基本的な線源関連の原則のうちの 1 つである。*Publication 103* (ICRP, 2007a) の 203 項における勧告は、正当化の原則を通して、放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も、害よりも便益を多くもたらすべきであるとしている。そして、現存被ばく状況に対しては、正当化の原則は被ばくを低減し、さらなる被ばくを防ぐために対策をとるかどうかが決定する際に、適用されることを委員会は強調する。いかなる決定も、常に何らかの不利益をもっており、それが害よりも便益を多くもたらすべきであるという意味において正当化されるべきである。このような事情において、*Publication 103* (ICRP, 2007a) 207 項に述べられている通り、NORM を伴う産業では、正当化の原則は、主に放射線被ばくに対する防護戦略を実施するかどうかが決定する際に適用される。

(48) このように、生物多様性の保全および持続可能な発展と共に個人の幸福と生活の質に貢献するという社会の全体的な目標を達成するため、正当化は、便益を促進あるいはもたらすことを意味する善行の倫理的価値、ならびに害の原因の回避を意味する無危害の倫理的価値に該当する (ICRP, 2018)。

(49) *Publication 103* (ICRP, 2007a) の 208 項で説明したように、正当化について判断する責任は、最も広い意味で社会に対してである。したがって、必ずしも各個人にではなく、便益全体をもたらすことを保証するため、通常は政府または国の当局の上に掛かっている。しかしながら、正当化の決定への提供には、NORM を伴う産業、作業員、公衆、政府または国の当局以外の組織からの情報による多くの側面を含むであろう。したがって、放射線防護戦略に関する正当化の決定は、ステークホルダーの関与プロセスから恩恵を受けることができる。これに関して、放射線防護上の考慮は、より広範な意思決定のプロセスにおける入力の一つとして役立つであろう。

(50) NORM からの被ばくを制御する防護戦略の必要性は、被ばく状況の放射線に関する特徴を把握した後に、健康、経済、社会、倫理的事項を考慮するとさらに良く理解できる。多くの NORM を伴う産業が既に存在するので、委員会は、防護戦略が正当化されるかどうかを決定するために放射線リスクアセスメントを実施すべき NORM を伴う産業のリストを国レベルで確立することを提案する。その後、制御のレベルは、最適化の原則の実施を通して決定できる。過去の国のリストで特定されていない操業中の NORM を伴う産業工程が懸念される場合、防護戦略の正当化は、関連するステークホルダーの関与により、ケースバイケースで対処

できるかもしれない。

(51) 国のリストにおける NORM を伴う産業に関し、NORM を用いて新しい工程を実施する場合、正当化の原則は、すでに実施している工程と同様に（すなわち、主として放射線被ばくに対する防護戦略を実施するかどうかの決定を行う際に）適用されるべきである。産業プロセスでは、通常、大きな経済的および社会的な便益を生み出し、関連する放射線リスクが NORM 利用を全体として正当化されないとみなされる必要があるという決定につながる可能性は低い。例外は、ケースバイケースで対応できる。

### 3.3 防護の最適化

(52) 防護戦略を実施することが決定された場合、防護の最適化の原則は、公衆、作業員、環境を防護するための最も効果的な対策の選択を促すものとなる。人の防護に関し、委員会はこれを、経済的および社会的要因を考慮して、適切な個人線量の判断基準で導かれ、個人線量の大きさ、被ばくする人の数、被ばくする可能性を合理的に達成可能な限り低く保つためのプロセスと定義している。また、環境への影響についても合理的に達成可能な限り低く保つべきである。これは、防護のレベルは、慎重かつ合理的な姿勢を取り、その時点で広く見られる状況を踏まえて可能な限り最良の防護レベルを確保すべきであることを意味している（ICRP, 2018）。

(53) 人の個人線量分布におけるはなはだしい不公平を避けるため、委員会は、正義という倫理的価値（ICRP, 2018）に沿って、最適化プロセスにおいて個人線量判断基準を使用することを勧告する（ICRP, 2007a, 232 項）。個人の被ばく量の低減に加えて、被ばくする個人数の低減も考慮すべきである。集団実効線量は今後も、さまざまな防護戦略の選択肢から予測される被ばくを比較する際に、作業員の防護を最適化するための重要なパラメータであり続ける。

(54) 最適化プロセスでは、環境の防護を考慮すべきである。その目的は、ヒト以外の生物種に対する有害な影響を避けることである。このようなアプローチは、全体的なリスクレベルと見合ったものであるべきであり、環境防護の共通の基準、特に環境への排出の最適化と整合したものであるべきである。人の被ばくの場合と同様に、NORM を伴うプロセスは他の要素による環境へのリスクを引き起こす可能性があり、放射線の側面はオールハザード・アプローチの中で考慮されなければならない。実際には、放射線影響は環境影響評価に含め、必要に応じて監視すべきである。委員会が既に構築した RAP と DCRL の数値の組み合わせ（ICRP, 2008, 2014a）を用いる手法は、ヒト以外の生物種、種の多様性、群集・群落、および生態系全般に及ぼす可能性のある有害な放射線影響を評価する際の有用なガイダンスである。この結果は、線源を制御するための最も適切な選択肢の決定に役立つ。

(55) NORM を伴う産業の場合、最適化プロセスは、一般的に他の産業と同じ方法で実施

される。しかし、その時点で広く見られる状況において、特に放射線防護はより広範な防護戦略に統合されるはずで、その中で放射線リスクは必ずしも主要なものではないため、線量低減のための選択肢はより限定的で、異なるリソースを必要とする可能性がある。このような課題があるということは、最適化プロセスの実施と規制構造の適用において柔軟性が必要であることを示している。

(56) 最適化プロセスにおいて、関連するステークホルダーが早期に関与することは、実際の被ばく状況の特徴を考慮し、最善の防護の選択肢を選択し、結果として、防護をより効果的で効率的なものとする可能性に寄与する。

### 3.3.1 線量判断基準

(57) 委員会は、現存被ばく状況における線量判断基準として参考レベルの使用を勧告する。参考レベルは、最適化プロセスを導いて進めるために使用される線量の値を表す。参考レベルの選択にあたっては、特別な注意を必要とする被ばくを特定する目的で、実際の個人線量分布を考慮すべきである。参考レベルは、最適化プロセスにおいて経済的および社会的要因を考慮して合理的に達成可能な限り低い個人線量を維持し、線量分布の不公平を防止し低減するために、防護選択肢の中から選択するための指針となる。また、参考レベルは、防護が合理的に最適化され効果があったか検討する上で、防護措置の結果を判断するためのベンチマークでもある。

(58) ヒト以外の生物種の防護に関しては、委員会は DCRL の使用を勧告する。誘導考慮参考レベルは、そのタイプの RAP の個体に電離放射線による有害な影響が生じるハザードが存在しそうな（そのタイプの生物に対して予想される一定の生物学的影響についての知識から求められる）線量率範囲（バンド）と考えられる。DCRL は、その他の関連する情報と合わせて考えることにより全般的な管理目標と被ばく状況に応じて、環境防護に対する取り組みを最適化するための評価基準として用いることができる（ICRP, 2008）。DCRL を用いて環境防護を達成する方法は、4.3 節に記載している。

(59) 現存被ばく状況における人の防護に関して、委員会は、防護の最適化を導くための最も適切な参考レベルが 1 mSv/年未満となる可能性もあるが、典型的には *Publication 103* (ICRP, 2007a) の表 5 に記載される通り、参考レベルを通常 1 ~ 20 mSv/年の間で設定することを勧告する。1 ~ 20 mSv/年というバンドは、線源または経路が一般に制御可能であることが前提とされており、被ばく状況に関連する活動から個人が直接的な便益を受けているが、必ずしも被ばくそのものから便益を受けているわけではない。しかしながら、特定の被ばく状況に関する参考レベルの選択は、個人線量分布を考慮しつつ、特に注意を払い、最適化プロセスに有益な貢献をする被ばくを特定する目的で、状況の特徴に基づき行うべきである（ICRP, 2007a, 234 項）。

(60) NORMを伴う産業は、一般的に低または中レベルの個人被ばくを生じさせ、適切な参考レベルは、ほとんどの場合、年間数 mSv 未満となりうる。選択される参考レベルは、防護上意味があるものであるべきで、さらなる考慮が必要かもしれない個人の特定に役立たない一般的な数値であってはならない。したがって、被ばく状況の特徴、特に実際の被ばく経路および潜在的な被ばく経路、個人線量の分布と最適化の見通しに応じて、適切な参考レベルは、ほとんどの場合、年間実効線量数 mSv 未満、おそらくそれをはるかに下回る可能性がある。もし、線量分布の中で個人線量がより大きいまれなケースであれば数 mSv 以上の参考レベルを選択できるが、委員会は、そのレベルが年間実効線量 10 mSv を超える必要はほとんどないと考える。参考レベルは、自然放射線に追加される線量について適用される。

(61) 4章では、NORMに関わる作業者と公衆の防護のために勧告されるそれぞれの参考レベルの具体的なバンドを示す。これらは、*Publication 103* (ICRP, 2007a) で勧告されているアプローチと、上記の参考レベルの選択に対する全般的なアプローチと一致している。

(62) 委員会は、NORMがその放射性、核分裂性、核分裂核種生成性を利用するために処理される産業に加え、NORMを伴ういくつかの産業について、線量限度を定めている当局があることを認識している。これは線源の特徴が十分に把握され、制御され、そして有意なレベルの被ばくが継続する可能性があるような場合には特に適切である。しかし、規制の目的で線量限度を定めることは、計画被ばく状況の管理のための完全な枠組みを適用しなければならないことを意味するものではない。委員会は、防護に費やされる努力と資源が放射線のハザードとリスクに見合うように最適化されたアプローチ（グレーデッド・アプローチ）がNORM産業に対し適用され、被ばくの制御についての決定がなされる際はこのアプローチが考慮されるべきであると勧告する。つまり、規制制度により課される負担は達成される結果と釣り合いがとれているべきである。放射線と放射線以外の防護の達成に有益な寄与とならない規制要件は避けるべきである。

### 3.3.2 最適化プロセス

(63) NORMを伴う産業における人の健康と環境の防護の最適化は、以下のようなプロセスを経て行われる：(a) 被ばく状況の評価、(b) 経済的および社会的要因を考慮しつつ被ばくを合理的に達成可能な限り低く保つまたは低減するための可能な防護選択肢の特定、(c) その時点で広く見られる状況を踏まえた最適な防護選択肢の選択と実施、(d) 是正対策の必要があるかどうか、あるいは防護を改善する新たな機会があるかどうかを評価するための被ばく状況の定期的なレビュー。

(64) この反復プロセスにおいては、個人被ばくの分布における公平性を調べるのが重要な側面であると委員会は考えている (ICRP, 2006)。NORMを伴う産業では、作業者と公衆の構成員の両方の個人線量の分布が非常に幅広くなりうることに留意すべきである。防護の取

り組みは、分布の高線量域の人々（すなわち最も被ばくしている人々）に焦点を当て、その人々の被ばくを低減するための取り組みが合理的か検討し、同時に被ばく集団全体の被ばくを合理的に低減しようとすべきである。

(65) NORM を伴う産業の制御に関する意思決定は、公開され、透明であるべきである。必要に応じて、作業員、地域社会、それ以外の必要な人々を含むステークホルダーが関与すべきである。彼らの懸念や考えを聞き、考慮に入れるべきである。意思決定のための透明性のある制度は、必ずしも全当事者の完全な合意が得られるわけではないが、意見が分かれている問題に対して、適切に対処し解決することを可能にするであろう。

(66) 作業環境に自然放射線や人工放射線が含まれる状況では、組織と地域社会内での適切な放射線防護文化の発展を育成する必要性を強調し、電離放射線への潜在的あるいは実際の被ばくを含む状況において、各個人が十分な情報に基づいた選択を行い賢明に行動することを可能にする (ICRP, 2006)。これは、尊厳という倫理的概念 (ICRP, 2018) と密接に結びついている問題である。

(67) 実務における最適化原則の適用方法に関する委員会の詳細な助言は既に示されており (ICRP, 1983, 1990, 1991, 2006)、現在も有効である。

## 4. NORMを伴う産業プロセスに対する放射線防護体系の実施

### 4.1 作業者の防護

#### 4.1.1 概 論

(68) NORMを伴う典型的な産業では、さまざまな原材料および放射能濃度を取り扱う。状況によっては、被ばくを適切に制御するために、特定の個人に直接的に適用可能な制御を考慮する必要がない場合がある。これは、防護が必要とされないことを意味しているわけではなく、制御が作業者自身ではなく、職場や作業条件に対し行われていることを意味する。すべての状況において適用可能な判断基準を定義することは容易ではない。したがって、作業者の防護にはグレーデッド・アプローチが勧告される。

(69) NORMを伴う作業での主な被ばく経路は、以下の通りである。

- 外部被ばく（主にガンマ線によるが、時には眼の水晶体と皮膚に対するベータ線被ばくも考慮する必要がある）
- ダストの吸入と、はるかに微量であるが、放射性ダストの経口摂取による内部被ばく。そして、地上や地下で発生し得るラドンガスとその子孫核種（例えば、地下の職場におけるラドンガスの蓄積）および、時にはNORMから生じるトロンによる被ばく。実際には、そのような物質から生じるラドンは、既に存在するもの（例えば地面からのラドン）と区別できないことが多い。

(70) 委員会は、職場におけるラドンとトロンは、線源にかかわらず、単一の発生源として管理されるべきであると考え [すなわち、*Publication 126* (ICRP, 2014b) に記載されている通り]。すべての建物のラドン被ばくに対する防護に対して、建設目的と居住者の状況に関わりなく、統合的アプローチを勧告する。国の行動計画を通して実施される建物での防護戦略は、実施を容易にするために、最適化の原則に基づくべきであり、実用上の理由から大気中の濃度に換算された参考レベルを用いるべきである。委員会は、国の当局が広く行き渡っている経済的・社会的情勢を考慮して、 $100 \sim 300 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  の範囲で合理的に達成可能な限り低い誘導参考レベルを設定するべきであると勧告する。対応する実効線量は、呼吸率などの多くの因子に依存する [*Publication 137* (ICRP, 2017b) 参照]。 *Publication 126* に記載されている通り、ラドンの低減対策により参考レベル未満にレベルを下げるできない場合、被ばくは、職業被ばくの一部として考慮される必要がある。

(71) NORMを伴う産業における作業者は、放射線の被ばくに加え、他のハザードにも曝



されていることに留意することが重要である。放射線リスクは主要なハザードではなく、歴史的には考慮すらされていないかもしれない。そのような状況では、放射線防護の認識またはそのような防護を支える文化が欠如していることが多い。しかしながら、このような産業は、労働安全衛生の管理において経験と専門性があり、それに統合する形で放射線防護文化を築ける好条件を有している。多くの場合、空气中ダストのような職場のハザードを低減する対策は放射線被ばくも制限するので、作業者の防護に対する統合的アプローチが勧告される。

(72) NORMを伴う産業における作業者の防護は、(NORMを伴う活動により)受ける可能性のある年間実効線量と最適化により達成可能な線量低減の範囲に応じて放射線被ばくを制御するグレーデッド・アプローチに基づくべきである。

(73) 実際には、グレーデッド・アプローチは、適切な線量参考レベルの選択、必要条件の選択(すなわち、適切な防護措置)、これらの必要条件の総合的な実施によって実現できる。このアプローチの実践は、作業者が放射線に職業上被ばくしているとみなされるべきかどうかを決定することにも役立つ。

(74) このアプローチは、関連するさまざまなプロセスの放射線学的な側面とその側面の合理的かつ効果的な対処方法について、規制当局と他のステークホルダー(操業者、作業者およびその代表者、健康・安全・環境の専門家など)との間での共通の理解を得るための基礎として役立つであろう。

#### 4.1.2 作業者の参考レベルの選択

(75) NORMを伴う産業は多様であるため、すべての産業に対し参考レベルとして適切であるような単独の値は存在しない。適切な参考レベルは、被ばく状況の特徴、特に実際の被ばく経路と潜在的な被ばく経路、個人線量の分布および最適化の見通しに応じて、委員会によって勧告される1～20 mSvのバンドに基づいて選択することができる。その選択は、

- ほとんどの場合、年間数 mSv オーダー、またはそれを下回る。
- 状況によって必要な場合は、数 mSv を上回るが、ほとんどの場合 10 mSv/年を超えないことに留意すべきである。

(76) NORMを伴う多くの産業における作業者の線量分布についての現在の情報を鑑みると、10 mSv/年を超える参考レベルの選択は、放射線防護の観点から不要であろう。

(77) 上記のように、これらの線量には、ラドンやトロンからの被ばくは含まれない。*Publication 126* (ICRP, 2014a)において、委員会は、広く行き渡っている経済的・社会的情勢を考慮に入れて、100～300 Bq・m<sup>-3</sup>の範囲内で合理的に達成できる限り低く、国の誘導参考レベルを設定することを国の当局に勧告している。ラドンの予防と緩和対策の適用後も濃度が依然として参考レベルを超える場合、グレーデッド・アプローチの枠組みの中で、線量に関して被ばくのさらなる評価を実施しなければならない可能性がある。そのような場合においては、

10 mSv オーダーの参考レベルが使用されるべきである。

(78) ほとんどの場合、特に防護対策を効果的に実施した後は、残存線量が参考レベルを超えることはないと思われる。参考レベルは、防護計画が適切に機能しているかを判断し、変更が必要であるかどうかを示すために有用である。

#### 4.1.3 必要条件の選択と実施

(79) NORM 作業者の被ばくを最適化するための対策を検討する場合、既存の（すなわち、職場における放射線以外のハザードに対する）産業安全衛生管理が出発点であるべきである。過去の経験から、十分に管理され、安全性を重視する職場では、既に NORM からの放射線被ばくを低減するために多くのことを行っており、事実上さらなる追加をせずに放射線防護が十分である可能性がある。追加的な放射線防護上の制御が必要と考えられる場合には、可能な限りこれらをより広範な安全戦略に統合すべきである。

(80) 国際労働機関 (ILO) の条約（第 167 号および第 176 号）に規定される労働者の防護に関する戦略は、次の 3 つの主要な段階から構成される。

- ハザードおよびその結果として生じるリスクを排除する（例えば、有害物質を可能な限り無害またはより有害性の少ない物質に置き換えることによる）。
- リスクを最小化する（例えば、工場、機械、設備、処理に技術的対策を適用することによる）。
- リスクが残っている限り、作業員自身への他の効果的な対策を行う（例えば、PPE の使用）。

(81) NORM を伴う産業における作業員の防護について、同様の計画が適切である。職場や作業条件の管理はリスクを排除または最小限に抑えるためであるのに対し、個人の管理はそれでも十分な防護が達成されていない場合に必要とされる。作業場の管理から個人の管理へ移行するには費用がかかるため、慎重な検討が必要であり、個人の管理が必要なくなるよう、職場で十分な管理を行うことが望ましい。以下に、職場の必要条件と作業条件について述べる。

##### 4.1.3.1 状況の特徴の把握

(82) 誰が、いつ、どこで、どのように被ばくしたかを判断する特徴の把握は、作業員の防護のための重要な出発点である。これには、操業と保守両方の産業プロセスのすべての段階での被ばく形態、微粒子の物理化学的特徴、NORM 核種の分布と放射能濃度を含む産業プロセス全体を通じた NORM 核種とその放射能濃度の分布を特定するための線源の特徴の把握が含まれる。供給材料、中間体、残渣、廃棄物（施設の汚染を含む）、および環境への排出は、ラドンとトロンも同様に考慮すべきである。

(83) 線源の特徴を把握することは、作業員、公衆、環境への主要な被ばく経路を特定するのに役立つであろう。作業員の被ばくに関して、次のステップは、被ばくした集団や個人の特徴を把握し、NORM を伴う作業による年間線量の初期評価（外部被ばくおよび吸入からの

実効線量)を行うことである。

(84) 被ばく状況の特徴の把握は、関連するその時点で広く見られる状況に応じて、当然ながら細部が変わってくる可能性がある。実際には、ガンマ線による外部被ばくと放射性ダスト吸入による内部被ばくが、注意すべき2つの被ばく経路である。特にラドンとトロン吸入を考慮しなければならないが、ラドンとトロン吸入は別々に取り扱われるべきであると勧告されている。NORMを伴う異なる業種における作業者の年間放射線被ばく量を考慮する場合、現実的な推定値(すなわち、職場における実際の外部放射線レベルと空気汚染レベル、ならびに実際の作業パターンと手順を考慮する)に基づくことが大切である。放射線被ばく量を推定するには、既にある職業上の安全衛生規定(例えば、産業衛生、労働安全、空気中のダストに関する職場管理)を考慮に入れるべきである。

(85) 将来の意思決定のための確かな基盤を提供するためには、この特徴の把握の段階が、すべて文書化されていることが重要である。

(86) この特徴の把握が、防護戦略の正当化、特に放射線防護目的の特定要件および最適化プロセスのスケリングの必要性についての根拠となるであろう。

(87) 初期の特徴の把握は、定期的な見直しを行うべきである。この定期的な見直しの内容と頻度は、リスクのレベルに見合ったものであるべきである。原料、鉱石、製造方法、線量に影響し得る他の要因が著しく変化すると予想される場合、新しい特徴の把握を行うべきである。

#### 4.1.3.2 専門家による放射線防護に関する助言の取得

(88) 通常、前述のような専門性が最初から(すなわち、被ばく状況の特徴づけを補助するために)必要とされる。一般的に、NORMを伴う産業は自然放射能の問題が取り上げられるよりも前から長年にわたって操業を続けている。その結果、しばしば、放射能と放射線防護についての知識が完全に欠けている。したがって、NORMを伴う産業が既に他の幅広い分野で独自の技術支援を有している場合であっても、最初の一步として、この問題について専門家の助言を求めるべきである。そのような特定の専門知識は、組織内や外部コンサルタントから得ることができる。このような放射線防護の専門知識は、操業管理者と特別な専門知識のない国の当局の双方が求めるべきである。放射線防護専門家からの助言は、一時的に(例えば、最初の検討と評価で被ばくが非常に少ないことが示される場合)または継続的に必要となるかもしれない。

#### 4.1.3.3 ハザードを防止または低減するための初期対策

(89) これはILOのアプローチの第一段階に相当する。初期段階では、NORMからのハザードを作業工程から排除あるいは実質的に低減できる方法があるか検討することが有用であ

る。例としては、代替供給材料（すなわち、はるかに低い濃度の NORM）の選択、または放射性核種の偶発的な蓄積と濃縮を防止するように設計された工程への変更があげられる。これは、特に古くからある NORM を伴う産業において、実用的でないか、または可能でない場合があることを認識しているが、何らかの考慮はなされるべきである。

#### 4.1.3.4 エリアの区分

(90) エリアの区分は、計画被ばく状況における制御戦略の十分に確立された要素である。しかしながら、これはより広い産業健康安全戦略の一部でもある [すなわち、追加の安全対策（例えば、作業手順、換気要件、PPE の使用、立ち入り制限）が必要とされるエリアを特定するための]。特定の種類の管理（例えば、ラドンのエリアと他のエリア）に対応するため、同じ設備内で異なるエリアに分けることがある。エリア区分を効果的にするには、警告標識や場合によっては立ち入りを公式に制限することが必要となる。同じアプローチが、NORM を伴う産業にも適している。作業者の知る権利という規約により、必要な標識の種類を決定することができる。この概念は、例えば、ダストに対する警告と管理があるように、いくつかの産業において既に実施されているかもしれない。

#### 4.1.3.5 工学的制御

(91) 上記のとおり、NORM には、事故的な被ばくによる高線量を伴うシナリオが一般的には想定されないという特徴がある。したがって、そのような被ばくを防止するための従来の工学的制御は必要ない。その代わりに NORM からの長期的な被ばくを制限するための対策が、より重要な検討事項である。これらは施設の設計と配置から始まり、次にダスト管理の具体的な対策（例えば、封じ込めと換気）である。鉱物加工工場のような NORM を伴う産業は非常にダストが多い可能性があり、このような施設ではダスト管理の戦略と計画が既に実施されている可能性がある。封じ込めと換気システムの改善は、全体的な観点から（すなわち、放射性物質および他材料に対する全体的影響の観点から）考慮されるべきである。

(92) 外部放射線被ばくを制限するための具体的な工学的対策（すなわち遮蔽）が必要とされることがあり、例えば非常に高い放射能濃度の NORM を含む配管と容器の周辺に局所的な遮蔽が考慮されることがある。しかしながら、より一般的には、防護は作業パターンの調整、場合によっては、物質、施設、人員の再配置（距離の確保）によって行われる。

#### 4.1.3.6 作業手順

(93) 元々被ばくが低い場合でも、被ばく時間を制限するなどの手順は、内部線量と外部線量の両方を制限するのに非常に効果的である。多くの場合、必要なのは適切な量の訓練（下記参照）と管理によって支えられる優れた産業衛生と単純な安全作業手順の遵守のみである。

(94) 上記の要件は、少なくとも作業者のための一般的な情報の学習計画（下記参照）によって補完され、NORMを伴うほとんどの産業における作業者の防護に対し十分なものである。しかし、必要に応じて、個人に関連する要件について補完することができる。

#### 4.1.3.7 情報・指導・訓練

(95) 作業者に提供される情報と訓練は、放射線リスクと実行すべき予防措置に釣り合うべきである。基本的には、職場内で情報を共有し、一般的にNORMについての意識を高めることが必要である。特に、妊娠中と授乳中の作業者に対して情報が提供されるべきである。このプロセスにおいて、NORMに関わる作業者は主要なステークホルダーであり、開かれたコミュニケーションとステークホルダーの関与の原則が早期に適用されるべきである。放射線への被ばくを制限するための特別な予防措置が必要とされる場合、関係する作業者は、放射線リスクの性質と防護措置の重要性を理解するための特別な訓練、ならびにこれらの措置をどのように実施するかについての実用的な指示を受けるべきである。

#### 4.1.3.8 個人用防護具 (PPE)

(96) PPEには、防護服や呼吸保護具（ダスト用マスクなど）が含まれ、これらは既にNORMを伴う職場で他のハザードからの防護のために広く使用されている。PPEは、関連するハザードを十分に考慮して選択されるべきである。この防護具は、十分な防護を提供するだけでなく、使い勝手が良く、快適であるべきである。既存のPPEの有効性は、放射線防護のため改善されたPPEまたは追加のPPEが必要であるかどうかを決定する前に評価されるべきである。工学的制御は望ましい選択肢であり、それ以上の工学的制御が効果的でないか、または実行可能でない場合にのみ、作業手順や最終的には呼吸保護具が考慮される。また、PPEの過度な制約により被ばくが増加する可能性も考慮すべきである。

#### 4.1.3.9 線量評価

(97) 作業者の被ばく評価は、前述の初期の特徴把握の一部として必要とされる。これは、個人の線量測定ではなく、職場での測定とその他の情報（例えば、工程と作業行為に関する）に基づくことが想定される。実際には、線量レベルのみが判断基準とはならないかもしれないが、作業者の線量が年間数mSvを超えると推定される場合、グレーデッド・アプローチに従って継続的な線量評価プログラムを実施すべきである。線量が年間数mSvを超える場合、線量は職場での測定に基づいて推定されることが想定される。個人の線量評価（例えば、個人用線量計の使用による）は、被ばくの最適化を助けるための情報を提供する方法として有用であるかもしれないが、日常的に行われることは想定されない。

(98) 線量が年間数mSvを大きく上回る場合には、個人の線量評価を行うべきである。外

部放射線については、個人用線量計（パッシブ型または電子式）を用いて行われるべきである。ダストの吸入による内部被ばくの評価ははるかに困難であるが、NORMを含むダストが非常に多い職場では、放射線量の推定値算出に応用できるダストモニタリング計画が既に存在する可能性がある。もしこのような計画がなく、内部線量が高い場合は、適切な内部線量測定サービスの手配を検討する必要がある。しかしながら、そのような被ばくが最適化されている可能性は低いため、適切な防護措置によって内部被ばくを十分に低減可能であることに注意すべきである。

(99) ラドンやトロンに関しては、被ばくを評価するべきであるが、濃度の制御が可能であれば、必ずしも線量で評価する必要はない。ラドンやトロンの線量評価の場合、集団あるいは個人のモニタリングによって実施するか、職場でのモニタリングから推測することができる(ICRP, 2014b)。

#### 4.1.3.10 線量記録

(100) 作業者の線量の推定や評価に関する職場および個人のデータはどちらも記録され、十分な期間保管されるべきである。記録は、状況に応じて異なる方法で行うことが可能である。例えば、ある職場の空間線量とそこへ頻繁に通う人々の記録によって、必要に応じて遡及的に、特定の作業者の線量を評価できる。また、懸念される各作業者の診療記録のための専用シートで個人線量を登録することも可能である。

#### 4.1.3.11 健康監視

(101) NORMを伴ういくつかの産業では、既に放射線以外の理由のための健康監視プログラムがある。数 mSv を大きく上回る年間線量を繰り返し受けるような非常にまれなケースを除き、放射線防護のためだけに健康監視が必要とされる可能性は低いと考えられる。このような場合、放射線に職業上被ばくする作業者の健康監視のための既存の規定が使われることになっており、それで十分であろう。

(102) これらの要件のほとんどは、容認可能な防護を達成するために必要な程度まで実施されればよい。実施方法は状況に応じて変更するべきである。被ばくを低減するためのあらゆる合理的な努力にもかかわらず、高い個人線量が続き、業務を遂行するために特別な作業手順の適用が必要とされる場合、作業者は、職業上被ばくしていると見なされる可能性が高い。ラドン被ばくの場合、*Publication 126* (ICRP, 2014b) では、全国リストで特定されている一部の職場や作業者が必然的にかつ実質的にラドンに被ばくする施設においては、作業者が職業被ばくしていると見なすことができ、この被ばくは業務活動とより密接かつ明白に関連していると勧告されている。

(103) このような場合、*Publication 75* (ICRP, 1997) に記載されているように、教育と訓練、

個人の放射線量のモニタリングと記録、あるいは放射線防護目的のための健康監視をすべて実施する必要があるかもしれない。

## 4.2 公衆の防護

(104) 公衆の防護の一般的なアプローチは、被ばく経路の分析と線量評価を含め、被ばく状況（誰が、いつ、どこで、どのように被ばくしたか）の特徴の把握から始めるべきである。この特徴の把握が防護戦略の正当化の基盤となる。次に、参考レベルの選択、防護措置の選択と実施、意思決定プロセスへのステークホルダーの関与、そして必要に応じて状況の長期モニタリングの提供を含めて、最適化プロセスが実施されるべきである。

(105) この最適化プロセスは、善行／無危害、慎重さ、正義、尊厳の倫理的価値を念頭に置きながら、合理的な方法で実施されるべきである。より複雑な状況では、各倫理的価値に関するステークホルダーの潜在的な関心事項を確認するためにステークホルダーと協働することは、容認可能で持続可能な解決策に向けて取り組む上で非常に有用である。

(106) 公衆の防護のための参考レベルは、防護の最適化プロセスを有益に導くため、年間数 mSv\* のオーダー、またはそれを下回るように選択すべきである。NORMを伴う産業による公衆被ばくの一部の場合において、存在する線量分布を考慮すると、実際には1 mSv／年未満の参考レベルが最も適切かもしれない。公衆の防護は、全体として（すなわち、さまざまな被ばく経路を考慮に入れて）対処すべきである。ある状況では、経路はNORMの排出物、廃棄物、残渣、およびレガシーサイトの可能性に関して考慮される必要がある。実際には、それぞれの経路で最も被ばくする個人はそれぞれ異なる集団に属しているので、参考レベルはいかなる経路に対しても汎用的に適用することが可能である。NORM残渣の再利用と再生利用が、新たなNORM利用の開始地点となる可能性がある。

(107) NORMを伴う産業から生じるラドンとトロンの公衆被ばくは、主に残渣の再利用（例えば建築材）によるものである。*Publication 126* (ICRP, 2014b) に定めた該当する勧告は4.2.4節に記載する。

### 4.2.1 NORMを伴う産業からの排出物

(108) 放射性や非放射性の液体および気体排出物は、NORMを伴う産業の通常の操業から意図的に排出されることがある。また、放射性核種は物理化学的形態を変えることがある[例えば、廃水や排気（エアロゾル）中の微粒子と反応することがある]。石油とガス採掘、リン酸塩処理産業、石炭燃焼などの特定の場合において、NORMの排出物は人と環境の両方の防

---

\*訳注 原文は a few mSv per year

護に関わる課題となってきた。したがって、放射線と放射線以外の影響を考慮に入れて排出物を適切に管理するべきであり、必要であれば公衆と環境の防護のために制限するべきである。

(109) サイト特有の包括的な排出物管理は、放射線防護の観点から以下の段階を含むべきである。

- 排出物の放射線学的な特徴の把握
- 空間的、時間的な放射性核種の環境分布、周辺環境下での放射性核種の移動性を考慮した潜在的被ばく経路の特定
- 線量評価とリスク推定
- 排出物管理手段の正当化
- 参考レベルの選択
- 最適化プロセス（合理的に達成可能な限り低く）を用いて防護戦略の中から対策の選択と実施

(110) 防護戦略には、排出量と濃度を削減もしくは低減することを目的とした防止対策と、公衆と環境の被ばくの観点から排出物の影響を低減することを目的とした緩和措置が含まれるべきである。最適化プロセスとステークホルダーの関与は場合により異なるが、実際問題として、NORM施設の操業上の特徴、排出過程、放射能レベルと推定されるリスク、関与する公衆のグループ、社会的側面と政治的側面、公衆の懸念に依存する。実際には、排出物の処理などの一部の過程で高濃度の放射性核種を含む廃棄物のさらなる発生、あるいは全体的な生成廃棄物の量の増加につながる可能性があるため、最適化は複雑となる可能性がある。

(111) 飲料水の問題、環境影響（下記参照）、地域における現在と将来の土地利用、同地域に複数の施設が存在する可能性にも注意を払うべきである。

(112) 測定可能な量（例えば、総放射能と放射能濃度）に換算された参考レベルの使用は、NORMを伴う産業に適切であろう。

#### 4.2.2 廃棄物

(113) 液体と固体の両廃棄物は、それ以上の利用が予定されない物質である。NORMを伴う産業は、放射性と非放射性の汚染物質の両方を含有する廃棄物を発生させ得るため、その両方を一貫して管理するべきである。世界的に、NORMを伴う産業は、高濃度の放射性核種を含む少量の廃棄物から低濃度の放射性核種を含む大量の廃棄物までさまざまな廃棄物を発生させている。

(114) 適切な処分方法を決定するため、廃棄物の特徴の把握を行うべきである。廃棄物処理は最適化プロセスに関連して考慮し実施されるべきだが、高濃度の廃棄物は難しい場合がある。廃棄物の課題は、新しいプロジェクトを開始する、あるいは設計する際に、廃棄物の発生から最終処分まで（「ゆりかごから墓場まで」）検討されるべきである。



(115) NORM 廃棄物の処分方法は、すべてのタイプの汚染物質（放射性と非放射性）を考慮し、ハザードの種類と程度に見合ったものであるべきである。放射能レベルと廃棄物量に応じて、グレーデッド・アプローチを適用すべきである。廃棄物の中には、産業廃棄物や有害廃棄物として処理され、グレードに応じて浅地中の埋設施設に処分できるものもある。より高い放射性核種濃度を有する廃棄物の処分は、放射性廃棄物の管理と整合すべきである。

#### 4.2.3 残 渣

(116) 残渣は再生利用や再使用できる物質である。残渣は主に NORM サイクルの上流（探鉱、材料の抽出）で発生し、その放射能濃度は原材料と比較して大幅に高められている可能性がある。それらは、廃棄物と同様に、再使用の可能性がある場合、特性を把握し、適切に保管されるべきである。NORM 残渣の利用を検討するにあたっては、経済上と環境上の議論がある。NORM を伴う産業の副産物と残渣は、NORM を伴う他の産業による原料、埋立地（化学的なハザードや地下水への経路がない場合）、商品（例えば、建築材）において使用できる。原料としての残渣の使用が新しい NORM 利用過程の出発点である可能性がある。再生利用や再利用は廃棄物削減に貢献している。しかし、場合によっては、作業員、公衆、環境への被ばくにつながる可能性がある。環境汚染を防止するため、保管される残渣は保管期間に関わらず適切に管理されるべきである。

(117) NORM 残渣の再利用や再生利用のため、防護戦略の実施が検討されるべきである。その評価には、被ばくレベル、環境汚染、代替策、製品の将来性、社会の受容などのさまざまな部分を考慮するべきである。まれに、評価に基づき、新たな利用過程が正当化されず、残渣は廃棄物として扱われなければならないこともある。

(118) 防護戦略が正当化される場合、線量低減の範囲が制限される可能性があることを認識して、最適化が検討されるべきである。

#### 4.2.4 建 築 材

(119) 建築材には、原材料由来の自然放射性核種（例えば、採石場から採取されたもの）、NORM を伴う産業からの残渣、天然の放射性物質が一部混合する材料（例えば、コンクリート）が含まれていることがある。これらは、直接的な外部ガンマ線と屋内の空气中に放出されたラドンとトリオンによって、公衆被ばくを引き起こす可能性がある。通常、建築材の製造と利用による職業被ばくは低いですが、NORM を伴う他の産業と同様にグレーデッド・アプローチで管理されるべきである。

(120) NORM が含まれる建築材の利用は、排出物、廃棄物、残渣など、NORM による公衆被ばくの一つの経路と考えられ、上述の通り年間数 mSv のオーダーあるいはそれを下回る参考レベルが公衆の被ばくに適用される。これは、外部ガンマ放射線による公衆の構成員の実

効線量として表されるべきである。このオーダーの線量の参考レベルは、建築材中の<sup>226</sup>Raからのラドンの吸入が屋内ラドン濃度の参考レベルを通常超えそうにないことも担保するべきである。ほとんどの国において、ラドン被ばくの原因は建築材ではないが、その線源が無視できない特別な場合もありうる。トロンの吸入は、懸念するほどのものではないと予想される。

(121) 考慮対象となる建築材、原材料、残渣のリストはさまざまな出版物 (EURATOM, 2013; IAEA, 2015) で見つけることができる。また、対象の建築材を選別し、建築材による線量を評価するためのさまざまな方法もある (EC, 1999b; IAEA, 2005; EURATOM, 2013)。しかし、建築材による実際の被ばくに関する情報を提供するためには、建築物内の特定の建築材の実際の濃度と位置を考慮するために、より精密な方法を使用する必要がある (EC, 1999b; EURATOM, 2013; IAEA, 2015)。

(122) 参考レベルを超えない建築材の普及を図ることを目的とした防護戦略を策定すべきである。この戦略は、さまざまな建築材の被ばくレベルに関する情報の提供、材料のラベル表示、放射能濃度が低い材料の使用の提案、重大な被ばくを引き起こす特定の材料の使用制限などの対策を含むことができる。善行／無危害の倫理的価値を遵守するため、想定される対策が実際に合理的かつ実行可能であることを確認してから決定することが重要である。

(123) *Publication 126* (ICRP, 2014b) で勧告された通り、各国で策定されるラドン対策計画には、関連する建築材からのラドンとトロンによる被ばくを含めるべきである。発生源に関わらず、建物でそのような被ばくを防止や緩和するための対策は *Publication 126* で示されており、ラドン被ばくを低減するために必要に応じて実施するべきである。

(124) 特に高い放射能濃度を有する残渣が建築材に含まれる場合のプロセスには、特別な注意が払われるべきである。それらは、意図的な希釈目的のため、あるいは残渣の適切な管理に関するより厳しい要件を回避するために実施されるべきではない。このことは、建築材が参考レベルを超える可能性があるかどうかに関わらず適用される。

(125) 住宅の基礎、庭、遊び場、街路や道路の表面、橋、およびその他類似の構造物などに使用される建築材に同様のアプローチを適用する必要があるかもしれない。線量評価と別の誘導放射能濃度指数を考慮する必要があるかもしれない。

#### 4.2.5 レガシーサイト

(126) 放射能で汚染されている現在のレガシーサイトの多くは NORM を伴う産業によるものである。NORM を伴う産業と関連する放射線防護の課題に対する認識が高まるにつれて、NORM レガシーサイトが高い頻度で確認されている。この状況は、施設が閉鎖され解体される際に放射線防護が十分に考慮されていない場合があることを示している。レガシーサイトとなることを防ぐための技術と方法は既に存在しており、NORM を伴う工程の操業中に実施されるべきである。

(127) レガシーサイトの問題は、将来のICRP刊行物で取り上げる。したがって、本刊行物ではいくつかの一般的な考察のみを提供する。古くからのレガシーサイトの保守と修復に対する責任あるいは義務の割り当ては、時間経過やしばしば情報紛失が原因で問題となる可能性がある。責任者が不明なサイトは、しばしば「身元不明サイト\*」と呼ばれる。NORMを伴う産業施設を適切に解体し、必要に応じて恒久的な行政管理を行うことにより、新たなレガシーサイトとなることを避けるべきである。

(128) レガシーサイト修復の正当化は、放射線防護の検討のみで推進されるものではない。NORMを伴う操業中の産業などでは、重金属のような他のハザードも存在する。参考レベルは、1～20 mSv/年の下方であるべきである。参考レベルは、修復の最終目標ではない。最終目標は、参考レベルを下回る最適化された線量レベルであるべきで、その時点で広く見られる状況（そのサイトが被害を受ける前の状況を含む）、サイトの将来の利用（予測可能な場合）、可能性のある利用条件（または制限）を考慮に入れて、ケースバイケースで決定されるべきである。

(129) 最適化の原則の実施は、例えばNORM汚染と自然のバックグラウンド放射能を区別することが時として困難であることが理由で、しばしば課題となる。この課題は、レガシーやその管理さえ社会的に受け入れられていないことを原因とすることもある。ステークホルダーの意思決定プロセスへの関与は、レガシーサイトの管理にとって非常に重要である。

(130) 修復過程に関与する作業者は、放射線を扱う作業のために特別に訓練される必要がある。そのような場合、彼らは職業上被ばくしているとみなされるべきである。

(131) 一般的な作業員や公衆の構成員が（自宅や公共の場で）修復作業に参加している場合には、必要に応じ、例えば呼吸器の防護などの保護具とともに、関連する情報と勧告を伝えるべきである。

### 4.3 環境の防護

(132) 大量のNORMが、他の汚染物質と混合した状態で環境中に存在することがある。時間経過とともに環境中のさまざまな地球化学的で物理学的な過程は、NORMの放射性核種が平衡に達するのを妨げる。選択的分散、浸出と移動、分別、生物濃縮、その他の汚染物質との反応などのメカニズムが時間経過を経て環境影響を変化させることがよく知られている。このようなタイプの環境被ばくでは、ヒト以外の生物種に生じ得るリスクと影響を評価するためのリスクアセスメントに単純な手法を用いることが困難になることがある。

(133) 最適化プロセスでは、環境中の経路を通じた人の被ばくの防止だけではなく（ICRP,

---

\*訳注 原文では orphan sites

2007a)、環境の防護(すなわち、ヒト以外の生物種の防護)に取り組むべきである。特に、廃水排出の制御メカニズムには、ヒト以外の生物相への線量予測の情報が活用できる。選択された制御は、特段、ヒト以外の生物種への放射線防護のために実施されなくてもよいが、異なる選択肢の相対的寄与は有用な情報である。しかし、特定の環境コンパートメントにおける NORM の放射能濃度増加の情報は、必ずしもヒト以外の生物種への影響の誘発を意味するものではない。影響評価は推定線量だけではなく、さまざまな要因が考慮されるべきである。

(134) 過去数十年間にわたり、環境の放射線防護のための手法の開発のために、国際的および各国の努力が重ねられてきた。産業活動における放射能についての認識を高めることは、国レベルと国際レベルの両方で重要となってきた。通常、NORM を伴う産業は放射能以外の汚染物質から環境を防護するために、一般的な基準に従ってきた。

(135) 委員会は以下を考慮した統合的アプローチを勧告する。

- すべてのストレス要因と懸念要因(すなわち、放射線と放射線以外)
- 環境被ばくによる人の健康影響、ヒト以外の生物種とそれらの組み合わせ(すなわち、種の個体群から群集、生態系)の環境被ばくによる生態学的影響

(136) 主な課題は、バランスの良い十分に正当化された統合的アプローチを用いて、調和の取れた一貫性のある人と環境の防護を実施することである。一般的に、このアプローチはすべての環境影響評価で勧告されている通り、非常に簡便で保守的な評価から開始し(慎重な被ばくシナリオの仮定のもと、一般的な入力データを用いてスクリーニングを行う段階)、その後必要であれば、明確で妥当な結論に達するまで評価の複雑さと現実性を高める(例えば、サイト特有のデータと、より詳細かつ現実的な被ばくシナリオを用いることで)ような、段階的な方法で実施することができる(IAEA, 2018)。

(137) どの産業においても、共通するスクリーニングのための統合的アプローチとして、複数の類似した施設や行為の一般的事例を実施することに付加価値を見出すことができる。この場合、人の健康(あるいは生態学的健全性)に関する些細な懸念のあるサイトを実施の容易なスクリーニング(アウト)を行う目的として、説得力があり、適切なソースタームと被ばくシナリオに基づく実証であるべきである。

(138) 防護措置は、このような一般的事例を補完する場合、あるいは、ステークホルダーが関与する意思決定プロセスを推進するために、文化的側面、社会的側面、経済的側面も考慮されなければならないサイト固有のものとして検討する場合でも、開発することは可能である。

(139) 複雑な状況の場合、環境に放出された NORM の放射線に関する特徴の把握は、線源と環境媒体(大気、水、堆積物、土壌)に含まれる放射性核種の物理化学的な形態と放射能濃度によって実施できる。ヒト以外の生物種の被ばくを評価するためには、放射性核種の移動性、空間と時間的変動、植物と動物への環境中の経路、その生物学的利用率の同定がさらに必要となる可能性がある。RAP と DCRL を用いたアプローチが開発されている(ICRP, 2008,

2014b)。選択された放射性核種や関係する生態系と生物のための線量評価モデルが、サイト固有の用途に合わせた特定の被ばく線量計算に利用可能である。サイトや生息地の重要度、既存か存在しそうな実際の生物種の重要度により、ある程度の注意が必要と考えられる。多くの場合、植物と動物にハザードを及ぼす他の要素にも留意することが重要である。委員会は、すべてのハザードに対するアプローチが取られるべきであることを再度強調して勧告する。

(140) 環境影響評価は、排出を制限する決定はあらゆる種類の曝露に影響を与えるであろうから、人とヒト以外の生物種の防護を目的とした活動の正当化の根拠として用いることができる。ステークホルダーの関与が勧告される。環境の長期的な保全は、世界中で社会的関心事項であり、放射線防護の倫理的価値の適用は有益な貢献をもたらすであろう。

(141) 環境中への NORM の排出の問題を扱う際は、必要に応じて、放射性核種、分析時間、分析試料、対象生物、記録保存、モニタリング計画に関する特別な要件を定めるべきである。防護の判断基準が継続して満たされているか確認するために、長期にわたり定期的な環境モニタリングを実施すべきである。

## 5. 結 論

(142) 産業プロセスにおける NORM は、放射線防護の観点から問題となることがある。NORM 産業は多様で、その産業分野だけに収まらず、経済的に重要な大規模産業であることが多い。NORM を伴う産業の放射線防護の方法は、何十年も議論されてきた。放射線防護体系の倫理的価値である正義と公平性の問題は、放射線以外の産業的ハザードや化学的ハザードと同様に放射線の側面を考慮することである。NORM を伴う産業における線量はさまざまであり、既に放射線防護体系が適用されている他の人間活動から生じるものと同様かそれを上回ることがある。しかし、NORM を伴う産業では、その線量が組織反応を起こす線量となる可能性は非常に低い。

(143) NORM を伴う産業は、多くの場合、放射線防護目的ではないが、一般に認可の対象である。そして、これらの産業は、作業員、公衆、環境の防護のためのリスク管理の枠組みに精通している。通常、これらの産業では、放射線防護の目的で設定された判断基準と要件を適用できるはずである。過去の経験から、放射線防護体系からではなく、従来の安全衛生基準から始めた方がマルチハザード・アプローチを策定しやすいことがわかっている。その中で、委員会は現実的かつ実用的な姿勢をとることを勧告する。

(144) NORM を使用する産業プロセスは多様で、防護戦略において考慮する必要がある特殊性を持っている。このような産業では、ほとんどが長い間操業されてきたが、最近になって放射線防護上の懸念が生じている。このような産業は複数のハザードが存在する状況であるが、ほとんどの場合、放射線リスクは主要なものではない。NORM を伴う産業は、リスク管理の経験があるが、放射線防護についての認識が限られていることが多い。ただし、今後、このような認識を育てていくことは可能であり、そうすべきである。

(145) NORM を伴う産業は制御が必要となることがあり、正当化と防護の最適化の原則、対応する線量判断基準と要件を含む防護体系の適用が可能である。NORM を伴う産業の特徴に適応させるために、委員会は、出発点として、これらの産業が直面しているハザードを管理するために既に実施されている防護戦略を考慮し、特徴の把握の後に、放射線防護対策の必要性を判断することを勧告する。そのような統合的アプローチでは、合理的かつ慎重な姿勢を取り入れ、経済的かつ社会的な事情を考慮して、さまざまなハザード間の適切なバランスでグレードに応じて実施できる。関連するステークホルダーの意思決定過程への関与は不可欠である。



## 参考文献

- EC, 1999a. Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces where Materials are Processed which Contain Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides. Radiation Protection 107. European Commission, Brussels.
- EC, 1999b. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Brussels.
- EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Off. J. Eur. Union*. 13: 1–73.
- IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for the Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No 115. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2005. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Safety Guide No. RS-G-1.8. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Works Involving Minerals and Raw Materials. Safety Reports Series No. 49. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2010. Proceedings of Naturally Occurring Radioactive Material Symposium (NORM VI). STI/PUB/1497, Marrakech, Morocco, March 2010. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2015. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Specific Safety Guide No. SSG-32. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2018. Protective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. General Safety Guide No. GSG-10. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* **1**(3).
- ICRP, 1983. Cost–benefit analysis in the optimization of radiation protection. ICRP Publication 37. *Ann. ICRP* **10**(2/3).
- ICRP, 1984. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication 39. *Ann. ICRP* **14**(1).
- ICRP, 1990. Optimization and decision making in radiological protection. ICRP Publication 55. *Ann. ICRP* **20**(1).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* **21**(1–3).
- ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. *Ann. ICRP* **23**(2).
- ICRP, 1997. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. *Ann. ICRP* **27**(1).
- ICRP, 1999. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. *Ann. ICRP* **29**(1/2).
- ICRP, 2006. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication



- 101, Part 2. *Ann. ICRP* **36**(3).
- ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2007b. Scope of radiological protection control measures. ICRP Publication 104. *Ann. ICRP* **37**(5).
- ICRP, 2008. Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP* **38**(4–6).
- ICRP, 2009a. Application of the Commission’s recommendations for the protection of people in emergency exposure situations. ICRP Publication 109. *Ann. ICRP* **39**(1).
- ICRP, 2009b. Application of the Commission’s recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111. *Ann. ICRP* **39**(3).
- ICRP, 2009c. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114. *Ann. ICRP* **39**(6).
- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny, and statement on radon. ICRP Publication 115. *Ann. ICRP* **40**(1).
- ICRP, 2014a. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124. *Ann. ICRP* **43**(1).
- ICRP, 2014b. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP* **43**(3).
- ICRP, 2016. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132. *Ann. ICRP* **45**(1).
- ICRP, 2017a. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. *Ann. ICRP* **46**(2).
- ICRP, 2017b. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP* **46**(3/4).
- ICRP, 2018. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. *Ann. ICRP* **47**(1).
- ILO, 1988. C167 – Safety and Health in Construction Convention. Entry into force: 11 January 1991. Adoption: Geneva, 75th ILC session (20 June 1988). International Labour Organization, Geneva.
- ILO, 1995. C176 – Safety and Health in Mines Convention. Entry into force: 5 June 1998. Adoption: Geneva, 82nd ILC session (22 June 1995). International Labour Organization, Geneva.
- Miller, H.T., Bruce, E.D., Cook, L.M., 1991. Management of Occupational and Environmental Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM). 1991 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Pt. 2, Production Operations and Engineering. Society of Petroleum Engineers of AIME, 6–9 October 1991, Richardson, TX, USA, pp. 627–636.
- Monicard, R., Dumas, H., 1952. Radioactivité des Roches Sédimentaires, du Pétrole Brut et des Eaux de Gisements. Institut Français du Pétrole, Paris, pp. 96–102.
- Schmidt, A.P., 2000. Naturally Occurring Radioactive Materials in the Gas and Oil Industry. Origin, Transport and Deposition of Stable Lead and <sup>210</sup>Pb from Dutch Gas Reservoirs. Department of Geochemistry, Utrecht University, Utrecht.
- UNSCEAR, 1977. Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 1982. Report to the General Assembly, Annexe C. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2016. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

## 付属書 A. NORM 被ばくが生じる活動

(A1) NORM 被ばくが生じる主な活動は、以下の通りである。

### A.1 希土類の抽出

(A2) 希土類の最も重要な原材料は、モナザイト (Ce, La, Nd, Th) PO<sub>4</sub> とバストネサイトである。モナザイトの結晶構造はウランとトリウムを取り込むことができ、地球上で最もよく見られる放射性鉱物である。放射能濃度は、<sup>232</sup>Th が 5,000 ~ 350,000 Bq·kg<sup>-1</sup>、<sup>238</sup>U が 10,000 ~ 50,000 Bq·kg<sup>-1</sup> の範囲である (UNSCEAR, 2008)。希土類元素を得るための (機械的または化学的手段による) 抽出工程で、作業者のダスト吸入とガンマ線による外部被ばくが生じ得る。さらに、抽出工程からの廃水、残渣、廃棄物は、原料中よりも高い濃度のトリウム、ラジウム、ウランを含む (EC, 1999a)。粉碎くず状の廃棄物は、埋め立て用の原材料に使用することができる一方で、特定の管理を必要とすることもある。

### A.2 金属トリウムとその化合物の製造と使用

(A3) 酸化物状のトリウムは、多くの鉱物、特にモナザイト中に存在する。トリウムは、鉱物を選鉱して酸分解することによりトリウム塩が得られ、これは金属トリウムの製造のための原材料となる。トリウムは、多くの材料に使用されており、通常は添加剤 [例えば、通常 100,000 Bq·kg<sup>-1</sup> の <sup>232</sup>Th および <sup>228</sup>Th を含むトリウム入りタングステン電極棒 (EC, 1999a)], 合金 (例えば、約 70,000 Bq·kg<sup>-1</sup> の放射能を含むジェットエンジンに使用されるマグネシウム・トリウム)、ガスマントルの製造における硝酸トリウムとして使用されている。少量のトリウムは、ガラス、空港の滑走路灯、点灯管など、多くの製品に含まれている。トリウムを含む物質を製造すると、ガンマ線による外部被ばくとダスト吸入による内部被ばくが生じる可能性がある。また、この工程により、監視と管理を必要とする固体廃棄物と廃水が発生する。

### A.3 鉱石 (ウランを除く) の採鉱と加工

(A4) ILO によれば、鉱業は世界中の労働力の約 1% (すなわち、約 3,000 万人の作業業者でそのうち約 1,200 万人が石炭採鉱) を占める大きな産業である。採鉱作業における被ばくの主

な線源はラドンであるが、ガンマ線による外部被ばく、および鉱物のダスト吸入および経口摂取による長期の放射性核種に起因する被ばくも特定の状況において重要となり得る。

(a5) 鉱石の加工は、NORM の使用によっても影響を受けることがあり、作業者の被ばく状況は、産業の種類、職場条件、含まれる放射性核種、それらの物理化学的な形態などにより大きく異なる。抽出産業に伴う自然放射性核種は、最終的に生産品、廃水、廃棄物に含まれる。環境中へ排出される排水中の堆積物の放射能は、最大で  $^{226}\text{Ra}$  が  $55,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $^{228}\text{Ra}$  が  $15,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  と測定されている (IAEA, 2003)。

#### A.4 石油・ガスの採掘

(a6) 石油やガスの地層に含まれる水には、貯留岩から溶解した  $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{224}\text{Ra}$  と、それらの壊変生成物が含まれる。この水が石油・ガスと共に地上に運ばれるとき、温度と圧力の変化により製造設備 (配管、バルブ、ポンプ等) の内壁にラジウムを多く含む硫酸塩と炭酸カルシウムのスケールが析出する可能性がある。スケールには時間が経つにつれ、有意な量の  $^{210}\text{Pb}$  と  $^{228}\text{Th}$  が親核種と一緒に生成するであろう (IAEA, 2006)。いずれにせよ、スケール中の放射能濃度は予測困難であるが、 $^{226}\text{Ra}$  の放射能濃度は  $1,000 \sim 1,000,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  の範囲で変動することが報告されている (EC, 1999a)。ラジウム同位体とその子孫核種は、セパレーター (分離槽) とスキマータンク (上澄み回収タンク) 中のスラッジ中にも出現し得る [詳細は、IAEA (2003) の表 5 に記載]。スケールに関連する主な放射線防護の課題は、スケールが蓄積した場所で働く作業者の外部ガンマ線被ばく、および保守や廃止措置中にスケール除去を行う作業員の内部被ばくである。石油、ガス、スケール、スラッジ中の放射能濃度に関する数値を表 A.1 (IAEA, 2003, 2011) に示す。

(a7) 操業者は、水に化学的なスケール抑制剤を加えることにより、スケールの析出防止を試みるかもしれない。その結果、ラジウム同位体は製造設備を通過し、随伴水と共に放出さ

表 A.1 石油、ガス、副産物中の放射性核種の放射能濃度の範囲

	原油 ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	天然ガス ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )	随伴水 ( $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ )	硬質スケール ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	スラッジ ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$^{238}\text{U}$	0.0001 ~ 10		0.0003 ~ 0.1	1 ~ 500	5 ~ 10
$^{226}\text{Ra}$	0.1 ~ 40		0.002 ~ 1200	100 ~ 15,000,000	5 ~ 800,000
$^{210}\text{Po}$	0 ~ 10	0.002 ~ 0.08		20 ~ 1500	4 ~ 160,000
$^{210}\text{Pb}$		0.005 ~ 0.02	0.05 ~ 190	20 ~ 75,000	100 ~ 1,300,000
$^{222}\text{Rn}$	3 ~ 17	5 ~ 200,000			
$^{232}\text{Th}$	0.3 ~ 2		0.0003 ~ 0.001	1 ~ 2	2 ~ 10
$^{228}\text{Ra}$	3 ~ 17		0.3 ~ 180	50 ~ 2,800,000	500 ~ 50,000
$^{224}\text{Ra}$			0.5 ~ 40		

れるであろう。同様に、ガス製造のための「フラッキング」（水圧破砕）と呼ばれる新しい技術も NORM をドリル切削くずとともに水中に放出する。例えば、米国地質調査では、随伴水中の放射能濃度の中央値が  $200 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  であると報告した（Rowan et al., 2011）

## A.5 二酸化チタンの製造

(A8) チタンは、イルメナイト（不純物としてモナザイトを含む）とルチルから抽出でき、これは高濃度の  $^{232}\text{Th}$  と  $^{238}\text{U}$  を含む可能性がある。二酸化チタン生成による放射線被ばくは、鉱石の種類、出所、製造工程によって変化する。 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  の鉱石の放射能濃度は  $7\sim 9,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  の範囲である（EC, 1999a）。分離工程では、ダストの吸入、物質の大量備蓄から放射される外部ガンマ線によって放射線のハザードを生じる可能性がある。ラジウム同位体を含む沈殿物は、加工中に生じ、廃棄物中に見つかることがある〔放射能濃度は最大で  $1,600,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ （IAEA, 2006）〕。

## A.6 リン鉱石加工業

(A9) リン鉱石は、すべてのリン酸製品の生産における出発材料であり、肥料用リンの主原料である。鉱石中の放射性核種の含有量は出所によって大きく変化し（IAEA, 2003）、一般にウランで  $3,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  未満である。リン鉱石の加工は、リン鉱石の採鉱と粉碎（この段階の間、放射能濃度の有意な上昇はないが、吸入による被ばくと外部被ばくが起り得る）と、湿式工程や熱工程によるリン酸製品の製造に分けることができる。

(A10) ほとんどのリン鉱石は、硫酸で処理されてリン酸を生成する（湿式工程）。リン酸をアンモニアと組み合わせて、混合肥料の原材料であるリン酸アンモニウムを製造できる。リン酸製造は大量のリン酸石膏を発生させ、リン酸石膏中にはラジウム同位体が含有されやすいという報告がある（EC, 1999a）。また、リン酸石膏は建築材や農業において使用される。環境防護の課題（放射線影響と毒性に関する）は、リン酸石膏の備蓄処分や地表水域への排出によって生じる可能性がある。

(A11) さらに、ラジウムを含むスケールと沈殿物は湿式工程の間に装置内部で生じ、スケール中のラジウム放射能濃度は元の鉱石中のものと同等の値から 1,000 倍まで変化し（IAEA, 2006）、外部ガンマ線および／または保守や廃止措置の間のダスト吸入による被ばくを起す可能性がある。

(A12) 熱工程では、リン酸塩を粉碎し、シリカとコークスと混合し、 $1500^\circ\text{C}$  の溶鉱炉内で燃焼させる。この温度で、リン蒸気が生成し、凝縮し、液体や固体として取り出される。リン元素は、高純度リン酸と他のリン生成物の製造に使用することができる。この工程では、

$^{210}\text{Pb}$  や  $^{210}\text{Po}$  などの揮発性放射性核種も生成し、集塵機に濃縮される [典型的な濃度は  $50,000 \sim 500,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (EC, 1999a)] が、トリウムとウランはスラグ中に留まる (放射能濃度は  $1 \sim 3,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。ダストとスラグは、セメント中の建築材として使用される場合、作業者と公衆に NORM 被ばくを与えることがある。

## A.7 ジルコン・ジルコニア産業

(A13) ジルコン (またはケイ酸ジルコニウム) は、海岸の砂から回収される。鉍物を分離するために、重量分離と電磁分離によって非常に大量の砂が前処理される。作業者の被ばくは、この大量の物質によるダスト吸入や外部被ばくによって起こる。ジルコンが化学処理される時には、廃水に NORM が含まれることがある。 $^{238}\text{U}$  で  $200 \sim 74,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  および  $^{232}\text{Th}$  で  $400 \sim 40,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (EC, 1999a; IAEA, 2012) という非常に広い範囲の放射能濃度がケイ酸ジルコニウムについて報告されている。ほとんどのジルコンサンドは、ファインセラミック、エナメル、釉薬、衛生器具において乳白剤として使用される。また、ジルコンサンドは砂にアルミナと炭酸ナトリウムを混合し、混合物を精錬することによって、耐火性部品に加工される。 $^{210}\text{Pb}$  と  $^{210}\text{Po}$  は揮発し、最終的には集煙システムで回収される [最大で  $^{210}\text{Pb}$  が  $200,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $^{210}\text{Po}$  が  $600,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (IAEA, 2006)]。

## A.8 金属製錬

(A14) 金属鉍石の原産地に大きく依存するが、高温で精錬と精製することにより、鉍石から  $^{210}\text{Pb}$  と  $^{210}\text{Po}$  が揮発するため、この工程では吸入によって、またその後、これらの放射性物質が凝集し、[最大  $200,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  まで (IAEA, 2006, 2013)] 濃縮することにより、多くの金属抽出は NORM による被ばくを引き起こす可能性がある。不揮発性放射性核種は、スラグに濃縮する ( $1,000$  以上  $10,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  未満) ことがある。このような被ばくは、スズ、銅、鉄、スチール、アルミニウム、ニオブ/タンタル、ビスマス等の製造において起こり得る。

## A.9 石炭の抽出・燃焼

(A15) 石炭をはじめ、ほとんどの化石燃料は、ウラン、トリウム、それらの壊変生成物、 $^{40}\text{K}$  を含む。放射能濃度は、一般的に高くなく、産地とその地質に依存する [数値の例は、UNSCEAR (2016) の 184 ページに示されている]。しかし、UNSCEAR は、石炭採掘による職業被ばくは 2002 ~ 2003 年の期間で  $2$  万  $3,000$  人 $\cdot\text{Sv}$  であり、中国の炭鉍労働者 (労働力の 90%) の年平均実効線量は  $2.75 \text{ mSv}/\text{年}$  と推定している。物量が多いため、これに伴う放射性

表 A.2 石炭灰およびスラグ中の放射性核種の放射能の範囲

	カリウム (Bq·kg <sup>-1</sup> )	トリウム系列 (Bq·kg <sup>-1</sup> )	ウラン系列 (Bq·kg <sup>-1</sup> )
重い燃焼灰 (スラグ)	240 ~ 1200	44 ~ 560	48 ~ 3900
飛灰 (回収)	260 ~ 1500	30 ~ 300	30 ~ 2000
飛灰 (漏洩)	260	100 ~ 160	20 ~ 5500

核種の量も顕著である。例えば、2014年には80億トン以上の石炭が採掘されており（ブリテッシュ・ペトロリアム社の世界エネルギー統計による）、ウラン4 ppm、トリウム10 ppmの低めの値で考えて、ウランは32,000トン、トリウムは80,000トンが、石炭の採掘に伴って採掘されていると考えられる。

(A16) 熱と電気の生成のために石炭燃料を燃焼させると、飛灰、より重い燃焼灰、スラグが発生する。燃焼灰とスラグの放射性核種の濃度は石炭よりも高い傾向があるが（約10倍）、一般に5,000 Bq·kg<sup>-1</sup>を超えない（IAEA, 2006）。各灰中の放射性核種濃度の範囲は表 A.2（UNSCEAR, 1982）に示されている。鉛とポロニウムのような揮発性物質は、大気中に放出されるか、現代の発電所では放出されず留められ、飛灰と燃焼装置の内面に蓄積することがある（堆積したスケール中に100,000 Bq·kg<sup>-1</sup>を超える<sup>210</sup>Po放射能濃度が報告されている）。排煙脱硫過程では、さらなるスラッジと石膏が発生する。石炭燃焼による残渣（灰、石膏）のセメントあるいはコンクリートへの使用は世界中で行われている。

## A.10 水処理

(A17) 地下水の処理は、塩と他の汚染物質を除去するために一般に行われる。フィルターやイオン交換樹脂などさまざまな方法が使用される。地下水中に存在する自然起源の放射性核種は、水処理による廃棄物（スラッジフィルター）に蓄積することがある。このような廃棄物の放射能濃度は一般に中程度だが、10,000 Bq·kg<sup>-1</sup>（IAEA, 2006）に達する可能性がある。

## A.11 建築材

(A18) 高いレベルの放射性核種、特に<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th、<sup>40</sup>Kを含む一部の建築材を使用すると、屋内の放射線レベルが高くなる可能性がある。建築材は、天然由来のものや、上記のような産業プロセスに由来する材料を含むものがある。一部の建築材における放射能濃度（Bq·kg<sup>-1</sup>）の値を表 A.3（UNSCEAR, 1982; IAEA, 2003）に示す。

(A19) 建築材における NORM の使用に関する放射能濃度ガイドラインは、欧州では、材

表 A.3 一部の建築材における放射能濃度 (Bq・kg<sup>-1</sup>) の例

建 築 材	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
コンクリート	1 ~ 250	1 ~ 190	5 ~ 1570
気泡コンクリート	11,000	1 ~ 220	180 ~ 1600
粘土レンガ	1 ~ 200	1 ~ 200	60 ~ 2000
砂石灰レンガおよび砂岩	18,000	11,000	5 ~ 700
天然石膏	<1 ~ 70	<1 ~ 100	7 ~ 280
花こう岩	100	80	1200
石灰質凝灰岩	130	120	1500
軽石	130	130	1100
セメント	7 ~ 180	7 ~ 240	24 ~ 850
タイル	30 ~ 200	20 ~ 200	160 ~ 1410
リン酸石膏	4 ~ 700	19,000	25 ~ 120
高炉スラグ碎石およびセメント	30 ~ 120	30 ~ 220	—

料中の <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K の放射能濃度を考慮し、放射能濃度の指標を用いて策定されている (EC, 1999b; EURATOM, 2013)。

## A.12 レガシーサイト

(A20) 世界では、また、過去の施設からの残渣を含むサイトがいくつかある。これらのサイトの大部分は、過去の NORM を伴う産業による自然放射性核種で汚染されている。いくつかのケースでは、これらのサイトが確認され、修復に成功している。しかし、過去の NORM を伴う産業により汚染されたサイトのかなりの数がまだ特定されていないことは確実である。

(A21) NORM を伴う産業は、放射能濃度に大きなばらつきを持つさまざまな原材料を加工し、放射能濃度にさらに大きなばらつきのあるさまざまな生産物、副産物、廃棄物を生み出す。これらの産業が懸念の対象となるかどうかは、扱う原材料中の放射能濃度、採用される工程、最終製品の用途、残渣の再使用と再生利用、廃棄物の処分に依存する。

## A.13 参考文献

- EC, 1999a. Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces where Materials are Processed which Contain Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides. Radiation Protection 107. European Commission, Brussels.
- EC, 1999b. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Brussels.
- EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Off. J. Eur. Union. OJ L 13, 17.1.2014, p. 1–73.
- IAEA, 2003. Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. Technical Reports Series No. 419. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2006. Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Works Involving Minerals and Raw Materials. Safety Reports Series No. 49. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2011. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Production of Rare Earths from Thorium Containing Minerals. Safety Reports Series No. 68. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2012. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Titanium Dioxide and Related Industries. Safety Reports Series No. 76. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2013. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. Safety Reports Series No. 78. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Rowan, E.L., Engle, M.A., Kirby, C.S., Kraemer, T.F., 2011. Radium Content of Oil- and Gas-field Produced Waters in the Northern Appalachian Basin (USA). Summary and Discussion of Data. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011–5135. US Geological Survey, Reston, VA. Available at: <https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5135/> (last accessed 7 December 2023).
- UNSCEAR, 1982. Report to the General Assembly, Annexe C. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2016. Report to the General Assembly, Annexe B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.





## 謝 辞

2007年10月にベルリン（ドイツ）で開催された会議において、ICRPの主委員会は、NORMレベルの高い物質の加工、製造、使用、処分に関連する幅広い活動を対象とする勧告を策定するために、第4専門委員会に報告するタスクグループ76の設立を承認した。また、被ばく状況のタイプ、被ばくのカテゴリー、NORM管理に適用される基本原則に関する課題も本刊行物により明確になるであろう。

ICRPは、本刊行物の作成に携わったすべての人々の、長年にわたる多大な努力と献身に感謝する。

タスクグループ76メンバー（2010～2013年）は以下のとおりであった。

P. Burns（委員長）	M. Markkanen	Å. Wiklund*
A. Canoba	S. Romanov	D. Wymer*
A. Liland	L. Setlow	
G. Lorient		
*通信メンバー		

タスクグループ76メンバー（2013～2019年）は以下のとおりであった。

J-F. Lecomte（委員長）	F. Liu	P.P. Haridasan（～2015年）*
D. da Costa Lauria	M. Markkanen	H.B. Okyar（～2017年）*
P. Egidi	P. Shaw（～2017年）	S. Mundigl*
A. Liland		
*通信メンバー		

第4専門委員会の査読者は以下のとおりであった。

A. Canoba	T. Pather（2013～2017年）	G. Hirth（2017～2021年）
-----------	-----------------------	----------------------

主委員会の査読者は以下のとおりであった。

C-M. Larsson	S. Romanov
--------------	------------

論説メンバーは以下のとおりであった。

C.H. Clement（科学秘書官，*Annals of the ICRP* 編集長）  
 H. Fujita（科学秘書官補佐，*Annals of the ICRP* 共同編集者）（2018年～）  
 H. Ogino（科学秘書官補佐，*Annals of the ICRP* 共同編集者）（2016～2018年）

本刊行物の準備期間における第4専門委員会メンバーは以下のとおりであった。

(2009 ~ 2013 年)

J. Lochard (委員長)	T. Homma	A. McGarry
W. Weiss (副委員長)	M. Kai	K. Mrabit
J-F. Lecomte (書記)	H. Liu	S. Shinkarev
P. Burns	S. Liu	J. Simmonds
P. Carboneras	S. Magnusson	A. Tsela
D.A. Cool	G. Massera	W. Zeller

(2013 ~ 2017 年)

D.A. Cool (委員長)	M. Doruff	A. Nisbet
K-W. Cho (副委員長)	E. Gallego	D. Oughton
J-F. Lecomte (書記)	T. Homma	T. Pather
F. Bochud	M. Kai	S. Shinkarev
M. Boyd	S. Liu	J. Takala
A. Canoba	A. McGarry	

(2017 ~ 2021 年)

D.A. Cool (委員長)	A. Canoba	Y. Mao
K.A. Higley (副委員長)	D. Copplesstone	N. Martinez
J-F. Lecomte (書記)	E. Gallego	A. Nisbet
N. Ban	G. Hirth	T. Schneider
F. Bochud	T. Homma	S. Shinkarev
M. Boyd	C. Koch	J. Takala

本刊行物承認時の主委員会メンバーは以下のとおりであった。

委員長：C. Cousins (英)

副委員長：J. Lochard (仏)

科学秘書官：C.H. Clement (加)；sci.sec@icrp.org\*

K.E. Applegate (米)	S. Bouffler (英)	K.W. Cho (韓)
D.A. Cool (米)	J.D. Harrison (英)	M. Kai (日)
C-M. Larsson (豪)	D. Laurier (仏)	S. Liu (中)
S. Romanov (露)	W. Rühm (独)	

名誉メンバー

R.H. Clarke (英)	F.A. Mettler Jr (米)	R.J. Pentreath (英)
R.J. Preston (米)	C. Streffer (独)	E. Vañó (西)

\* 科学秘書官は、1988年以降正式なメンバーではないが、主委員会に欠くことのできない役割である。

ICRP とタスクグループ 76 のメンバーは、S. Andresz (CEPN) に、タスクグループの秘書としての実りある科学的支援に感謝するとともに、L. Matta, J. Popic, B. Wang には、ICRP の意見募集プロセスを通じた本刊行物への役立つ貢献に感謝する。

最後に、意見募集プロセスにおいて本刊行物草案にコメントを提供するため時間を割いていただいたすべての組織と個人に対して感謝する。



ICRP Publication 142

産業プロセスにおける自然起源放射性物質（NORM）に対する放射線防護

---

2024年2月29日 初版第1刷発行

監修 本間 俊充

翻訳 岩岡 和輝

編集 ICRP 刊行物翻訳委員会

発行 原子力規制委員会

連絡先 〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9

六本木ファーストビル16F

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

放射線・廃棄物研究部門

電話 03-5114-2225（部門代表）

翻訳公開URL [https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku\\_04.html](https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html)

© Nuclear Regulation Authority, Japan, 2024

Printed in Japan

---

DTP 株式会社フォレスト

【非売品】



# ICRP

*Publication 142*