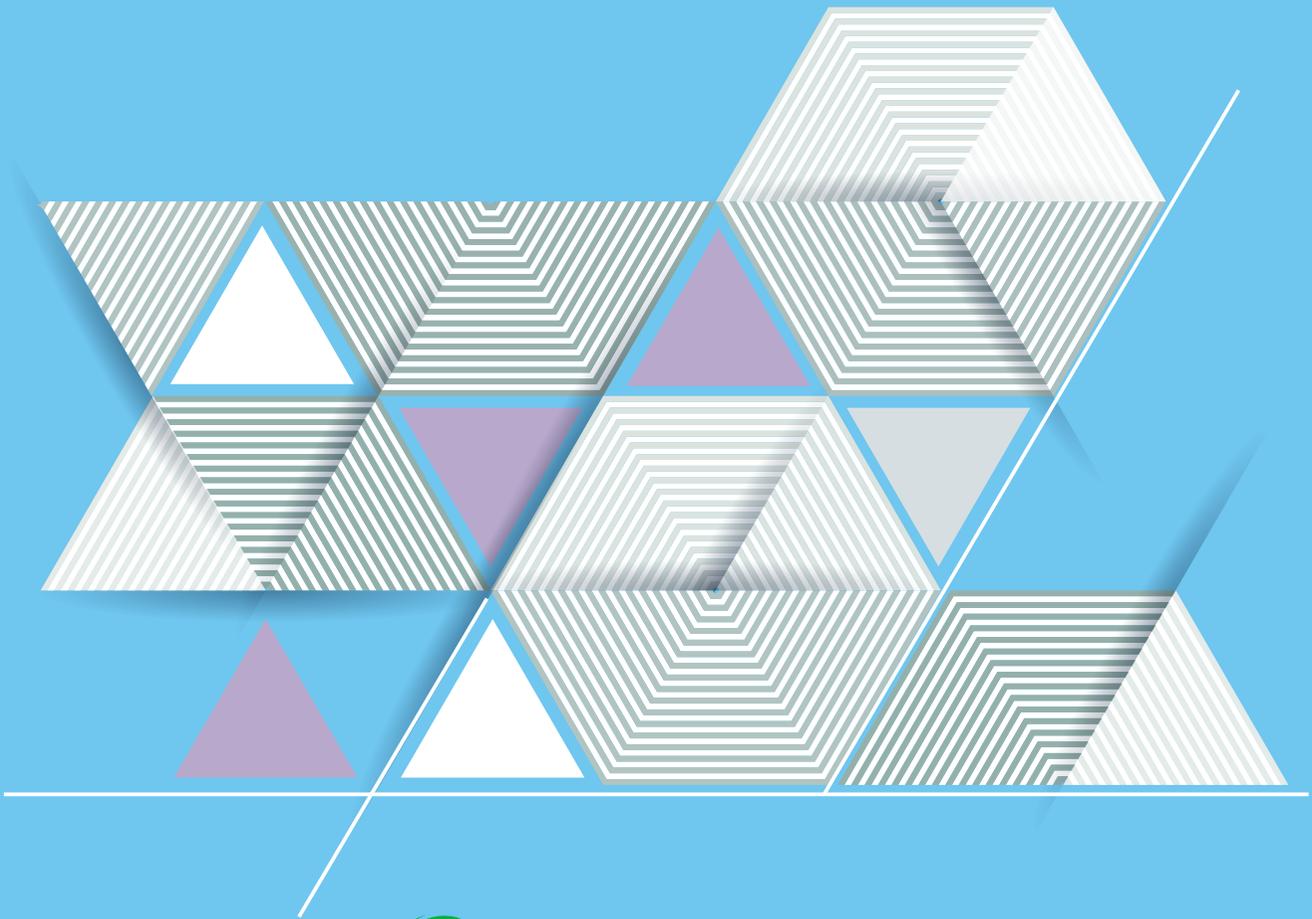


ICRP

Publication 126

ラドン被ばくに対する 放射線防護



ラドン被ばくに対する 放射線防護

2014年4月 主委員会により承認

ICRP

Publication 126

Radiological Protection against Radon Exposure

Editor-in-Chief

C. H. CLEMENT

Associate Editor

N. HAMADA

Authors on behalf of ICRP

J-F. LECOMTE, S. SOLOMON, J. TAKALA, T. JUNG, P. STRAND, C. MURITH,
S. KISELEV, W. ZHUO, F. SHANNOUN, A. JANSSENS

Copyright © 2021 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 © 2014 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 126
Radiological Protection against Radon Exposure

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Toshimitsu HOMMA

Translated by

Michikuni SHIMO

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

Yasuhito SASAKI*

Michiaki KAI²⁾ (Vice-chair)

Kazuko OHNO¹⁾

Isao KAWAGUCHI

Sachiko SAKODA²⁾

Hiroshi YASUDA

◆ Supervisors ◆

Michiaki KAI (ICRP, MC)

Kotaro OZASA (ICRP, C1)

Kazuo SAKAI* (ICRP, C1)

Makoto HOSONO (ICRP, C3)

Hiroko YOSHIDA (ICRP, C4)³⁾

Norio SAITO (ICRU)

Ohtsura NIWA* (ICRP, MC)

Yoshiya SHIMADA (ICRP, C1)³⁾

Tatsuhiko SATO (ICRP, C2)

Yoshiharu YONEKURA* (ICRP, C3)

Toshimitsu HOMMA* (ICRP, C4)

* Former ICRP member.

¹⁾ From October 2018, ²⁾ From June 2021, ³⁾ From September 2021.

邦訳版への序

本書は、ICRPの主委員会で2014年4月に承認され2014年11月に刊行された、ラドン被ばくに対する放射線防護についての報告書

Radiological Protection against Radon Exposure
(Publication 126. *Annals of the ICRP*, Vol.43, No.3 (2014))

をICRPの承諾のもとに翻訳したものである。

本書の翻訳は、元 藤田保健衛生大学（現 藤田医科大学）教授の下道國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いて、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。

ラドン-222 およびラドン-220（別名トロン）の吸入による実効線量が0.48 mSv/年と低い日本の読者にとって、ラドンに対する放射線防護と云われてもその重要性は理解できないかもしれない。従来、ラドン被ばくは、鉱山などでの職業被ばくと考えられてきた。しかし多くの国で、ラドンは公衆被ばくの主要な被ばく源となっており、ラドン高濃度地域においては、年間10 mSvを超す被ばくも珍しくない。2000年代初頭に大規模な屋内ラドン被ばくと肺がんの症例対照研究が複数実施された。これらの研究は、ラドン被ばく量が中等度から軽度の集団の疫学調査であり、鉱山労働者などラドン高濃度被ばく集団の疫学研究で得られていたラドンのリスク（デトリメント）係数を見直す契機となった。すなわち α 線被ばくにおける逆線量率効果が疫学的に実証されたのである。これを受けて、ICRPはその*Publication 115* (2010) および同添付文書『ラドンに関するICRP声明』の中で、ラドンとその子孫核種の肺がんリスク係数を従来の約2倍の値に変更している。WHOによれば肺がんの3～14%は一般家屋内でのラドン被ばくが原因とされ、ラドンは喫煙に次ぐ2番目の肺がんリスク因子と認定されている。

ラドン被ばくは、管理に関する決定をしなければならない時点で被ばく線源が存在している現存被ばくの代表例である。現存被ばく状況の放射線防護のために、ICRPは参

考レベルを使った最適化プロセスや統合的アプローチ、グレーデッドアプローチを提唱している。まさに、ラドン対策はICRPが提唱している現存被ばく状況の放射線防護のテストケースである。日本にとってラドン対策は重要ではないものの、本報告書で議論されているさまざまな現存被ばく状況の放射線防護の論点は、東京電力福島第一原子力発電所を経験し、現に現存被ばく状況と向き合っている私たちにとって、大いに参考になると思われる。

ICRPは、ラドン被ばくを緩和・低減する防護対策の最適化プロセスのため、線量および濃度の参考レベルとして10 mSv/年および300 Bq・m⁻³という値を提唱している。それぞれの国は、それぞれの国の事情に応じて線量の参考レベルおよびラドン濃度の誘導参考レベルを独自に設定し、被ばくの最適化プロセスを進めていくことになる。ラドンは至る所に存在しているので、自宅はもとより職場やデパートや学校などの公共の建物でも被ばくが起きる。職種によっては、ラドンは公衆被ばくと職業被ばくの両方の被ばく源となる。滞在時間の長い個人宅での被ばく緩和策が最も重要であるが、自宅なら自分の責任で対策をとれても、賃貸の場合には緩和対策の責任は大家にあり、職場や公共施設での被ばくに関してはそれぞれ責任の所在が異なる。また、屋内ラドン被ばくの低減策には、屋内ラドンの測定キャンペーン、ラドン濃度の高い室内での滞在時間制限といった対策から、ラドンガス侵入経路に対するさまざまな工学的な緩和策（土壌や床下の防護対策や屋内への侵入経路遮断や屋内換気率の改善など）、さらには長期的には建築基準法で屋内空気質の基準を改定する際に空気質にラドン濃度の基準を加えるなどの政策的なアプローチも有効と考えられている。関連した文献として、「WHO 屋内ラドンハンドブックー公衆衛生の観点からー」が2009年に出版されており、量子科学技術研究開発機構のホームページに翻訳版が公開されている（<https://www.qst.go.jp/soshiki/1031/41575.html>）。興味のある方はこちらも読まれる事をお勧めする。

翻訳の進行と編集を担当した事務局の原子力安全研究協会（～令和元年度）および日本エヌ・ユー・エス株式会社のスタッフ、とりわけ迫田幸子さん*には大変お世話になった。ICRP出版物の訳語の一貫性や理系の研究者だけでは気がつかない言葉遣いの検討など、事務局の努力なしでは、完成度の高い翻訳版はできなかつたであろう。この紙面を借りて、ICRP刊行物翻訳委員会を代表して全ての事務局スタッフにお礼を申し上げます。

*令和3年度より当委員会委員

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.nsr.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。

令和 3 年 12 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 (国際医療福祉大学クリニック)
副委員長 甲斐 倫明²⁾ (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¹⁾ (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 ((国研)日本原子力研究開発機構)
迫田 幸子²⁾ ((公社)日本アイソトープ協会)
佐々木康人 (湘南鎌倉総合病院附属臨床研究センター)
保田 浩志 (広島大学原爆放射線医科学研究所)

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, (公財)放射線影響研究所)
島田 義也³⁾ (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)
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³⁾ (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 (ICRU 委員, (国研)産業技術総合研究所)

¹⁾ 2018 年 10 月から, ²⁾ 2021 年 6 月から, ³⁾ 2021 年 9 月から

抄 録

この報告書で、委員会は、ラドン被ばくに対する放射線防護に関する最新のガイダンスを示す。この報告書は、放射線防護体系に関する ICRP の勧告、ラドンのリスクに関して利用できるすべての科学知識、そしてラドン被ばくの制御に関してさまざまな組織や国が得た経験を考慮して作成されたものである。この報告書は、ラドンの線源と移動メカニズム、関連する健康リスク、そしてラドン被ばくを管理する際の課題を扱って、ラドン被ばくの特徴を説明している。委員会は、建物の用途に関係なく、ラドン被ばくが発生している建物や場所の管理にできる限り沿いつつ、統合的なアプローチでラドン被ばくを制御することを勧告している。このアプローチは、最適化の原則に基づいたものであり、特に職場における主なステークホルダーの責任とラドン被ばくを制御する国当局の意図を反映したグレーデッドアプローチ*になっている。報告書には、作業者の被ばくが職業被ばくと考えられる場合のラドン被ばくの管理に関する勧告も記載されているので、適切な委員会の要求事項が適用されるべきである。

キーワード：ラドン被ばく， 予防， 緩和， 住宅， 建物， 職場

*訳注 リスクレベル等に応じたアプローチまたは取り組みのことを指す。

目 次

	頁	(項)
抄 録	vii	
招待論説	xi	
論 説	xv	
序 文	xvii	
総 括	xix	
要 点	xxv	
用語解説	xxvii	
1. 序 論	1	(1)
1.1 背 景	1	(1)
1.2 適用範囲	2	(6)
1.3 構 成	4	(9)
2. ラドン被ばくの特徴	5	(12)
2.1 歴史的背景	5	(12)
2.2 ラドンの線源と移動	5	(18)
2.3 ラドンのリスク	8	(28)
2.3.1 疫学的証拠	8	(29)
2.3.2 線量評価アプローチ	10	(32)
2.4 ラドン被ばくの管理に関する課題	11	(37)
2.4.1 公衆衛生に関する考慮事項	11	(38)
2.4.2 ステークホルダーの責任	12	(46)
3. ラドン被ばくに対する ICRP の放射線防護体系	15	(50)
3.1 被ばく状況と被ばくのカテゴリー	15	(52)
3.1.1 被ばく状況の分類	15	(52)
3.1.2 被ばくのカテゴリー	16	(57)
3.2 防護戦略の正当化	17	(63)
3.3 防護の最適化	18	(67)

x 目 次

3.3.1	参考レベル	19	(69)
3.3.2	ラドンの誘導参考レベル	20	(75)
3.3.3	最適化プロセス	21	(78)
3.3.4	国の誘導参考レベル	22	(83)
3.3.5	グレーデッドアプローチ	24	(87)
3.4	線量限度の適用	26	(99)
3.5	要 約	26	(100)
4.	防護戦略の実施	29	(101)
4.1	国の行動計画	29	(101)
4.2	予 防	31	(114)
4.2.1	地方と地域の土地利用計画	31	(115)
4.2.2	建築法規と建築基準	32	(118)
4.3	緩和措置	32	(120)
4.3.1	ラドンの測定手法と測定手順	32	(121)
4.3.2	さまざまな状況においてラドン被ばくを緩和する方法と その方法の適用性	33	(124)
4.4	建築材	34	(129)
4.5	作業者の防護	34	(130)
4.6	ウラン採掘産業におけるラドンに対する作業者の防護	35	(133)
4.7	ステークホルダー間の連携	36	(137)
5.	結 論	39	(141)
	参考文献		41

招待論説

ラ ド ン

放射性ガスのラドン（ラドン-222）は、至るところに存在する被ばく源であり、喫煙に次いで2番目の肺がんの原因と認識されている。ラドンはあらゆる建物や地下に存在しているが、地面の下の地質や建物の種類といった要因によって、そのレベルは場所によって大きく変動し得る。一部の作業者を含め、多くの人にとってラドンは放射線被ばくの主な原因物質である。

重要であるにもかかわらず、ラドンに対する防護が委員会の勧告のリストに組み込まれたのは比較的遅かった。このことは、これまで、原子力や医療における放射線利用など、明らかに人工の被ばく源に対する防護に重点を置いていたことに一因があるかもしれない。

委員会の1990年勧告（ICRP, 1991）の刊行で、1991年に大きな前進が見られた。この勧告は、住宅や職場における自然放射線源に対する防護の必要性に注目することを知らしめたのである。委員会はこのテーマを追及し、*Publication 65*（ICRP, 1993）において、自宅や職場におけるラドン-222に対する防護に関する勧告を公布した。この刊行物は、ラドンに対する防護についていくつかの重要な戦略を策定した。それは、防護資源を有効に利用するためにラドン高濃度地域*を明確にすることや、改善策の必要性を決定する際に役立つ可能性があるラドンガスの測定レベルの判断基準を使用するといったことを含んでいる。住宅への介入では、3～10 mSvの範囲の年実効線量に相当する測定レベルが勧告されている。しかし、職場の防護については、住宅の防護と切り離して検討されている。興味深いことに、ラドンは内部被ばくの原因であるにもかかわらず、委員会は、ラドン被ばくの評価や制御のために、ヒトの呼吸気道の線量評価モデルの使用を勧告しなかった。その代わりに、単位実効線量当たりの損害（デトリメント）と単位被ばく当たりの損害を直接比較すること（線量換算規約）によって、ラドン被ばくは実効線量への換算が行われたのである。

2007年、委員会は、放射線防護体系に関する勧告（ICRP, 2007）を新たに公布した。この勧告は、1990年勧告（ICRP, 1991）から進展していて、規模や発生源に関係なく、あらゆる線源から発せられる電離放射線によるすべての被ばくに適用される防護体系を定めている。強調した点は、防護の最適化原則の適用であった。また、2007年勧告（ICRP, 2007）は、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況、現存被ばく状況を区別している。ほとんどのラドン被ばくは、管理

*訳注 ラドン濃度の高くなりがちな地域

に関する決定をしなければならぬ時点で被ばく線源が存在しているので、現存被ばく状況である。防護は参考レベルと最適化を適用することによって達成される。

2010年、*Publication 115*において、ラドンとその子孫核種による被ばくに伴う肺がんリスクの推定値が更新された（ICRP, 2010）。それは、ラドン被ばくについて損害（デトリメント）で調整された名目リスク係数を、以前に推量されていた係数のおよそ2倍にすべきであるという重大な結論であった。この報告書には、『ラドンに関するICRP声明』が添付されていて、多くの項目が取り上げられているが、肺がんのリスクに関する新しい知見を考慮して、ラドンの参考レベルの上限値が改訂されている。また、線量評価モデルを用いて算出したラドンの線量係数を示すという委員会の意図も述べられている。

このころには、特にラドンに対する防護を対象に肺がんのリスクに関する報告書を考慮して、2007年の防護原則の詳細を決定することを目的とした第4専門委員会のタスクグループが設立されていた。そのタスクグループの報告書が、*Annals of the ICRP*の本号で刊行された。この報告書は、ラドンに対する防護に関する委員会勧告の進展の新たな段階を示すものである。また、住宅、職場や他の種類の場所において、ラドン被ばくから公衆の構成員や作業者を防護することを目的とした2007年防護体系の適用について説明し、その内容を明らかにしている。以前の勧告から進展したこの報告書では、建設目的や居住者の状況にかかわらず、すべての建物を対象としたラドン被ばくに対する防護に関して、統合的なアプローチを勧告している。ラドン被ばくの管理は、主に参考レベルによる最適化を基盤としたものである。実効線量で表した、およそ10 mSv/年という参考レベルの数値は過去の勧告と整合性があり、委員会は今後もこの数値を勧告していく。自然放射能のレベルの高い職場において被ばく管理を行う場合、その基礎には特殊な問題が伴う。この報告書では、はじめに、その他の建物や場所で使われているのと同じ誘導参考レベルを使用して、職場に対してグレーデッドアプローチを適用することを勧告している。もし、あらゆる妥当な取り組みを行ったにもかかわらず、被ばくが参考レベルを超えた状態が続く場合には、職業被ばくの防護体系の関連する要件を適用すべきである。

最適化の原則が中心的な役割を担い、すべての線源や状況に適用できる一貫した防護体系を開発する上で、この報告書は大きな一歩となるものである。この報告書に示されている全般的な防護戦略は、自然バックグラウンド放射線が高いレベルでの被ばく状況という別の状況に対応するモデルとして適応できるし、また実際にそのようなモデルとして適応すべきである。

委員会は、ラドンに対する完全な防護体系を実現するために、さらに進んだ研究に取り組んでいる。具体的には、さまざまな状況に適用できるラドンの線量係数を近々公表する。

前 ICRP 主委員会委員
JOHN R. COOPER

参考文献

- 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, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, *Ann. ICRP* **40**(1).

論 説

Annals of the ICRP への新しい共同編集者の歓迎

2012年1月、国際放射線防護委員会（ICRP）は、われわれにとって初めての科学秘書官補佐となる佐々木道也博士を迎え入れた。佐々木博士は費用負担のない専門家として、ちょうど2年間カナダ・オタワのICRP事務局に加わった。その間、*Publication 120*（ICRP, 2013）から*Publication 125*（ICRP, 2014）まで、*Annals of the ICRP*の共同編集者を務めた。また、その他さまざまな形で、ICRP事務局や委員会全体の仕事の改善にも貢献した。

佐々木博士を委員会に費用負担のない形で派遣するという、委員会と電力中央研究所（CRIEPI）との取り決めが成立したのは2011年3月以前であったが、当然ながら、福島県で発生した事象によって佐々木博士のオタワ着任は相当遅くなった。それでも、福島第一原子力発電所で事故が発生した時点およびその後発生した事象に関して、委員会や放射線防護に関心を抱いているすべての組織が大きな関心を持っていたことを考えると、過去2年間、広い人脈を持った日本の科学秘書官補佐を迎えることができたのはきわめて幸運であった。ICRPの関与がきわめて重要になっていたときに、佐々木博士は、委員会が日本の国民、専門家、政府機関、非営利組織などと効果的な連携が叶うように、中心的な役割を果たした。

委員会における佐々木博士の任期が終わるのは残念であったが、ICRP事務局への参加希望者の国際公募が終わったあと、CRIEPIは再度、費用負担のない専門家をICRP事務局に派遣することに同意した。2014年3月、浜田信行博士は、まず、遠く離れた東京の研究所から委員会との共同作業を開始し、その後2014年5月からカナダ・オタワのICRP事務局に着任した。

浜田博士は茨城県立医療大学で学士号を、長崎大学で修士号と博士号を取得した。彼は、放射線医学総合研究所および東北大学加齢医学研究所で博士研究員を務め、群馬大学で准教授を務めた。2010年、研究者として、CRIEPIの放射線安全研究センターの一員となり、15年以上にわたって、非標的効果、重イオン効果、ヒト水晶体上皮細胞の初代培養株を用いた反応に関する研究など、放射線生物学に関する研究を中心に行ってきた。論文審査のある国際的な専門誌に約80の論文を著者あるいは共著者として発表しており、米国放射線影響学会の2013年マイケルフライ賞や日本放射線影響学会の各種の賞など、有名な賞を多数受賞している。

われわれは、浜田博士を科学秘書官補佐として、そして *Annals of the ICRP* の共同編集者として、ICRP に喜んで迎え入れるものである。

ICRP 科学秘書官
編集長
CHRISTOPHER H. CLEMENT

参考文献

- ICRP, 2013. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. *Ann. ICRP* **42**(1).
ICRP, 2014. Radiological protection in security screening. ICRP Publication 125. *Ann. ICRP* **43**(2).

序 文

2009年11月のポルトガルのポルトにおける会合で、ICRPの主委員会は、ラドン被ばくに対する放射線防護に関するガイダンスを策定するために、第4専門委員会に対して報告する新しいタスクグループの設立を承認した。

このタスクグループへの委任事項は、住宅、職場や他の種類の場所でのラドン被ばくに対する防護を目的とした委員会の2007年勧告の適用について説明し、その内容を明確にすることであった。この刊行物では、この現存被ばく状況の特徴を示し、ラドン被ばくを計画被ばく状況と見なすべきケースについて論じるべきである。また、該当する個々の線量制限や、国の対策計画に基づくラドンリスクの管理方法だけでなく、放射線防護原則の適用に関するガイダンスも示すべきである。

この刊行物は、ICRPの過去の関連する刊行物に基づいて作成されるべきである。たとえば、家庭と職場におけるラドン-222に対する防護に関する *Publication 65* (ICRP, 1993)、放射線防護の最適化に関する *Publication 101, Part 2* (ICRP, 2006b)、ICRPの最新の全般的な勧告を示している *Publication 103* (ICRP, 2007)、およびラドンと子孫核種による肺がんのリスクに関する *Publication 115* (ICRP, 2010) といった刊行物である。*Publication 115* は、ラドン被ばくの制御に関してさまざまな組織や国が得た経験だけでなく、2009年11月に採択されたラドンに関する委員会の声明も記載されている。

タスクグループのメンバーは以下のとおりであった。

J-F. Lecomte (委員長)	T. Jung	C. Murith
J. Takala	S. Solomon	S. Kiselev
P. Strand	W. Zhuo	

通信メンバーは以下のとおりであった。

R. Czarwinski (2009 ~ 2012)	A. Janssens	B. Long
S. Niu	F. Shannoun	T. Colgan (2012 ~ 2013)

第4専門委員会の査読者は以下のとおりであった。

J. Simmonds	W. Zeller	S. Liu
-------------	-----------	--------

主委員会の査読者は以下のとおりであった。

J. Cooper (2009 ~ 2012)	A. Gonzalez (2009 ~ 2012)
J. Harrison (2013)	E. Vañó (2013)

また、タスクグループの秘書を務める Céline Bataille と Sylvain Andrezs からは有益な科学的支援を受けた。また、André Poffijn, Ludovic Vaillant, フランスのミラーグループ、イングランド公衆衛生庁の専門家数人から、そして ICRP のコンサルティングプロセスを通じて多くの有用な意見もいただいた。タスクグループは、会合の開催中に提供していただいた施設やサポートに対して、フランス原子力防護評価研究所 (Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucleaire:CEPN) への感謝と同時に、協力いただいたすべての方々へ感謝の意を表す。また、最初の科学秘書官補佐を務めた佐々木道也博士の貢献にも謝意を表す。

タスクグループの作業は、主に通信によって行い、フランスのフォントネ・オ・ローゼの CEPN で、2010 年 4 月 28～30 日と 2010 年 9 月 19～21 日、2 回会合を開いた。

この報告書の作成期間における第 4 専門委員会のメンバーは以下のとおりであった。

(2009～2013 年)

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

(2013～2017 年)

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

総 括

(a) 本報告書の目的は、住宅、職場と他の種類の場所におけるラドン被ばくに対して、公衆の構成員と作業者を防護するための委員会の体系の適用を説明し、明らかにすることである。

(b) ラドンには2つの主要な同位体がある。ラドン-222は、地殻内部に幅広い濃度で存在しているラジウム-226の放射性壊変生成物である。ラドンは気体であるため、土壌から屋内に移動することができる。この移動は土壌の種類、建物、場所などのさまざまな要因に依存している。ラドン-220は、トリウム-232壊変系列に属するラジウム-224の放射性壊変生成物であり、トリウム-232壊変系列も地殻内部に存在している。ラドン-222とラドン-220は、また、建築材から屋内大気に放出される。屋内ラドン濃度は建物によって数桁異なる場合がある。この報告書の焦点はラドン-222である。

(c) ラドンは吸入されるが、不活性ガスであるため、吸入されたほとんどすべてがその後吐き出される。しかし、吸入されたラドン短寿命子孫核種のエアロゾルは呼吸気道内に沈着する可能性がある。空気中の壊変生成物は、エアロゾルの拡散特性に応じて、鼻腔、気管支の壁面、肺の深部に沈着する。これらの短寿命子孫核種の2つ、すなわちポロニウム-218とポロニウム-214は α 粒子を放出し、この α 粒子によって与えられたエネルギーが、健康への影響につながる可能性がある放射線被ばくの最大の要因である。

(d) 委員会は *Publication 115* (ICRP, 2010) で、肺がんとラドン被ばくとの関連性に関する疫学的研究 (ICRP, 2010) のレビューと分析をした。地下鉱山と家庭の両方で、ラドンとその子孫核種が肺がんの原因になることを示す強力な証拠がある。その結果として、委員会は放射線防護を目的に、非喫煙者と喫煙者が混在した成人集団において、ラドン子孫核種と平衡状態にあるラドン-222ガスへの被ばくについて $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 当たり 8×10^{-10} [$5 \times 10^{-4}/\text{WLM}$] の損害 (デトリメント) で調整された肺がんの名目リスク係数を勧告した。これは、*Publication 65* (ICRP, 1993) で委員会が使用した数値のおよそ2倍である。肺がん以外の他の固形がんと白血病については、これまでのところ、ラドンとその子孫核種への被ばくに関連した発生の増大の一貫した証拠は存在しない。

(e) 放射線防護体系の中では、ラドン被ばくは、その線源が地殻中に広く存在する始原的な自然放射能そのままの濃度であるので、現存被ばく状況の特徴を持つ (ICRP, 2007)。ビル建設や鉱山の操業といった人間活動が、ラドンとその子孫核種への被ばくを増大させる経路をつくるか、または経路を修正する可能性がある。これらの経路は予防対策と緩和対策によって

制御することができる。しかし、線源そのものを修正することはできず、すでに線源が存在している状況で、制御の決定を下さなければならない。ただし、一部の職場では、ラドン被ばくの状態が最初から計画被ばく状況であると、国当局が見なす場合もある。このような職場としては、核燃料サイクルに関係するウラン鉱山などが含まれる。

(f) ある場所できわめて高濃度のラドンが検知され、ただちに防護対策を実施する必要性が生じることもあるが、ラドンが緊急時被ばく状況を引き起こすことはありそうにない。

(g) *Publication 60* (ICRP, 1991) と比べて、*Publication 103* (ICRP, 2007) の考え方は、あらゆる種類の被ばく状況の管理に一貫したアプローチを勧告することにある。このアプローチは、適切な個人の線量制限、つまり線量拘束値または参考レベルを用いて実施する最適化の原則の適用に基づいている。最適化には、最初の被ばくレベルに関係なく、線量を拘束値または参考レベル未満に合理的で達成できる限り低減する努力が含まれる。

(h) 自宅や職場での日々の生活は、ある程度のラドン被ばくに至る。他の多くの現存被ばく状況と同様に、ラドン被ばくは非常に不均一である。被ばくのレベルは、個人の行動に大きく依存する。したがって、自助防護対策の役割がきわめて重要である。被ばく状況の把握は、その制御の前提条件である。国内におけるラドン被ばくの管理は、幅広いステークホルダーが関与する多くの問題（たとえば、環境、健康、経済、建築、そして教育の問題）に対処しなければならない。

(i) 屋内ラドン被ばくの制御には多くの課題がある。個人は同じエリア内を行き来するので、ラドン防護戦略は国の当局が策定し、さまざまな場所において一貫した統合的な方法で実施しなければならない。多くのラドン被ばくは家庭で発生するので、ラドン防護戦略では、公衆衛生の観点から住宅における被ばくに対処すべきである。多くの建物において、ラドンのレベルが潜在的に健康リスクを代表するとされる濃度を大きく上回る可能性があるため、一般公衆全体の被ばくと最も高い個人被ばくを低減する取り組みが必要とされている。防護戦略は、単純明快で、他の健康上の危険と適切に調整され、長期にわたって支援と実施がなされ、そしてすべてのステークホルダーを関与させるべきである。

(j) 国のラドン防護戦略はまた、以下の観点、特に、住居者に対する個々の家屋所有者、買い手に対する建築業者または販売業者、入居者に対する家主、従業員に対する雇用主、そして総括的に言えば、使用者に対するあらゆる建物の責任者の負う責任、そのような責任の観点から課題に対処しなければならない。これらすべての要因がラドン戦略の実施の可能性に影響を及ぼす。

(k) この責任の範囲があるため、有効性と現実性に基づくラドン戦略が必要になる。ラドン防護戦略は、屋内のラドンを完全に除去することは不可能であることを念頭において、合理的に達成できる限り低いレベルにラドン濃度を維持するか、あるいはまた低減することを目指す

すべきである。

(1) 委員会は、ラドンがどこにも存在することから、国のラドン防護戦略は、ほとんどの状況において正当化されると考えている。また、ラドンは、喫煙に次いで2番目の肺がんの原因であるので、放射線被ばくの重大な線源であること、そして、ほとんどの環境で制御可能であると考えている。ラドン防護戦略は、たばこ規制や室内空気質といった他の公衆衛生政策に関してプラスの結果をもたらす可能性もある。公衆衛生の優先事項、社会的、経済的な要因について考慮するだけでなく、ラドン濃度の評価やラドン高濃度地域の特定を含め、状況を把握することは、国の当局がラドン防護戦略を構築し、実施するために必要である。ラドン被ばくで起きる肺がんの絶対リスクは、非喫煙者よりも喫煙者のほうが著しく高いが、ラドンに対する防護に関する委員会の勧告は、喫煙者と非喫煙者を区別しない。

(m) 被ばく状況を把握することは、最適化の原則の適用の前提条件である。この原則は、遍在する経済的・社会的状況を考慮に入れて合理的に達成できる限り低いレベルに被ばくを維持し、あるいは低減するために、ラドン被ばくを制御するための推進力となる。委員会は、他の放射線源の制御と同様に、防護の最適化と共に線源関連の個人線量制限の使用を勧告する。

(n) 他の線源と同様、国独自の線量の参考レベルと濃度の誘導参考レベルを設定し、国内で防護の最適化プロセスを適用することは、国の適切な当局の責任である。その目的は、一般公衆に対する全体的なリスクを低減することと、公平性を期するために、最も被ばくする個人の個人リスクを低減することの両方である。どちらのケースでもプロセスは主に個人の被ばくではなく建物を管理することによって実施され、屋内空気中のラドン濃度を合理的に達成できる限り国の参考レベルよりも低くすべきである。

(o) ラドン被ばくは、被ばく経路に対する対策によってのみ制御することができる。個人はその状況から便益を受け、線量を低減するために個人に支援が提供される。このような考慮の結果、適切な参考レベルは、現存被ばく状況に対して委員会が勧告している、1～20 mSvの範囲の年線量に一致すべきである（ICRP, 2007, 表5）。委員会は、*Publication 65*（ICRP, 1993）に示されているように、10 mSvのオーダーの値がラドン被ばくの参考レベルを設定する際のベンチマークでなければならないと考える。

(p) ラドン制御のほとんどの対策が建物に適用されるので、立方メートル当たりのベクレル（ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ）で表される測定可能な量である空气中濃度として、ラドンの誘導参考レベルを設定するのが適切である。委員会は、*Publication 103*（ICRP, 2007）で、誘導参考レベルの上限値として、家庭については $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を、職場については $1500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を勧告した。*Publication 115*（ICRP, 2010）におけるラドン疫学のレビューと、名目リスク係数の約2倍の引き上げに対応して、委員会は関連する『ラドンに関する声明』において、家庭の参考レベルの上限値を $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ に引き下げた。家庭における $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ のラドン濃度は、改訂後の

名目リスク係数に基づき、線量換算規約を使うと、およそ 10 mSv の年間線量に相当する (ICRP, 2010)。『ラドンに関する声明』では、職業上の放射線防護要件を適用するための導入ポイントとして、参考レベルの上限値 $1500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ に替えて $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ のレベルを参照している。

(q) 委員会は、その『ラドンに関する声明』の中で、ラドンとその子孫核種の摂取量を標準の体内動態モデルと線量評価モデルを用いて算出するための線量係数を公表するつもりであることも示した。新しい線量係数に基づく、 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ はより大きな年線量に相当するが、家庭における 1 ~ 20 mSv の範囲内にある。

(r) ラドン防護戦略の現実的な履行のために、委員会は、住宅におけるラドン-222 の誘導参考レベルの上限値として、 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を使用することを引き続き勧告する。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 ~ $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 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強く奨励する。これは、ICRP の『ラドンに関する声明』(ICRP, 2010) と世界保健機関 (WHO) の『屋内ラドンに関するハンドブック』(WHO, 2009) と一致している。誘導参考レベルへの遵守を評価する際には、測定値は、建物または場所におけるラドンの年平均濃度を代表値とすべきである。

(s) 単純化して、日常生活において同じエリア内を行き来する個人は、場所にかかわらず同じベースで防護されるべきであると考え、委員会は、公衆と作業者の双方が利用する複合用途ビルにおいては、 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ という同じ上限値を両者に使用することを勧告する。

(t) 委員会は、ここで、ラドン被ばくの制御にグレーデッドアプローチを適用するべきと勧告する。このアプローチでは、ラドン防護戦略は、関係する意志決定者が測定および必要な場合に改善策を行うなどの、自助防護策の推進を奨励することを目的としたプログラムから開始するべきである。このプロセスは、情報、助言、支援、そして必要であればもっと正式な要求に基づいて実施することができる。このようなさまざまな対策を行うことや実施の程度は、状況に対する法的な責任の程度、国のラドン防護戦略が望む程度に任されるべきである。

(u) 職場に対しては、職場の防護要件を適用するために、 $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の導入レベルに換えて、特定のグレーデッドアプローチを実施するべきである。作業員のラドン被ばくが職業被ばくではない (オフィスビルなど) と考えられる場合、最初の段階は、住宅に対して設定されている誘導参考レベルより合理的に達成できる限り低いレベルに、ラドン濃度を低減することである。通常、対応する年線量は住宅の年線量よりも低くなるが、それは職場で過ごす時間は家庭で過ごす時間よりもいつも短いからである。最初の段階で困難が発生した場合は、第二段階として、より現実的なアプローチ、すなわち、滞在時間のような被ばく状況の実際のパラメータと 10 mSv オーダーの年線量の参考レベルを用いて、防護の最適化を構成するアプローチを勧告する。

(v) 職場におけるラドン被ばくを低減するためのあらゆる合理的な取り組みにもかかわら

ず、被ばくのレベルが線量で表される参考レベルを継続して超える場合は、作業者は職業的に被ばくしていると見なされるべきである。このような場合、委員会は、職業被ばくに対する関連する要件の適用を勧告する（ICRP, 2007, 5.4.1 節）。

(w) 委員会はまた、作業者のラドン被ばくが最初から職業被ばくであると、国の当局が見なしているような職場では、同じ要件を適用することも勧告する。このような職場には、温泉や洞窟、他の地下の職場などが含まれるであろう。

(x) 作業者が、職業被ばくしていると見なされるか否かにかかわらず、その被ばくは、現存被ばく状況の範囲の上限値（20 mSv/年）よりも低く維持すべきである。国の当局が、ラドンの被ばく状況は計画被ばく状況として管理すべきと考える場合は、職業上の線量限度を適用しなければならない。

(y) 国のラドン防護戦略は、効果的であるためには長期的な視点で策定すべきである。一般公衆に対するラドンのリスクを大幅に低減するプロセスは、通常、数年ではなく数十年にわたる一貫した取り組みを必要とする。委員会は、物事を明確にするため、特に新築の建物においては、広く存在する状況下で合理的に達成できる限り低いレベルに被ばくを保つことを目的とした予防策と、既存の建物においては、合理的に達成できる限り低いレベルに被ばくを低減することを目的とした緩和策とを区別するべきと考える。

(z) したがって、ラドン防護戦略には、予防対策を盛り込まなければならない。屋内の場所、居合わせる個人の区分、被ばく状況の種類にかかわらず、建物の計画段階、設計段階および建築段階でラドン被ばくの課題について考えることによって、ラドン被ばくに対処することが可能である。予防対策は、土地利用計画と、新築の建物および既存の建物のリフォームの建築基準に基づいて実施される。これはまた、相乗効果を実現し、矛盾を回避するために、室内空気質や省エネルギーといった建物に関する他の戦略と一致した方法で、ラドン防護戦略を統合することを意味する。

(aa) 国のラドン防護戦略の緩和策の部分は、既存の建物と場所に対処する。このようなケースでは、そこに居合わせる個人の区分が何であれ、建物や場所とその使用状態の管理を通して、可能な限り被ばくの制御が確実になされるべきである。主な処置は測定であり、必要に応じて、被ばくを緩和するために是正対策も行う。

(bb) 国のラドン防護戦略は、当局によって策定された国のラドン行動計画に基づいて、関連するステークホルダーの関与の下で実施するべきである。そして、行動計画では、明確なインフラを有する枠組みを定め、優先順位と責任を決定し、国でラドンを扱う一連の手順を記載するべきである。被ばくの状態によって、被ばくしている人たちや、支援あるいは行動をとるべき人たちなど、ステークホルダーを明確にし、また、倫理的な問題、特に責任に関する問題に対処し、そして情報、ガイダンス、支援、持続可能な条件を提供するべきである。

(cc) 国の行動計画は、ラドン測定技術と手順、ラドン高濃度地域を特定することを目的としたラドン調査、ラドン被ばくを緩和する方法とさまざまな状況でのその適用性、情報、訓練およびステークホルダーの関与を含む支援の方針、そして有効性の評価についても対処するべきである。一般の人に開放されている建物や職場に関する問題も、法的な責任を反映した特定のグレーデッドアプローチに基づいて対処するべきである。国の行動計画は、誘導参考レベルの数値を含めて評価し、定期的にレビューするべきである。

要 点

- 人々は、家庭や職場、複合用途ビルでラドンに被ばくする。屋内のラドン濃度変動により、被ばく分布はきわめて不均一になる。屋外におけるラドン被ばくは、一般には問題でない。
- ラドンとその子孫核種への被ばくは、肺がんをもたらす可能性があるという強力な証拠がある。ラドン被ばくは、喫煙に次ぐ2番目の肺がんの原因である。
- ラドン被ばくは、その線源が地殻中でどこにでも広く存在する始原的な自然放射能であり、手を加えられていない濃度であるから現存被ばく状況である。制御できるのは被ばく経路だけである。
- 国の当局は、被ばく状況を把握し、国のラドン防護戦略を策定すべきである。ラドン被ばくの多くは家庭で発生するので、この戦略では公衆衛生の観点から住宅における被ばくに対処すべきであり、一般公衆全体の被ばくと最も高い個人被ばくを低減するための取り組みを行うべきである。
- 戦略は単純明快で現実的なものにするべきであり、すべての建物で一貫したものであるために統合し、状況や責任に応じてグレード別にして、そして、喫煙者と非喫煙者を区別するべきではない。省エネルギー、禁煙、室内空気質など、他の公衆衛生政策と併せて考えるべきである。
- ラドン防護戦略には、新築の建物における予防対策と、既存の建物における緩和対策を含むべきである。
- ラドン被ばくの管理は、主として、適切な参考レベルを用いた最適化原則の適用に基づく。そのレベルは、委員会が勧告している年線量1～20 mSvの範囲に対応するべきである。委員会は、年線量10 mSv オーダーという値は、ラドン被ばくの参考レベルを設定するためのベンチマークと考える。
- ラドン防護戦略を実際に実施するに当たっては、委員会が住宅について勧告している誘導参考レベルの上限値を、引き続き年平均濃度で300 Bq・m⁻³とする。他のすべての建物や職場に対しても同じ値を勧告する。
- 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、合理的に達成できる限り低く、国の誘導参考レベルを100～300 Bq・m⁻³の範囲内で設定することを、国の当局に対して強く奨励する。
- ほとんどの職場では、作業者のラドン被ばくは付随的なものであり、職業被ばくとは見なさ

れない。委員会は、職場における以下の手順による特定のグレーデッドアプローチを勧告する。

- (i) すべての建物と職場に共通の誘導参考レベルを使用して、防護を最適化する。
 - (ii) 滞在時間など、被ばく状況の実際のパラメータと、年線量 10 mSv の参考レベルを使用して、防護を最適化する。
 - (iii) すべての合理的な取り組みにもかかわらず、被ばくが参考レベルよりも高い場合は、職業被ばくの関連する要件を適用する。
- 始めから、作業者のラドン被ばくが職業被ばくであると、国の当局に見なされている職場では、職業被ばくの関連する要件が適用される。
 - ラドン被ばくの状況が、計画被ばく状況として管理されるべきであると国の当局が考える場合は、職業上の線量限度を適用するべきである。

用語解説

見出し語は五十音順で配列。
原著の配列順による見出し語訳は本項末尾を参照。

医療被ばく [Medical exposure]

患者が自らの医学または歯学の診断あるいは治療の一部として受ける被ばく；職業上被ばくする者以外の方が患者の支援や介助に自発的に役立つ間に承知して受ける被ばく；および、自らの被ばくを伴う生物医学的研究プログラムにおける志願者の被ばく。

グレーデッドアプローチ [Graded approach]

国の体系や安全体系などの制御体系にとって、適用される制御手段と条件の厳格さが、実行できる範囲に対して適したプロセスあるいは方法。制御不全の可能性とそれによって生じる結果、および制御不全に伴うリスクのレベルを考慮している。

計画被ばく状況 [Planned exposure situation]

計画被ばく状況は、線源の意図的な導入と操業を伴う状況である。計画被ばく状況は、発生が規定された被ばく（通常の線源）と、想定されていない被ばく（潜在被ばく）を生じる可能性がある。

現存被ばく状況 [Existing exposure situation]

制御に関する決定を行う必要がある時点で、すでに存在している線源により生じている状況。具体的には、自然バックグラウンド放射線、原子力事故あるいは放射線緊急状態が発生した後の長期的に汚染されている地域、そして委員会の勧告の範囲外で実施された過去の行為に起因する残留物などを指す。

公衆の構成員 [Member of the public]

職業被ばくでも医療被ばくでもない被ばくを受けるすべての個人。

公衆被ばく [Public exposure]

職業被ばくや医療被ばく以外で、公衆の構成員が放射線源から被る被ばく。

雇用主 [Employer]

相互に合意した関係により、彼または彼女の雇用において、作業員に対し、認知された責任、関与、および義務を負う、国の法律によって指定された組織、法人、共同企業体、企業、協会、信託機構、不動産業者、公共または民間機関、グループ、政治団体または行政団体、あるいは他の私人。自営業者は雇用主と作業員の両方である。

作業員 [Worker]

常勤，非常勤，臨時雇用に関係なく雇用主に雇われ，その職務に権利や義務が伴うことを認識している個人。

参考レベル [Reference level]

現存被ばく状況において，それを超えた被ばくの発生を認める計画は不適格と判断され，それ以下で防護の最適化が実施されるべき線量あるいはリスクのレベルを表す。参考レベルとして選ばれる値は，考慮している被ばくのその時点で遍在する状況に依存する。

自然起源放射性物質 [Naturally occurring radioactive material]

自然起源の放射性核種以外の放射性核種を相当量含有しない放射性物質。自然起源放射性核種の放射能濃度が何らかのプロセスによって変えられている物質は含まれる。

職業被ばく [Occupational exposure]

操業管理者に責任があることが当然と見なされ得る状況で，作業員が仕事に受けるあらゆる被ばく。

操業管理者 [Operating management]

組織の最高レベルにあつて，組織を指導，管理，評価する個人またはグループ。最高経営責任者（CEO），会長，社長，経営陣など，さまざまな名称が使われる。

被ばく経路 [Exposure pathway]

放射線や放射性核種がヒトに到達し，被ばくを引き起こす可能性がある経路

被ばくのカテゴリー [Categories of exposure]

委員会は，放射線被ばくを，医療被ばく，職業被ばく，公衆被ばくという3つのカテゴリーに区別している。

平衡係数 [Equilibrium factor]

平衡等価濃度のラドンガス濃度に対する比。言い換えれば，ラドン壊変生成物の実際の混合物におけるポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度の，放射平衡の時に適用される濃度に対する比。

平衡等価濃度 [Equilibrium equivalent concentration]

実際に存在している非平衡な混合物と同等なポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度を持つ，短寿命子孫核種と平衡状態にあるラドンガスの放射能濃度。

防護の最適化 [Optimisation of protection]

いかなるレベルの防護が，被ばくおよび潜在被ばくの確率と大きさを，経済的・社会的要因を考慮の上，合理的に達成できる限り低くできるかを定めるプロセス。

ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度 [Potential alpha energy concentration]

空気中の短寿命ラドン-222 またはラドン-220 の混合物において，ラドン-222 の子孫核種

から鉛-210に、あるいはラドン-220の子孫核種から鉛-208に完全に崩壊するまでに放出されるアルファ線のエネルギーとして表される、単位体積当たりの空気中の短寿命ラドン-222またはラドン-220子孫核種の濃度。ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度の国際単位は $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

誘導参考レベル [Derived reference level]

線量で設定される参考レベルに対応する、実用量または測定可能な量として表された数値。

ラドン高濃度地域 [Radon-prone area]

その国のほかのエリアと比較して、ラドン濃度が相当に高いことを示す調査結果に基づいて定められた地理的地域あるいは行政領域。

ラドン全国調査 [National radon survey]

国民のラドン被ばくを表すラドン濃度分布を決定するために行われる調査。

ラドン-220子孫核種 [Radon-220 progeny]

ラドン-220の壊変生成物のことで、ここではポロニウム-216からポロニウム-212またはタリウム-208に至る短寿命壊変生成物という、さらに限定された意味で用いられる。

ラドン-222子孫核種 [Radon-222 progeny]

ラドン-222の壊変生成物のことで、この報告書ではポロニウム-218からポロニウム-214に至る短寿命壊変生成物をいう、さらに限定的な意味で用いられる。ラドン子孫核種は「ラドン壊変生成物」とも呼ばれ、古くは「ラドン娘核種」とも呼ばれていた。

リスク [Risk]

リスクは、ある結果（たとえば肺がん）が起こる確率に関係している。リスクに関する用語を以下に列挙する。

- 相対リスク [Relative risk]

着目する疾患（たとえば肺がん）の罹患率または死亡率についての、被ばくした集団の非被ばく集団に対する比。

- 過剰相対リスク [Excess relative risk]

相対リスク-1

- リスク係数 [Risk coefficient]

単位被ばくまたは単位線量当たりのリスクの増加。一般的にはWLMあたり、 $\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ あたり、 $100\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ あたり、あるいはSvあたりの過剰相対リスクとして表される。

- 損害（デトリメント） [Detriment]

損害はICRPの概念である。損害は放射線源に集団が被ばくした結果、被ばくした集団と、その子孫が経験する健康上のすべての害を表す。損害は、多次元的概念である。その主要な構成要素は確率的な量、すなわち被ばくに起因する致死がんの確率、非致

死がんの重み付け確率、重篤な遺伝性影響の重み付け確率、および害が生じた場合の寿命損失期間である。

ワーキングレベル [Working level]

ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度を対象に使用される古くからの単位。1 m³の空气中に存在する短寿命のラドン子孫核種の任意の組み合わせの中で、1.30 × 10⁸ MeV・m⁻³のポテンシャル・アルファ・エネルギー（およそ 2.08 × 10⁻⁵ J・m⁻³と等しい）が放出される組み合わせと定義される。

ワーキングレベルマンス [Working level month]

1作業月、すなわち170時間にわたって、1WLの濃度の空気を呼吸することによる累積被ばく量。

用語解説の見出し語

〈原著配列順〉

Categories of exposure	被ばくのカテゴリー	Planned exposure situation	計画被ばく状況
Derived reference level	誘導参考レベル	Potential alpha energy concentration	ポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度
Employer	雇用主	Public exposure	公衆被ばく
Equilibrium equivalent concentration	平衡等価濃度	Radon-220 progeny	ラドン-220子孫核種
Equilibrium factor	平衡係数	Radon-222 progeny	ラドン-222子孫核種
Existing exposure situation	現存被ばく状況	Radon-prone area	ラドン高濃度地域
Exposure pathway	被ばく経路	Reference level	参考レベル
Graded approach	グレーデッドアプローチ	Risk	リスク
Medical exposure	医療被ばく	・Relative risk	相対リスク
Member of the public	公衆の構成員	・Excess relative risk	過剰相対リスク
National radon survey	ラドン全国調査	・Risk coefficient	リスク係数
Naturally occurring radioactive material	自然起源放射性物質	・Detriment	損害（デトリメント）
Occupational exposure	職業被ばく	Worker	作業員
Operating management	操業管理者	Working level	ワーキングレベル
Optimisation of protection	防護の最適化	Working level month	ワーキングレベルマンス

1. 序 論

1.1 背 景

(1) 委員会は、ラドン被ばくに対する防護に関する勧告を過去に刊行している。*Publication 65* (ICRP, 1993) において、委員会は、吸入されたラドンとその子孫核種による健康影響に関する既存の知見をレビューし、その2年前に刊行された全般的な勧告 (ICRP, 1991) に沿って、住宅と職場の双方におけるラドン被ばくの管理に関する枠組みを策定した。

(2) *Publication 101, Part 2* (ICRP, 2006b) では、委員会は、放射線防護の最適化に関する勧告を改訂した。*Publication 101, Part 2* (ICRP, 2006b) では、ラドン被ばくに関する具体的な規定を記載していなかったが、放射線防護における最適化の原則をすべての被ばく状況に適用できる原則としてその重要性を強化し、関連のステークホルダーを参加させるため、そのプロセスを拡張することを勧告した。それと同時に、委員会は *Publication 103* (ICRP, 2007) でその全般的な勧告を改訂したが、その中で住宅と職場におけるラドンに関する節が設けられている。この節では、*Publication 65* (ICRP, 1993) の勧告を広範囲に確認しているが、対策レベルの概念に替えて参考レベルという概念を取り入れている。

(3) ごく最近になって、委員会は、ラドンを原因とするリスクに関して入手できる科学情報のレビューを行った。2009年、委員会は、改訂されたリスク損害 (デトリメント) 値と参考レベルを用いて、家庭と職場におけるラドン被ばくに関して、自らの立場を改めたことを要約した声明を採用した。『ラドンに関する ICRP 声明』は *Publication 115* で公表され、ラドンとその子孫核種による肺がんのリスクに関してレビューしている (ICRP, 2010)。

(4) *Publication 65* (ICRP, 1993) の刊行以降、多くの国がラドン被ばくを制御するラドン方策を実施するなかで経験を積んでいる。さらに、この問題については、国際組織も科学的な情報やガイダンスを提供している。特に、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) は、ラドン被ばくとそのリスクに関する報告書 (UNSCEAR, 2009) を刊行し、世界保健機関 (WHO) は、公衆衛生という観点から屋内におけるラドン被ばくの管理を扱うハンドブック (WHO, 2009) を刊行している。最近になって、『ラドンに関する ICRP 声明』の重要な勧告事項が、国際基本安全基準と欧州基本安全基準 (IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011; EURATOM, 2014) に統合されている。

(5) この報告書の目的は、上述の刊行物を考慮に入れて、ラドン被ばくの制御に関する勧告を最新のものにし、その内容を改訂することである。また、この刊行物は、ラドンとその子

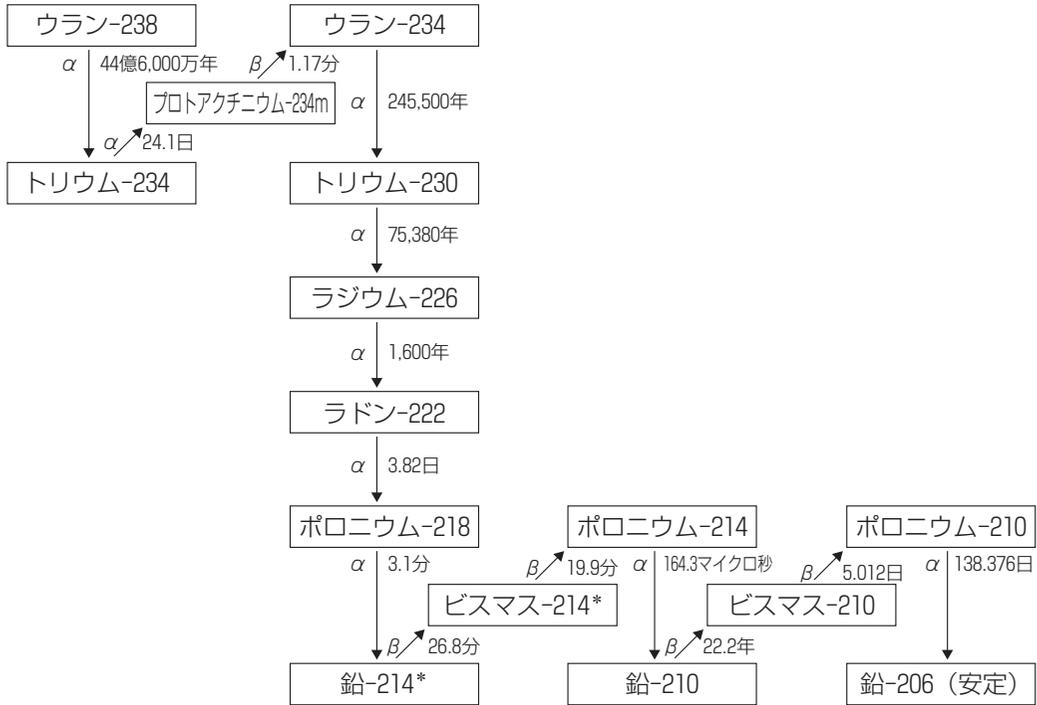


図 1.1 ウラン-238 壊変生成物
*同位体も重要なガンマ線放出体である。

孫核種を含めた放射性核種の吸入と経口摂取に関する、改訂された線量係数についても考察しているが、それは他の ICRP 刊行物で詳細に示されることになっている。

1.2 適用範囲

(6) ラドンは、ウラン-238、ウラン-235、トリウム-232 の放射性壊変生成物である。ウラン-238 系列の場合、生成される同位体はラドン-222 であり、これはラジウム-226 から直接生成される壊変生成物である (図 1.1)。ウラン-235 系列の場合、生成される同位体はラドン-219 である (図 1.2)。トリウム-232 系列の場合に生成される同位体はラドン-220 であり、これはラジウム-224 から直接生成される壊変生成物である (図 1.3)。ラドンによるヒトの被ばくは主にラドン-222 によるものであるが、より正確に言えば、ラドン-222 の短寿命子孫核種である。ラドン-222 は半減期が短いため、屋内の空気中のラドン-222 による被ばくは、一般的にはそれほど大きな影響はない。ラドン-219 は半減期が短いため屋内への移動は重要ではないので、被ばくへの寄与は重要ではなく、したがって、この刊行物では考慮していない。

(7) 人々は公衆の構成員として住宅で、あるいは作業員として職場でラドン-222 とラドン-220 に被ばくしている。人はまた、市役所、郵便局、学校、病院、高齢者用の住宅、刑務所、

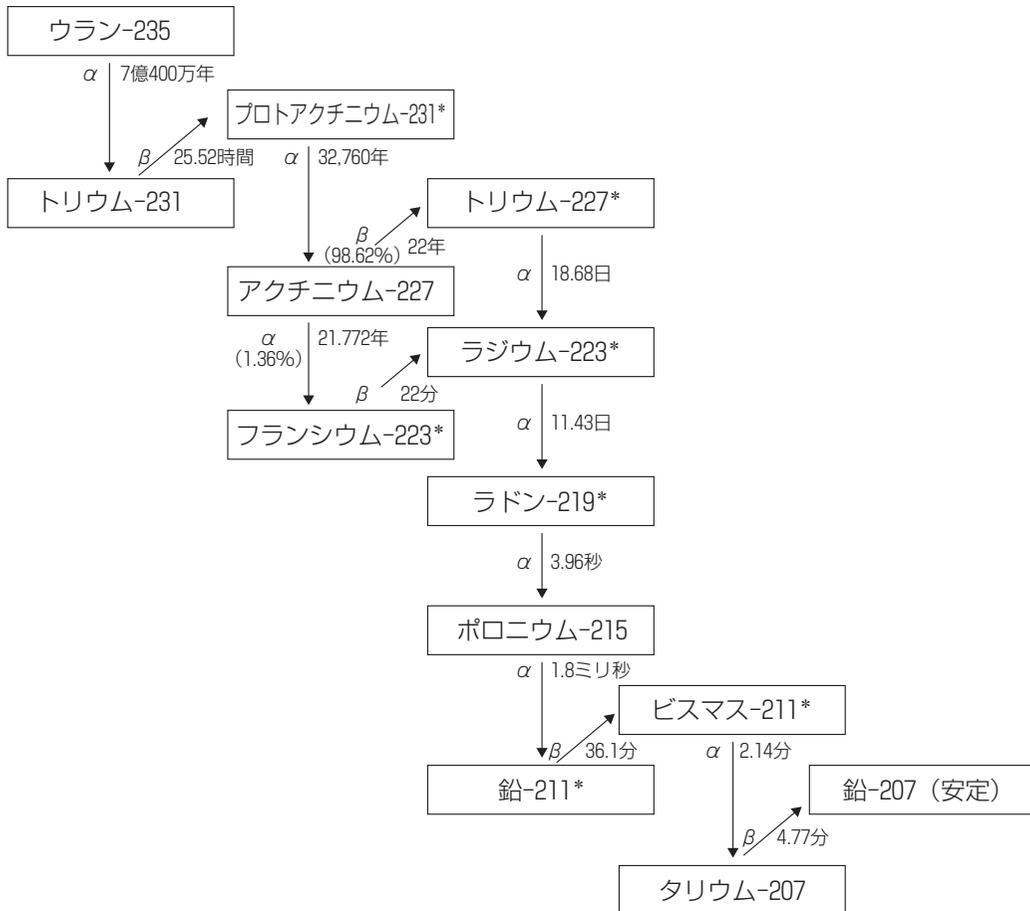


図 1.2 ウラン-235 壊変生成物

*同位体も重要なガンマ線放出体である。

商店、娯楽ビルといった、公衆に開放されている公共あるいは民間の施設において、公衆の構成員（顧客、利用者、訪問者、生徒など）または作業員（職員、運搬作業員、店主、案内人、警備員、看護師など）としてラドンに被ばくしている。作業員が、管理人といった居住者というケースもあり得る。この報告書は、いかなる場所においても、またすべての個人を対象として、ラドン-222 による被ばくの制御に適用できる。健康への懸念がより少ないラドン-220 に関するガイダンスは、主に建築材に関する規定に的を絞っている（4.4 節を参照）。

(8) この報告書の目的は、ラドン被ばくに対する防護を目的とした委員会の体系の適用について記述し、かつ詳らかにすることである。本報告書は、公衆の構成員や職業被ばくをしているとは見なされない作業員を全般的に防護するために、住宅や複合用途ビル、一般的な職場といった建物の管理を重点的に扱っている。作業員が多くの場合、職務上被ばくしていると考えられるウラン鉱山のような特定の作業場所については、個人被ばくの管理に関する新しい規定を勧告していない。

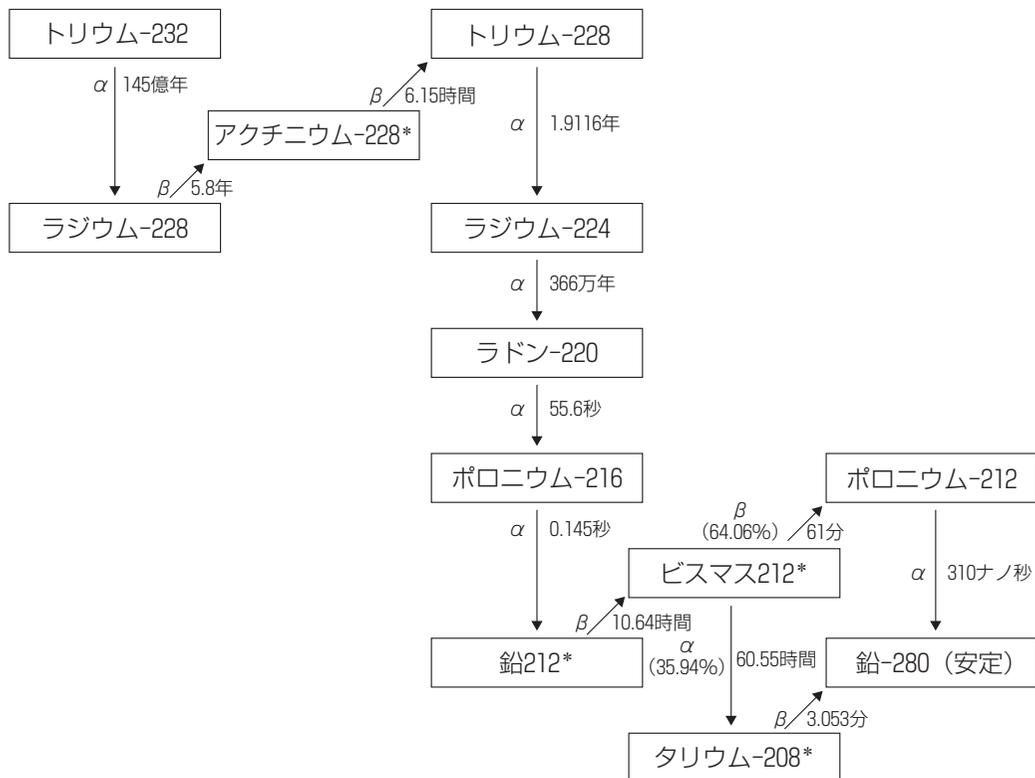


図 1.3 トリウム-232 壊変生成物

*同位体も重要なガンマ線放出体である。

1.3 構 成

(9) 2章では、主にラドン-222を中心に、ラドン被ばくの特徴を示す。ラドン-222の制御の歴史について簡単に記載し、ラドンの線源や移動のメカニズム、同時に、それに伴う健康リスクの性質や数量化に言及している。また、国のラドン防護戦略を策定する際の主な課題の概略も示している。

(10) 3章では、ラドン被ばくに関する防護体系について述べる。さまざまな被ばく状況において、被ばくしている個人の区分でいかに対処するかについて説明した後、3つの節では、防護戦略の正当化、防護の最適化、そして関連する場合の線量限度の適用に着目している。

(11) 4章には、状況に応じてラドン被ばくを制御するための防護戦略の実施に関するガイダンスを記載する。4.1節では、国の行動計画に基づいて、建物における被ばくの管理を取り扱う。4.2節と4.3節では、それぞれ予防と緩和を重点的に取り上げ、4.4節では建築材を中心に取り上げる。4.5節と4.6節では、それぞれ一般的な職場とウラン鉱山における作業者のラドン防護を取り扱う。最後に、4.7節はステークホルダーの連携に着目している。

2. ラドン被ばくの特徴

2.1 歴史的背景

(12) 17世紀よりも前に、中央ヨーロッパの鉱山労働者に死亡率が高いことが認められており、19世紀後半にはその主な死因が肺がんであることが確認されていた（Harting と Hesse, 1879）。1924年、このような肺がんはラドン被ばくに起因することが示唆された（Ludewig と Lorenzer, 1924）。

(13) このような最初の報告が、ラドンを測定する動機となった。ラドンに関する初期の測定は主に、大気電気、大気輸送、土壌からのガスの散逸など、さまざまな現象を対象とした環境研究に限定されていた。1950年代に、ウラン鉱山におけるラドン子孫核種による被ばくを対象としたモニタリングプログラムが、作業員の被ばくを制御するために策定された。

(14) 屋内のラドンに関する測定が初めて行われたのは1950年代であるが（Hultqvist, 1956）、注目を集めることはほとんどなかった。しかし、1970年代以降、一部の国において、住宅におけるラドンのレベルの上昇を示す測定結果が増加した。この10年間、住宅と職場において、包括的なラドン調査が、管理戦略と同時に多くの国で実施されてきた。

(15) 1986年、ラドンが肺がんの原因であることが公式に確認された（WHO, 1986; IARC, 1988）。その当時、ラドンに起因する肺がんのリスクに関する主な情報源は、地下鉱山作業員の疫学的研究であった（ICRP, 1993）。

(16) 1990年代以降、いくつかの研究が、低レベルの被ばくのリスクに関する有益なデータを提供してきたが、その結果、ラドンの慢性的な低率の被ばくは、より高いリスクであることが明らかとなった（Lubin ら, 1997; NRC, 1998; EPA, 1999, 2003; Tomasek ら, 2008）。さらに、住宅におけるラドン被ばくの症例対照研究から得られた、肺がんデータに関する最近の統合解析は、より低いレベルの被ばくでもリスクが増大することを示している（Lubin ら, 2004; Darby ら, 2005, 2006; Krewski ら, 2006）。

(17) ラドン被ばくの制御の歴史については、さらに包括的なレビューが *Publication 65*（ICRP, 1993）に記載されている。

2.2 ラドンの線源と移動

(18) ラドン-222は、地殻内部にさまざまな濃度（ppmレベル）で存在している

6 2. ラドン被ばくの特徴

ウラン-238の放射性壊変生成物である。ラドン-222の半減期は3.82日であり、ラジウム-226の直接壊変生成物である。

(19) 放射性壊変の過程では、生成物は一般的には原子が壊変した岩石中に残存する。壊変生成物が気体の場合、原子は移動することができる。原子が岩の断面や裂け目の隣の空隙で生じた場合は、生成地点から移動することができる。土壌内の空気にはラドンが多く含まれており、通常、土壌表面から0.5～1mの深さで測定した場合、 $2000 \sim 10^6 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の濃度である (Cothorn と Smith, 1987; Winkle ら, 2001)。空隙に存在するラドンは主に拡散によって運ばれ、その移動速度は土壌の空隙率や通気性によって異なる。また、割れ目や断層の存在による対流によっても運ばれる。水に溶けているラドンが地下水を媒介として移動するのは、もう一つの重要な移動メカニズムである。

(20) ラドンの中には、壊変する前に土壌から大気に放出されるものがある。一般的に、土壌から散逸されるラドンはわずかでありただちに空気中で薄められるが、その程度は、大気安定度、風の有無、(垂直温度勾配に関係する)乱気流の程度によって異なる。したがって、大気中ラドン-222の濃度は一般的には低い変動しやすい。地上での測定値は $1 \sim 100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲で変化する。屋外でのラドン-222の典型的なレベルは $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ のオーダーであり、海岸の近くや小さな島ではこれよりも低いレベルである (UNSCEAR, 2000, 2009)。

(21) ラドン-220は、地殻内部にさまざまな濃度で存在しているトリウム-232の放射性壊変生成物である。ラドン-220の半減期はラドン-222よりも大変短いため ($T_{1/2} = 55 \text{ s}$)、生成場所から大きく移動することはない。環境におけるラドン-220の挙動は、ラドン-222の挙動とは明らかに異なる。屋内の空気中に存在するラドン-220の主な発生源は建築材である。ラドン-220の濃度は場所によって大きく変化する。一般的に、さまざまな国のラドン-220の屋内における平均レベルは、 $0.2 \sim 12 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ である (UNSCEAR, 2000, 2009)。一部の伝統的な住宅などの特殊なケースを除いて、ラドン-220に被ばくしても、通常、放射線防護に関する問題は発生しない。

(22) 土壌から屋外の空気に放出されるラドンの濃度は、ただちに薄められるが、住宅のような囲われた建物に流れ込んだ場合はそうではない (図 2.1)。建物の換気率に依存するが、屋外空気と比べると、ラドンガスが蓄積される。気象パラメータ、特に屋外と屋内の空気の温度差によっては、土壌と建物の基礎との間に圧力差が生じる。その結果、土壌の上にある床板の通気性と、床板の下に空間がある場合はその換気にも依存するが、ラドンを多く含んだ土壌空気の流れが高められる。この圧力によって生じる流れは、一般的に拡散によるラドンの移動よりもはるかに重要である。圧力差がない場合は、建物の堅固な基礎は土壌の表面よりも密度が高いため、拡散によるラドンの移動は少なくなる。

(23) 土壌から建物へのラドンの移動は、次に示すいくつものパラメータに依存する。すなわち、

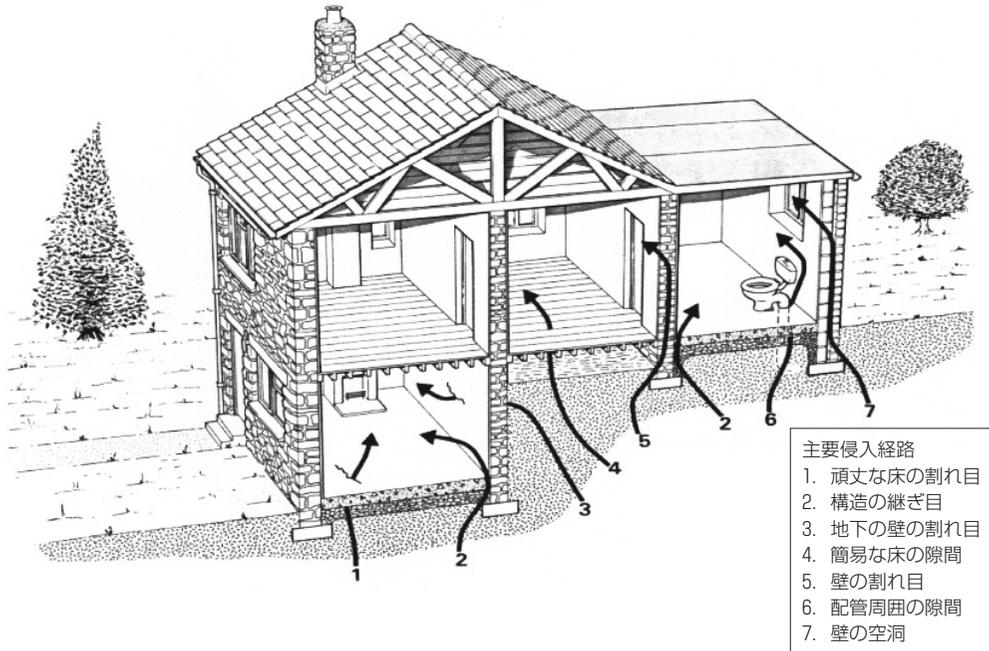


図 2.1 屋内ラドンの経路

- 土壌の組成（化学，地質，土壌水分，ラドン通気性）
- 土壌中のラドンの濃度
- 対象となる建物や場所の内部と外部の圧力差，土壌と建物周囲の大気の圧力差，土壌と建物内のより低い階の部屋との圧力差
- 地面と接触している建物部分の面積
- 特に床や建物の基礎部に見られる，亀裂，パイプダクト，ケーブル管路などの存在を含め建物の外側部分の気密性

(24) 建物内のラドンの移動は，以下に示すいくつかのパラメータに依存する。すなわち，

- 換気や空調による建物内の空気の循環
- 屋内と屋外の温度差を中心とする気象・季節パラメータ
- 床の高さと部屋の広さ
- ドアや窓の開放といった建物の居住者の生活スタイルの選択や作業習慣

(25) 建築材中のウランとトリウム量はさまざまである。ラドンはこのような建築材から周辺の空気に放出される。放出される放射能強度は，ラドン生成の割合や材料の空隙率によって異なる。一般的な建築材の場合，侵入の体積流量は $0.05 \sim 50 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ であり，それに対応する濃度は $0.03 \sim 30 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ である（空気の平均入替わり速度が 0.7 h^{-1} の場合）。ラドンの濃度が $1000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ に達するようなケースも確実に存在する（コンクリートが高濃度のラジ

ウムを含有している場合など)。しかし、ほとんどのケースでは、土壌からのラドンの侵入と比べれば、このようなラドンの発生源の重要性は副次的なものである (EC, 1999)。

(26) 地下水中のラドン濃度は大きく変わり、ラドンの水に対する可溶性は低いにもかかわらず、比較的高くなることもある。濃度は、数 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ から数万 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ の範囲である (Skeppström と Olofsson, 2007)。比較的高いラドン濃度が、いくつかの私設の井戸や試錐孔、泉で確認されている。ラドンを含有している水を家庭で生活用水として使用する場合、ラドンが屋内空気に放出され、濃度が上昇する。公共の水道水に含まれるラドンの量は、配水中における壊変あるいは脱気によってラドンが減るため、一般的に比較的小さい。

(27) UNSCEAR (2009) によると、ラドンの発生源が何 (土壌, 建築材, あるいは水) であれ、建物内のその濃度は、 $10 \sim 70,000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲で数桁にわたって変動する。屋内濃度の世界的な平均値はおおよそ $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

2.3 ラドンのリスク

(28) ラドン被ばくのリスクに関する評価は、従来から、地下ウラン鉱山労働者の追跡調査を主とした疫学的研究に基づいて行われてきた。このアプローチによって、ワーキングレベルマンス (WLM) か、 $\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$, または $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ で表された被ばく量当たりの相対リスクを算出することができる。Publication 65 (ICRP, 1993) では線量換算規約が定められた。この規約は、ラドンとその子孫核種による単位被ばく線量あたりの損害 (デトリメント) と、単位実効線量あたりの総損害 (デトリメント) との直接比較に基づいている。前者は鉱山労働者の疫学調査から求められたものであり、後者は主にガンマ線に被ばくした日本の原爆被爆生存者の疫学調査から求められたものである。この比較によって WLM 当たりの mSv, または $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 当たりの mSv で表された、単位被ばくあたりの実効線量を算出ことができ、また $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ で表される対策レベルを導出することができる。その他のすべての放射性核種の実効線量は、基準となる体内動態モデルと線量評価モデルに基づいて、指定の放射線加重係数と組織加重係数を使用して算出される。委員会は、今後の線量係数の計算では、ラドンをその他の放射性核種の中にも含めるつもりであることを Publication 115 (ICRP, 2010) で表明している。

2.3.1 疫学的証拠

(29) WHO は、『屋内ラドンに関するハンドブック (WHO, 2009)』で、住宅におけるラドン被ばくの健康影響を評価し、以下の結論を出した。すなわち、

- 疫学調査は、家庭内のラドンにより一般公衆の肺がんのリスクが増大することを示している。ラドンによるその他の健康影響については、一貫した結果は得られていない。
- すべての肺がんに対して、ラドンに関係した肺がんの割合は、その国の平均ラドン濃度と算

出方法によって、3～14%の範囲であると推定される。

- ラドンは、多くの国で喫煙に次いで2番目の肺がんの重要な原因である。ラドンが肺がんを引き起こす可能性は、生涯非喫煙者よりも、喫煙者や過去に喫煙していた人の方が格段に高い。しかし、一度も喫煙したことがない人については、ラドンが肺がんの第一の原因である。
- ラドン被ばくのリスクがゼロになるしきい濃度については、確認されていない。ラドンの濃度が低くても、肺がんのリスクが若干増大する可能性がある。

(30) ラドンとその子孫核種による被ばくに伴う肺がんのリスクに関して記載した *Publication 115* (ICRP, 2010) において、作業員（地下鉱山労働者）と一般公衆の両方を対象としたラドンの疫学について、委員会は徹底したレビューと分析を行った。委員会が達した主な結論は以下のとおりである。すなわち、

- 地下鉱山労働者に関するコホート研究と、住宅におけるラドン被ばく者に関する症例対照研究から、ラドンとその子孫核種が肺がんの原因であることを示す確固とした証拠が得られている。肺がん以外の固形腫瘍や白血病については、ラドンとその子孫核種の被ばくに伴ういかなる過剰リスクも、説得力がある証拠や一貫した証拠は、現在のところは見つかっていない。
- 鉱山労働者に関する調査と、屋内の調査から推定した肺がんのリスクを適切に比較すると、良い一致が見られる。住宅における3つの症例対照研究に関するプール解析（欧州、北米、中国）では、類似の結果が得られている。欧州での住宅における症例対照研究に関するプール解析において、ラドンの放射能濃度測定値のランダムな不確かさを修正したあとでは、 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 当たり 16% の過剰相対リスク（95% 信頼区間：5～32%）が報告されている（Darby ら, 2005）。このリスクが少なくとも 25 年の被ばく期間と関係していることを考えれば、この値は家庭における比較的低レベルで長期のラドン被ばくのリスク管理の目的としては、妥当な推定値であると考えられる。
- 生涯非喫煙者の 75 歳までの肺がんの累積リスクは、ラドン濃度が $0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 0.4%、 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 0.5%、 $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 0.7% であると推定されている。また、生涯喫煙者については、ラドン濃度が $0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 10%、 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 12%、 $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 16% に近い数値になると推定されている（Darby ら, 2005, 2006）。喫煙が肺がんの最も大きい原因であることに変わりはない。
- 比較的低レベルの被ばくを対象とした研究を含め、地下鉱山労働者に関する疫学調査のレビューに基づいて、単位被ばく当たりの肺損害（デトリメント）に対して、損害（デトリメント）が調整された名目リスク係数として WLM 当たりの 5×10^{-4} ($\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 当たり 0.14) が採択された。この値は、成人期間の被ばくについて考察した最近の研究から導き出されており、*Publication 65* (ICRP, 1993) で算出されている値のほぼ 2 倍である。

(31) この検討の結果、委員会は、『ラドンに関する声明』において、損害（デトリメント）

が調整された名目リスク係数として、 $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 当たり 8×10^{-10} という数値を勧告している。この係数は、その子孫核種と平衡状態にあるラドン-222 に対する被ばくについて、すべての年齢の集団（非喫煙者と喫煙者が混在する成人集団）を対象としたものである（ICRP, 2010）。委員会の結論は、UNSCEAR（2009）が国連総会に提出したものを含み、その他広範囲の推定値と一致している。

2.3.2 線量評価アプローチ

(32) ラドン子孫核種を吸入摂取後の等価線量と実効線量は、ヒト呼吸気道モデル（ICRP, 1993, 2014a）、ヒト消化管モデル（ICRP, 2006a）や、ポロニウム、鉛、ビスマスを対象とした系統的な体内動態モデル（ICRP, 2014b）など、ICRP の基準となる体内動態モデルと線量評価モデルを使って算出することができる。ラドンガスを対象とした系統的な体内動態モデルも開発されているため、ラドンガスの吸入によって生じる実効線量は計算することができる（ICRP, 2014b）。

(33) ラドン-222 が壊変すると、気体でないポロニウム-218 原子 1 個が生まれる。さらに、この原子は図 1.1 に示すように他の放射性核種に壊変する。短寿命のラドン壊変生成物（ポロニウム-218、鉛-214、ビスマス-214）は非付着放射性核種として、また、その場の条件によっては非付着放射性核種とともにエアロゾル粒子に付着した状態で空気中に存在する。これらは、物体表面への沈着や換気によって除去しうる。

(34) ラドンは不活性ガスであるため、吸入されたラドンのほとんどすべてが吐き出される。しかし、吸入されたラドン子孫核種の大部分は肺気道に残留する。半減期が短いため、血中に吸収されたり、粒子移動によって消化管に運ばれたりして除去される前に、肺組織に線量を与える。ポロニウム-218 とポロニウム-214 の 2 つの短寿命子孫核種は α 粒子を放出し、それによって付与されたエネルギーが肺の線量に大きく寄与する。その一方で、全身の器官や胃腸管領域に対する線量は低い。その結果、ラドン子孫核種を吸い込んだあとの実効線量の 95% 以上が肺の等価線量の寄与である。一般的に、ラドンガスのみを吸入した場合の実効線量は、ラドン子孫核種を吸い込んだ場合の実効線量の 10% 以下である。

(35) 線量を決定する主要因は、ラドン子孫核種の濃度、被ばく期間、呼吸量や、ラドン子孫核種エアロゾルの放射能粒径分布とその非付着成分の割合といったエアロゾルの性状である。ラドンの測定値によって被ばくを特徴づけようとする、空気中のラドン子孫核種の濃度を推定するために、平衡係数 F の値が必要となる。放射線防護を目的とするために、呼吸量のような線量評価モデルのパラメータのほとんどは、標準作業員あるいは標準人に対応した値である。委員会が考慮する線量評価モデルでは、鉱山と一般的な屋内の職場という 2 つの職業被ばく状況について考察が行われてきた（ICRP, 2014b）。これらの 2 つの状況で算定された線量評価係数は、喫煙者と非喫煙者を区別していない。放射線防護の目的においては、このア

アプローチは適切であると考えられる。

(36) 住宅については、線量係数はWLM当たり13 mSvと算出されている(MarshとBailey, 2013)。この線量係数と $F = 0.4$ 、滞在時間 = 7000時間/年という被ばくパラメータにより計算すると、 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ というラドンの年平均濃度は、現存被ばく状況を対象とした参考レベルの1～20 mSvの範囲内の線量に相当するが、上限値に近い数値である。比較のために、家庭におけるラドン濃度 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ は、*Publication 115* (ICRP, 2010)とMarshら(2010)の改訂された名目リスク係数を適用し、疫学的に導出された線量換算規約(27項を参照)を使うと、およそ10 mSvの年線量に相当する。線量評価アプローチを使って、鉱山での被ばくに対してWLM当たり11 mSvという線量係数が求められているが、これは基本的には線量換算規約で求めた係数と同じ数値である。

2.4 ラドン被ばくの管理に関する課題

(37) 屋内におけるラドン被ばくの制御では、ラドンに対する国の防護戦略、特に公衆衛生や責任という観点から対応すべき課題が多くある。

2.4.1 公衆衛生に関する考慮事項

(38) 人々は、住居においては公衆の構成員として、そして職場においては作業員として、ラドンに被ばくしている。また、複合用途ビルにおいては、公衆の構成員または作業員としてラドンに被ばくしている。人々は一日の間にさまざまな場所へ移動するため、ラドン防護戦略は、任意の地域におけるさまざまな場所を対象とした一貫性のある管理を行うのが理想であり、滞在時間は場所によって異なるものの、統合的なアプローチを採用すべきである。

(39) WHOによると、ラドンに起因する肺癌による推定死亡率を他のがんと比べると、屋内でのラドン被ばくは、公衆衛生の面で危険性が大きいとのことである(WHO, 2009)。人々は、屋内、主に自宅で長い時間を過ごす。公衆衛生という観点からは、家庭におけるラドン被ばくが最も重要であるため、ラドン防護戦略では、建物がきちんとした管理の下にあって、規制が適切になされている公共の場所や職場における被ばくではなく、主に住宅における被ばくを中心とした取り組みを行わなければならない。

(40) 家庭における子どものラドン被ばくに関する疫学調査は行われていないが、一般的に、子どもは成人よりも放射線に対して敏感であると考えられる。しかし、委員会は、統合的アプローチに従い、また一生を通じてリスクが蓄積されることを考えて、子どもに対して特定の指標や助言を用いることを勧告していない。とはいえ、建物内に多くの子どもが存在するので、配慮を高めて予防と緩和の両対策を、優先事項として実施することについて議論すべきである。

(41) 公衆衛生という観点から、ラドンを低減することは長期的な目標である。新築の建物では、ラドン被ばくを予防することが最も重要である。新築の建物やリフォームした建物において予防策を実施することは、すぐれた解決方法のひとつであり、経験や建築基準の適用に伴って費用対効果が向上する (STUK, 2008)。このことは、また、建築部門に携わる専門家の意識を高めるのを助けることにもなる。

(42) 既存の建物における改善策もまた、ラドン濃度が高い建物では適切な対策であることが多い。そのような状況では、大きなラドン侵入源が存在する可能性があり、ラドンのレベルを10分の1以下に低減できる場合がよくある。

(43) 個人のラドン被ばく (濃度) は広く分散しており、長期的な平均ラドン濃度が $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を下回るレベルで肺がんのリスクがあることを示す証拠が存在する (ICRP, 2010)。したがって、集団に対する全体的なリスク、公平性を期するために個人の最も高い被ばくレベルを、合理的に達成できる限り低いレベルに低減することを目的にすべきである。しかし、ラドン被ばくを完全になくすことは不可能である。

(44) 集団に対するリスクの発生源は、ラドン被ばくだけではない。ラドン防護戦略は、その国において確認されているその他の健康上の危険や優先事項を考慮に入れて、適正な規模で実施すべきである。さらに、ラドン防護戦略と、禁煙や室内空気質などその他の公衆衛生に関する方策を比較し、そして統合することで、矛盾が発生しないようにして、有効性を向上させる努力をすべきである。

(45) ラドン被ばくはどこでも見られる現象であること、そしてその状況や意志決定者の多さと多様性を考えると、ほとんどの状況に対して同じアプローチで対応するには、単純明快で、現実的で、統合的なラドン防護戦略が適切である。ラドン防護戦略は、長期的に、可能ならば永続的に支援・実施され、関連するすべてのステークホルダーを含めなければならない。

2.4.2 ステークホルダーの責任

(46) 国のラドン防護戦略では、また、責任という観点で多くの課題に対処しなければならない。特に、個々の家屋所有者が住居者に対して負う責任、建築業者や土地・建物の販売業者が買い手に対して負う責任、家主が入居者に対して負う責任、雇用主が従業員に対して負う責任、そして一般的に言えば、あらゆる建物の責任者がその使用者に対して負う責任である。

(47) ラドン被ばくは、主に住宅内の問題であるから、ほとんどの場合ラドン防護戦略の成功は、実際には (自助防護の場合は) 家庭におけるリスクを低減するという個人の決断によって決まる。特に、ラドン高濃度地域では、個人が責任を持てるように支援するために、一般公衆がラドンに関するリスクをはっきりと意識することが必要である。現時点では、ラドン方策が確立されている一部の国を除いて、このような意識は一般的に薄弱であるので、意識を高めるべきであるということを認識する必要がある。ラドンのリスクを明確にした行動計画を策

定したり、そのようなリスクに対処するために必要とされる対策を実施したりすることによって、状況を改善することができる。すぐれたインフラの提供と、情報、測定および改善策に関する支援が不可欠である。

(48) 必要な対策をどの程度実施するかは、その状況に対する法的な責任の度合いと密接に関係している。家の所有者がその家を貸したり売ったりする場合は、家主にそのような責任が伴うことがよくある。雇用主には、従業員の健康と安全に対する法的な責任がある。学校(または地域の当局)の管理者には、職員に対するのと同じように、生徒についても健康に関して法的な責任が伴うであろう。その他の公共の建物や職場についても、同様に考慮されるかもしれない。このような責任に関する要件は、その国の幅広い公衆衛生に関する政策と合致させるべきである。

(49) 責任の問題は、ラドン防護戦略を策定し、実施する際には、グレーデッドアプローチ*が必要であることを明確に示している。このようなグレーデッドアプローチは、強い意志と現実主義の両方に基づいて実施すべきである。

*訳注 リスクレベル等に応じたアプローチまたは取り組みのことを指す。

3. ラドン被ばくに対する ICRP の放射線防護体系

(50) 委員会の放射線防護体系については、*Publication 103*¹ (ICRP, 2007) に記載されている。44 項には、「その大きさと起源にかかわらず、あらゆる線源からのすべての放射線被ばくに適用される」と記載されている。特に、45 項には、「委員会の勧告は自然線源と人工線源の両方の被ばくを取り扱っている。勧告は、被ばくの源かまたは個人が受けた線量を生じる被ばく経路のどちらかを、ある合理的な手段で制御できる状況にのみ全体的に適用できる。そのような状況における線源を、制御可能な線源という」と記載されている。

(51) 屋内ラドンの被ばくは、線源から被ばくする個人への経路の大部分を制御したり、あるいはそれに影響を及ぼしたりすることができるので、制御可能である。地表面レベルの屋外ラドン濃度は高くなる場合もあるが、ラドンガスは通常、大気中に分散して薄められるため、ラドンの発散量がきわめて多い一部の限定的な地域を除いて、一般的に環境空気中の濃度は比較的 low、最大でも数十 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ である (UNSCEAR, 2009)。線源も経路も合理的に制御することはできないので、人間の活動によって高められた線源から非常に高い屋外濃度が生じる場合を除いて、屋外ラドンによる人の被ばくは合理的に制御できないというのが委員会の見解である。

3.1 被ばく状況と被ばくのカテゴリー

3.1.1 被ばく状況の分類

(52) 被ばく状況とは、自然または人工を含めた放射線源とさまざまな経路を通して人に被ばくをもたらす放射線の移動を含む過程である。*Publication 103* (ICRP, 2007) の勧告では、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況、現存被ばく状況といった3種類の被ばく状況に従って、放射線防護を体系化している。計画被ばく状況とは、線源の意図的な導入と運用によって生じる状況である。被ばくは予測可能であり、完全に制御可能である。緊急時被ばく状況とは、線源の制御の喪失から生じる状況で、好ましくない結果を避けたり減らしたりするために緊急の対策が必要となる。緊急時被ばく状況には、悪意のある行為から、あるいは他の予想外の状況から発生する被ばくも含まれる。現存被ばく状況とは、関連する被ばくを制御するために決定

¹ *Publication 103* の「用語解説」の文言に不備や不整合性があったため、この刊行物の執筆時、委員会は其の改訂に取り組んでいる最中である。そういった理由で、この刊行物では *Publication 103* の用語解説でなく、その本文の文言を参照している。

を下した時点で線源がすでに存在している状況をいう。現存被ばく状況には、過去の事象、事故や行為からの被ばくなどとともに自然の放射線源による被ばくも含まれる。これらの状況のなかで、被ばくパターンの特徴を明らかにすることは、被ばく状況を制御する上で不可欠である。

(53) ラドン被ばく状況は、その線源が地殻内部において広く見られる自然の放射能に何も手を加えていないそのままの濃度であるから、現存被ばく状況の特徴がある。人間活動によって、屋外のバックグラウンドレベルよりも、屋内のラドン濃度が高くなるような新しい経路が作られたり、経路を変えたりすることがある。このような経路は、予防対策や緩和対策によって変えることができる。しかし、線源そのものを修正することはできず、すでに線源が存在している状況で、制御に関する決定を下さなければならない。*Publication 103* (ICRP, 2007, 284 項) に、現存被ばく状況の例として、住宅や職場におけるラドンが示されている。

(54) 一般的に、ウラン採掘時のラドン被ばくは、計画被ばく状況として同じ方法で管理される。それは、ウラン採掘は核燃料サイクルの一部だからであり、作業者は職業上、ラドンだけでなく、ガンマ線による外部被ばくや塵埃の吸入または摂取によって、他の放射線源にも被ばくしているからである。作業者が関与するその他（ウラン採掘以外）のラドン被ばく状況のうち、どれを最初から計画被ばく状況であると見なすべきとするかは、国の当局が決めることである。

(55) ラドンは、緊急時被ばく状況を引き起こす可能性が小さいが、特定の場所できわめて高濃度のラドンが検知されることによって、特に、建物の意志決定者が他の居住者に対する管理義務を負っており、被ばくが居住者に対して影響を及ぼす場合は、防護対策を迅速に実行することを求められることもある。

(56) *Publication 103* (ICRP, 2007) の基本的な考え方は、*Publication 60* (ICRP, 1991) とは異なり、すべての種類の被ばく状況の管理を対象に、一貫したアプローチを推奨することである。このアプローチは、適切な線量制限値（線量拘束値または参考レベル）を下回るように、最適化プロセスを適用することに基づいている。

3.1.2 被ばくのカテゴリー

(57) 委員会は、3つの被ばくのカテゴリー、すなわち医療被ばく、職業被ばく、公衆被ばくを区別している。

(58) 職業被ばくとは、仕事をした結果被る作業者の放射線被ばくのことである。しかし、放射線はどこにでも存在するため、この定義をそのまま当てはめることは、すべての作業者が放射線防護の管理体制に従うことを意味することになる。それゆえ委員会は、“職業被ばく”の使用を操業管理者の責任であると合理的に見なすことができる状況の結果として仕事上で受ける放射線被ばくに限定する (ICRP, 2007, 178 項)。ほとんどの職場において、ラドン被ばくは付随的なものである（つまり、ラドン被ばくは、行っている仕事の性質が原因で、あるいは

関連して起こるものではなく、単に作業員やその他の人が雇用主の敷地内に居合わせるにより起こるのである)。

(59) *Publication 65* (ICRP, 1993, 86 項) には、「職業的に放射線に被ばくするとみなされない作業員は、通常、公衆の構成員と同様に扱われる」と記載されている。作業員の健康と安全を確保することが、継続して雇用主の責任であることを考えると、この規定は現在も有効である。つまり、ラドン被ばくが付随的に起こるような一般的な職場では、被ばくを区別して制御することでラドンに対処するのではなく、そこにいる人の包括的な防護を確実にするために建物や場所を制御することで、ラドンにうまく対処するのである。

(60) ラドン被ばくが、計画被ばく状況に付随して起こるようなケース（たとえば、原子力施設や病院の放射線科でのラドン被ばく）では、委員会は実利的なアプローチを勧告する。3.3.5 節に記しているように、作業員のラドン被ばくが、もし職場の特定のグレーデッドアプローチの範囲内で避けがたいのであれば、それは包括的な職業被ばくの一部に過ぎないと見なすべきである。

(61) ラドン被ばくの管理に関する委員会のアプローチは、場所の種類にも直接的に関係している。*Publication 65* (ICRP, 1993) では、住宅における防護アプローチと職場における防護アプローチとを区別している。同じ地域内の住宅、職場や複合用途ビル内を典型的に移動する特定の人を考えると、委員会は、公衆被ばくに対する要件を用いて、すべての建物での防護に対する統合的グレーデッドアプローチを勧告するものである。また、委員会は、定量的判断基準としての参考レベル、または定性的判断基準としての対策あるいは設備のリストに基づいて確認される一部の職場においては、職業被ばくの要件を適用するのが適切であると考えている (3.3.5 項を参照)。

(62) この新しいアプローチによって、委員会は、これを超えたら職業被ばくの防護要件が職場のラドン被ばくに適用されるという濃度を記載するために、*Publication 103* (ICRP, 2007, 298 項) で採用された「導入ポイント」という用語をもはや使わないこととする。

3.2 防護戦略の正当化

(63) ICRP の防護体系では、正当化の原則は、線源に関連する 2 つの基本原則の 1 つである (ICRP, 2007, 203 項)。この原則を適用する上で、放射線被ばく状況を変更する決定がどのようなものでも、害よりも便益を多くもたらすべきである。この原則は、新たな放射線源を導入することにより、現存被ばくを減じる、あるいは潜在被ばくのリスクを減じることによって、それがもたらす損害（デトリメント）を相殺するのに十分な個人的あるいは社会的便益を達成すべきである、ということの意味している。

(64) ラドン被ばくは、主に被ばく経路を変更する対策によって制御することができるが、

線源についての直接の対策では、通常、制御できない。このような状況では、ラドン被ばくに対する防護戦略を実施するか否かを決定する際に、正当化の原則を適用する。このような決定には、常に何らかの不利益を持ち、それが害よりも便益を多くもたらすべきという意味で正当化すべきである（ICRP, 2007, 207 項）。社会の全般的な利益を確保するためにラドン防護戦略の正当化について判断することは、政府や国の当局の責任である。国の当局がラドン防護戦略が国内で正当化されるか否かを判断するためには、公衆衛生に関する優先事項や社会的・経済的要因について考慮するだけでなく、ラドン濃度の評価やラドン高濃度地域の特定といった状況把握が必要である。

(65) 委員会は、国のラドン防護戦略の実施を幅広く正当化する論拠は、数多くあると考えている。これらは次の項目を含む。すなわち、

- ラドンは放射線被ばくの重大な線源であり、一般公衆の肺がんの原因としては、喫煙に次ぐ 2 番目の因子である。
- 屋内のラドン濃度が高くなることを防止し、また緩和することが可能な手法が存在するため、ラドン被ばくは制御できる。
- ラドン防護戦略は、室内空気質政策や禁煙政策といった、他の公衆衛生に関する方策に関してプラスの結果をもたらすことができる。ラドン濃度を低減することは、たばこの健康影響を緩和することにつながる。

(66) 生涯非喫煙者と比べて、喫煙者や過去に喫煙していた人の方が、ラドンが肺がんを引き起こす可能性は格段に高く、過去に一度も喫煙習慣がなかった人では、ラドンが肺がんの最大の原因であることを示唆する証拠がある（WHO, 2009）。過剰相対リスクは、喫煙者と非喫煙者で同じである。実際のところ、喫煙者、非喫煙者、受動喫煙者、あるいは過去に喫煙習慣があった人に対して、個別にまたは異なる方法でラドン問題に対処することは困難であると思われる。たとえば、建物内で喫煙を制限することはできるが、個人の喫煙状態に基づいて建物への個人の立ち入りを制限することは、現実的ではないと思われる。職場という状況において、喫煙者と非喫煙者を区別すると倫理的・社会的な問題が生じると思われるが、これは委員会の権限が及ばないところである。ラドン被ばくの管理に関する委員会の勧告は、喫煙者と非喫煙者を区別しない。

3.3 防護の最適化

(67) 防護の最適化は、放射線防護における 2 番目の基本原則であり、防護体系の中核を成すものである。正当化の原則と同様に、これは線源関連であり、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況、現存被ばく状況に適用される。最適化の原則では、被ばくの可能性、被ばくする人の数、個人線量の大きさすべてが、経済的・社会的要因を考慮に入れて合理的に達成できる限

り低く維持されるべきである。このことは、防護のレベルは、その時点で広くみられる状況の下で可能な限り最善であるべきで、害を上回る便益の幅を最大にすべきだということを意味している。この最適化措置の結果が、大幅な不公平になるのを防ぐために、特定の線源からの個人に対する線量またはリスクの制限があつてしかるべきである（線量拘束値またはリスク拘束値と参考レベル）（ICRP, 2007, 203 項と 211 項）。

(68) 防護の最適化原則の実施は、放射線防護プログラムを成功させる上で欠かすことができないプロセスである。被ばく状況の関連する属性について考慮するため、慎重に組み立てなければならない。さらに、被ばく状況に応じて、関連するステークホルダーの参加も含まれるべきである。委員会は、この2つを、最適化プロセスの重要な要素であると考えている（ICRP, 2006b, 23 項）。

3.3.1 参考レベル

(69) *Publication 65* (ICRP, 1993) では、委員会は、継続的に 10 mSv の年間実効線量を超える住宅のラドンに対する改善策の中には、ほとんど常に正当化されているものがあると考えた。また、委員会は、住宅を対象とした対策レベルと同じ実効線量のレベルで、職場における介入の対策レベルを採用するのが論理的であると考えた。そして、単純な改善策の場合は、いくらか低い数値が考えられると仮定して、委員会は、住宅や職場における介入のための対策レベルを採用する基礎として、およそ 3 ~ 10 mSv の範囲を使用することを勧告した。対策レベルは、住宅や職場における被ばくを低減するために、介入が推奨されるラドンの年平均濃度と定義された。

(70) *Publication 103* (ICRP, 2007) では、委員会は、対策レベルという概念を止め、代わりに最適化の原則とともに参考レベルという概念を導入した。参考レベルとは、緊急時被ばく状況と現存の制御可能な被ばく状況において、それより下では、すべての線量を経済的・社会的な要因を考慮に入れて合理的に達成できる限り低いレベルに低減することを目標とするレベルを表す。参考レベルはまた、それを上回る被ばくの発生を許容することは適切でないと判断するレベルでもある。

(71) 対策レベルという概念の代わりに参考レベルという概念を使用した結果、最適化は参考レベルを上回るときだけでなく、上回ったときも下回ったときも該当する場合は適応される。参考レベルは、「安全」と「危険」の境界線を表すものではないし、あるいはそれに付随する個人の健康リスクにおいて質的な変化を反映するものではないことを、心に留めておかなければならない。

(72) *Publication 103* (ICRP, 2007) によれば、「参考レベルに対して選択される値は、考慮されている被ばく状況の一般的な事情に依存するであろう」(ICRP, 2007, 234 項) となっている。委員会は、適切な数値を選ぶためのガイダンスを示すことを目的として、リスクの連続性（し

きい値なしの直線仮定)の下で、人が自らの意思で受け入れるリスクは被ばく環境によって変わる、という事実を反映した線量スケールを定めている (ICRP, 2007, 表 5)。このスケールは、対策の必要性の多寡を考慮して3つのバンドに区分されているが、それは被ばく状況の特徴、すなわち、線源の制御可能性、状況から得られる個人または社会的な便益、そして情報、訓練および線量の監視あるいは医学的監視に関する要件、といった特徴に依拠している。数値的に言えば、急性被ばく線量または年線量の3つのバンドは、 $< 1 \text{ mSv}$ 、 $1 \sim 20 \text{ mSv}$ 、 $20 \sim 100 \text{ mSv}$ である。

(73) *Publication 103* (ICRP, 2007) によれば、現存被ばく状況の参考レベルは、 $1 \sim 20 \text{ mSv}$ のバンドに設定すべきである。これは、個人が被ばく状況から直接的な便益を受ける場合や、被ばくが線源で制御できるか、または被ばく経路における対策によって被ばくが制御できる場合に適用される。そのため、個人が自分の線量を低減できるように、可能な場合は全般的な情報が入手できるようにすべきである。通常、ラドン被ばくは(多少の例外は別にして)線源で制御することはできないが、不均衡に混乱を招かない予防と緩和対策によって、多くの経路を通じて制御することが可能である。人は通常、屋内にいることにより明らかに直接的な便益を得る。したがって、他の建物に移転したり、さらには他地域に移動したりするよりも、建物を使い続けたり住み続けたりする方に便益がある。

(74) *Publication 103* (ICRP, 2007) において、委員会は、*Publication 65* (ICRP, 1993) で採用された実効線量の上限值 10 mSv を個人の参考レベルとして、そのまま採用した。この数値は $1 \sim 20 \text{ mSv}$ のバンドの中ほどに位置するが、*Publication 103* (ICRP, 2007, 表 5) に示されている根拠と一致している。継続性と現実性を考えて、委員会は、引き続き 10 mSv/年 オーダーの参考レベルを勧告する。委員会は、測定可能な量である屋内ラドン濃度 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) として設定される誘導参考レベルを使用することも勧告する。

3.3.2 ラドンの誘導参考レベル

(75) 委員会は、『ラドンに関する声明』(ICRP, 2010) のなかで、疫学的検討に基づき、住宅におけるラドンの誘導参考レベルを $600 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ [2007年勧告で発表された数値] から $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ に引き下げた。委員会は引き続き、住宅におけるラドンの誘導参考レベルの上限值として、 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ を勧告する。 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ に関連付けられる唯一の年線量はないが、このレベルのラドンで被ると予想される年線量のほとんどは、委員会が対象としている現存被ばく状況に対して、適切であると確認している範囲内 ($1 \sim 20 \text{ mSv/年}$) に収まることは明らかである。

(76) WHO は、『屋内ラドンに関するハンドブック』のなかで、 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ という住宅を対象とした国の参考レベルは、公衆衛生の観点から正当化された数値であると記しているが、このレベルが多くの国で実現不可能であることも認識していた (WHO, 2009)。 $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ と

いう数値はすでに、国際基本安全基準（IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011）や最近改訂された欧州基本安全基準（EURATOM, 2014）などで、基準として採用されている。*Publication 103*（ICRP, 2007, 295 項）で述べられているように、一般の経済的・社会的状況を考慮して、国独自の誘導参考レベルを定め、ついでその国の防護の最適化のプロセスにこれを適用することは、他のすべての制御可能な放射線源と同様、その国の関係当局の責任である。委員会は、国の誘導参考レベルを $100 \sim 300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲内で、合理的に達成できる限り低く設定することを国の当局に対して強く奨励する。重要な点は、誘導参考レベルが建物や場所のラドンの年平均濃度に関連していることに注意を払うことである。なお、ラドン被ばくに起因する肺がんの絶対リスクは、非喫煙者よりも喫煙者の方がきわめて高いのであるが、ラドンに対する防護に関する委員会の勧告は、喫煙者と非喫煙者を区別しない。

(77) 人々は同じエリア内をあちらこちら移動するため、ラドン防護戦略は国の当局が策定し、さまざまな場所において一貫し統合的な方法で実施するべきである。したがって、委員会は、まず、住宅の誘導参考レベルと、公衆の構成員と作業者の両方が出入りする複合用途ビル（学校、病院、店舗、映画館など）の誘導参考レベルに、同じ値を使用することを勧告しており、そしてさらに拡張して、ラドン被ばくが職業被ばくではないと見なされていて一般公衆が出入りしない職場（たとえば、オフィスビル、一般的な工場）に対しても、同様に対処することを勧告する。

3.3.3 最適化プロセス

(78) *Publication 101, Part 2*（ICRP, 2006b, 22 項）には、「広く存在している事情の下で（通常、緊急時あるいは現存の制御可能な被ばく状況で）最良の防護を提供するためには、線量制限値未満でのこのプロセスは、継続的で循環するプロセス（いわゆる最適化プロセス）を通じて履行されなければならない。このプロセスには、行動の必要を同定するための被ばく状況の評価（プロセスの組立て）；合理的に達成できる限り低く被ばくを保つための可能な防護選択肢の同定；現在の事情の下における最良選択肢の選択；効果的な最適化プログラムを通して選ばれた選択肢の履行；そして、現在の事情が是正のための防護対策の履行を必要とするかどうかを評価するための、被ばく状況の定期的見直しが含まれる」と記載されている。

(79) 委員会は、最適化に関連して、予防策と緩和策は区別する必要があると考えている。前者は、予想される被ばくをその時点で広く行き渡っている状況の下で、合理的に達成できる限り低いレベルに維持することを目的としており、後者は、残存線量を合理的に達成できる限り低いレベルに低減することを目的としているからである（図 3.1）。ラドン被ばくについて、予防策は、新築の建物の屋内ラドン濃度が高くなることを防止するために、建築基準を施行することに注意を注いでいるが、一方、緩和策は、換気管理といった手法を使用して、既存の建物内の高ラドン濃度を低減することに注意を注いでいる。

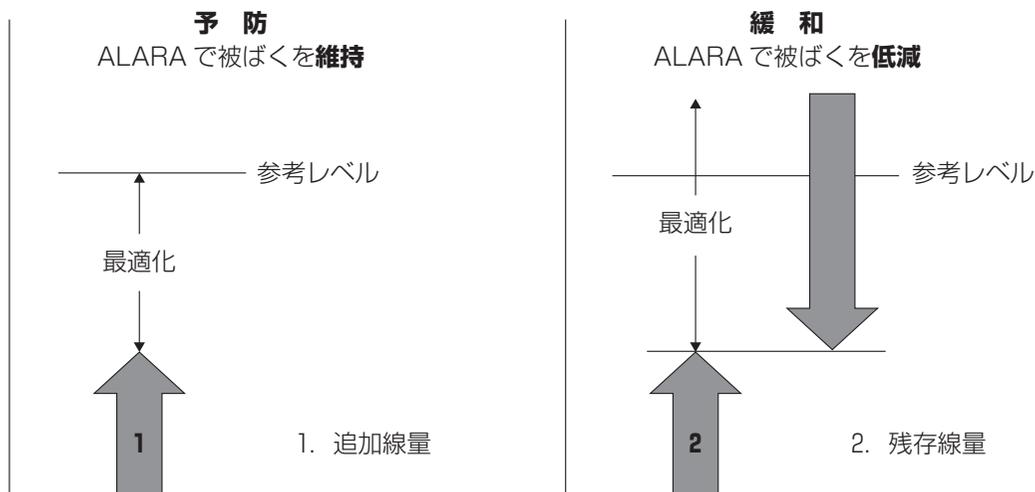


図 3.1 最適化原則の実施

ALARA は、「経済的・社会的状況を考慮に入れて、合理的に達成できる限り低く」である。

(80) 最適化プロセスの目的は、一般公衆の全体的なリスクを低減すること、そして公平性を期するために最も被ばく程度が高い個人、つまり、個人被ばくの分布の上限に位置する人たちの個人リスクを低減することである（図 3.2 を参照）。どちらのケースでも、そのプロセスは、建物や場所の管理を含んでいるが、その結果合理的に達成できる限り、屋内空気中のラドン濃度を国の誘導参考レベルよりも低くするべきである。対象とする建物では、管理対策が問題なく実施されたあとに、唯一継続した要求事項は、ラドンのレベルが低く保たれていることを確認するための、緩和システムの日常的な点検と保守、定期的な監視を行うことであろう。

(81) 一般公衆のラドンのリスクを大幅に低減するという目標は、数年ではなく、数十年という期間を要する。

(82) 建物や場所におけるラドン被ばくの防護の最適化は、費用便益分析や多属性手法など、標準的な最適化手法を用いて決定することができる。特に被ばくが大変高く、継続している場合には、被ばくの公平性の問題に十分に配慮して技術的、経済的、社会的、倫理的といった関連するすべての属性を考慮しなければならない。それゆえ、被ばくが異なるレベルで、特定の集団では予防対策と防護対策の選択に関わるが、ラドンが原因と思われる肺がんの推定患者数に関連する財政上の経費と、ラドン被ばくを低減するための予防および防護措置の対策経費とを比較することができる（HPA, 2009; WHO, 2009）。このような分析は、既存の地所や新築の建物のラドンレベルを低減する措置の費用対効果決定に情報を与えるために、使用することができる。

3.3.4 国の誘導参考レベル

(83) すでに述べたように、広く行き渡っている経済的・社会的状況を考慮して、国独自

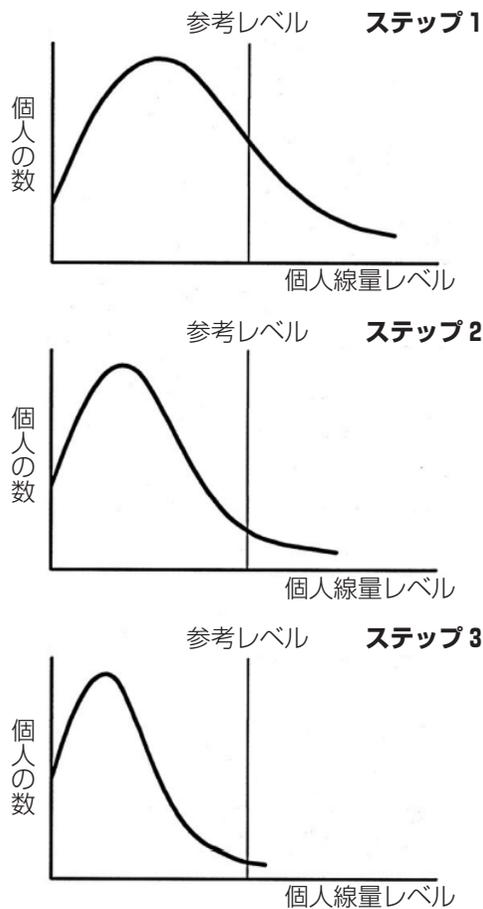


図 3.2 現存被ばく状況における参考レベルの使用と最適化プロセスの結果としての個人の被ばく分布の経時的進展

の誘導参考レベルを屋内のラドン濃度 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) で設定し、その国の防護の最適化プロセスを適用することは、他のすべての制御可能な放射線源と同様に、その国の関係当局の責任である。3.2.2 節に記したように、委員会は、 $100 \sim 300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲で、合理的に達成できる限り低いレベルに国の誘導参考レベルを設定することを、国の当局に対して強く奨励する。

(84) 第一段階は、その国における関連する経済的・社会的な判断基準と同様、個人と一般公衆の被ばく状況の特徴を明らかにし、被ばくを緩和し、あるいは予防することの実行可能性についても明らかにすることである。次に、全般的な最適化のプロセスによって、誘導参考レベルの適切な値が設定されるであろう。このプロセスでは、国や地域の属性や優先事項、適宜、国際的なガイダンスや他の場所での優れた実績を考慮する。ラドンの平均濃度や分布、ラドンレベルが高い既存の家庭の軒数など、多くの要因が考慮されるべきである。

(85) 国の誘導参考レベルが設定された場合には、必要に応じて、ラドン被ばくの大幅な

低減の実現に役立つように、予防と緩和対策を実施すべきである。ラドン濃度を国の誘導参考レベルよりも少しだけ低い値にすることを目標にして、若干の改善をするだけでは十分でない。また、建物を新築する際は、その目的のいかんを問わず、設計段階で国の誘導参考レベルを適用すべきである。

(86) ラドン被ばくの国の誘導参考レベルの値は、それが適切であることを確認するために定期的にレビューすべきである。

3.3.5 グレーデッドアプローチ

(87) 委員会は、ここで、ラドン被ばくの制御にグレーデッドアプローチを適用すべきと勧告する。このアプローチでは、ラドン戦略は、関係する意志決定者が、測定および必要な場合は改善策などの自助防護策の促進を奨励することを目的としたプログラムから開始すべきである。このプロセスは、情報、助言、インセンティブ、現実的な支援、そして必要であれば、もっと正式な要求に基づいて実施することができる。このようなさまざまな対策をどの程度実施するかは、状況に対する法的な責任の程度、国のラドン防護戦略が望む程度に依存すべきである。

(88) ラドン防護戦略には、ラドンの挙動やリスクに関する一般的な情報の提供、対象となる一般公衆の意識を高めることを目的としたキャンペーン、濃度測定のキャンペーン、測定や改善対策に対する技術的あるいは財政的支援の組織化を含む対策プログラムを含めるべきである（4章を参照）。このような対策は、ラドン高濃度地域といった特定のエリアや多くの人が利用する建物を対象に優先的に実施してもよい。これには、多くの人が使用している建物や、しばしば住居として時間の大半を過ごす人が居合せる建物も対象となるであろう。

(89) 法的な責任が伴う状況（雇用主と従業員、家主と賃借人、建築業者と購入者、販売業者と購入者、収容能力の高い公共の建物など）では、何らかの義務的規定が必要になることもある。義務的規定がその時点で広くみられる状況でより効果的であろうと評価が示す場合には、責任の種類や程度に釣り合った義務的規定が、動機に基づいた規定よりも適切な場合がある。このような規定は、追跡性の良さ、記録の保持、そして誘導参考レベルへの遵守を保証するためのものとなり得る。

(90) ラドン防護戦略は、要件が責任者や組織に利用できる手段に見合ったものであり、またリスク低減の点で、便益が害を上回るように保証するべきである。たとえば、要件が、人々にラドンの初期測定を妨げたり、資産価値の減少を招いたり、あるいは過度な手順が必要となるようにするべきでない。建物のラドン濃度が高い場合には、建物の利用者などの関連するステークホルダーの関与と、彼らとのコミュニケーションを含む対応を行うべきである。参考レベルをクリアしていない場合にも、結果を状況に適応させるべきである。たとえば、住宅の責任者の場合、測定結果を（当局や購入者などに）提示したり、改善策を実施する義務が生じた

りすることになるかもしれない。

(91) ほとんどの職場では、作業者のラドン被ばくは付随的なものであり、業務活動よりも場所に関連している。このような被ばくは、委員会の定義では職業被ばくとは見なされない。このような考えは、従業員に対する雇用主の法的な責任に影響するものではない。この分類の職場には、学校、病院、郵便局、刑務所、店舗、映画館、オフィスビル、一般的な仕事場など、ほとんどの複合用途ビルが含まれる。

(92) ラドン被ばくが付随的と見なされ、職業被ばくではないと考えられるすべての職場において、グレーデッドアプローチの最初の段階は、国の誘導参考レベル ($300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下) を用いて作業場所を管理し、最適化プロセスを実施することである。従業員に対する雇用主の法的責任は、規制要件や合意基準、あるいは国のラドン戦略実施の一環として、建物内でのラドン被ばくの制御のために制定され得る他の基準を適用することによって行使される。

(93) 測定されたラドン濃度と実効線量の関係は、平衡係数や被ばく時間など、場所によって大きく変わり得るいくつかのパラメータに依存している。したがって、ある職場で誘導参考レベルを超えたとしても、これは必ずしも約 10 mSv の年線量に相当する線量参考レベルを超えることを意味するわけではない。

(94) したがって、職場において、屋内のラドン濃度を誘導参考レベル未満に保つことが困難な場合は、ラドン防護戦略におけるグレーデッドアプローチの第2段階として、より現実的なアプローチを用いたさらなる調査を実施できるようにすべきである。つまり、被ばく状況の実際のパラメータ（実際の滞在時間、ラドン子孫核種の測定など）を考慮に入れて、ラドン被ばくの評価を行うということである。このような方法で算出した線量を 10 mSv /年の線量参考レベルと比較して、さらなる対策の必要性と種類を決定すべきである。この段階での目的は、依然として特定の個人の線量を制御することではなく、建物の利用者全体の防護を確実にすることである。

(95) ラドン被ばくを低減するあらゆる合理的な努力にもかかわらず、個人線量が持続して 10 mSv /年を超えている職場については、作業者は職業被ばくを受けていると見なされるべきで、職業被ばくを対象に策定した関連する放射線防護要件を用いて管理されるべきである。その要件とは、被ばくした作業者の特定、情報、訓練、線量モニタリング（線量またはポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度による）と記録、そして健康監視である。いかなる場合も、個人線量は、現存被ばく状況の参考レベルとして設定されている $1 \sim 20 \text{ mSv}$ のバンドの上限值を超えないようにする必要がある。これが、グレーデッドアプローチの第3段階である。

(96) 一部の特定の種類の職場については、参考レベルよりも高いか低いかに関係なく、国の当局が作業者のラドン被ばくを職業被ばくと見なすべきであると決定することがある。それは、作業者が必然的にかつ実質的にラドンに被ばくし、そのラドン被ばくがより密接に、または明確に業務活動に関係しているからである。このような職場や業務活動（鉱山や地下の職

場、温泉など) のリストは国で作成すべきである。

(97) 作業者のラドン被ばくが職業被ばくであると考えられる職場では、委員会は、該当する場所を明確にすることを勧告する。これは、建物の一部、個別の建物、あるいは土地の一部であるかもしれない。このような場所において、雇用主は関連する職業被ばくの要件を遵守し、最適化の原則を適用すべきである。ラドン被ばく状況が計画被ばく状況であると見なすべきと国の当局が決定した場合は、職業上の線量限度によって線量制限が確実となるであろう(3.4節)。

(98) 委員会の見解では、作業者のラドン被ばくを職業被ばくと見なすか否かについての決定は、国の当局が行うべきである。

3.4 線量限度の適用

(99) *Publication 103* (ICRP, 2007, 203 項) によれば、線量限度の適用原則は ICRP の体系の3番目の基本原則である。この原則は、個人に関するものであり、計画被ばく状況だけに適用される。これは、患者の医療被ばくを除く計画被ばく状況においては、規制された線源からいかなる個人への総線量も、委員会が勧告する適切な限度を超えるべきでないことを意味する。一貫性を持たせるために、国の当局が初めから計画被ばく状況であると決めたラドン被ばく状況、典型的には作業者が職業被ばくしていると見なされる場合に、線量限度を適用すべきである。委員会が職業被ばくに対して勧告している線量限度は、定められた5年間の平均で年間20 mSv の実効線量として表されるべきであり、かつどの1年においても実効線量は50 mSv を超えるべきでないという追加の規定がついている (ICRP, 2007, 244 項)。

3.5 要 約

(100) 図 3.3 に、さまざまなラドン被ばく状況の管理を対象として、現在勧告されている全般的なアプローチを示す。

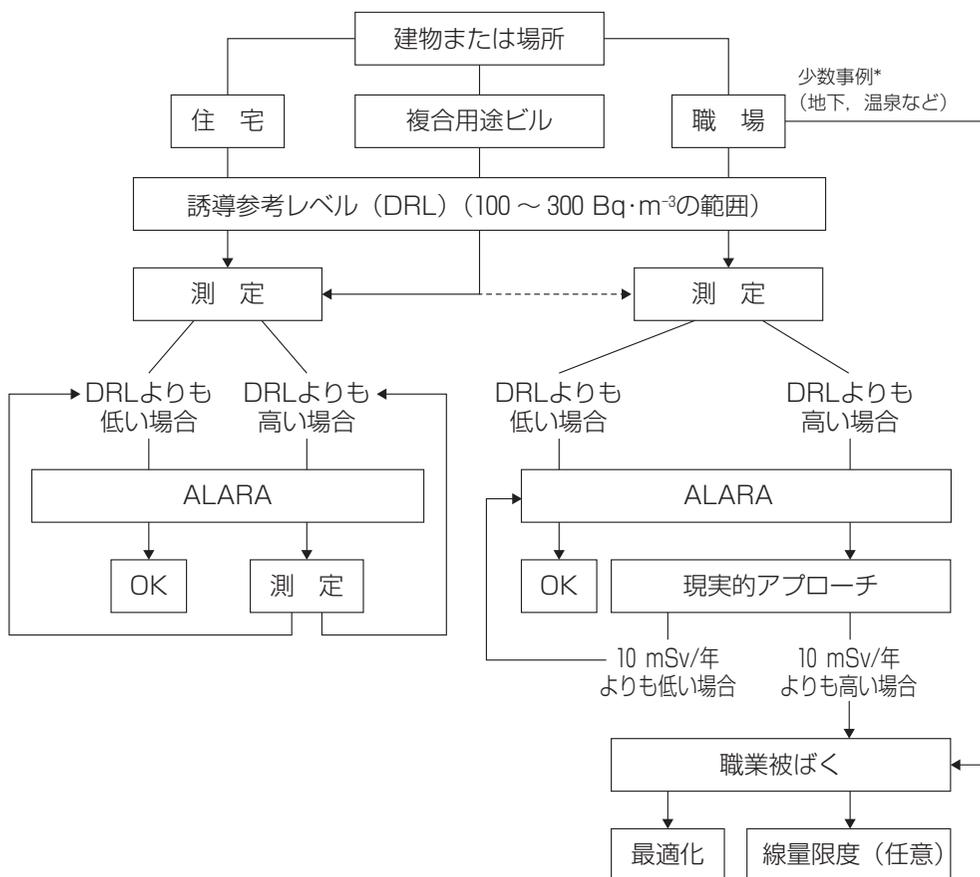


図 3.3 ラドン被ばくの管理に関する一般的なアプローチ

ALARA は、「経済的・社会的要因を考慮に入れて、合理的に達成できる限り低く」である。

*ラドン被ばくが職業被ばくであると国の当局が最初から見なしている職場

4. 防護戦略の実施

4.1 国の行動計画

(101) 国のラドン行動計画は、関連するステークホルダーの関与を得て、国の当局が策定すべきである。その目的は、最適化の原則を実施することによって、屋内ラドンの被ばくによる集団全体のリスクと、個人のリスクを低減することである。

(102) 行動計画は、明確なインフラを有する枠組みを確立し、優先順位と責任を決定し、そして国でラドンに対処する一連の手順を明確にすべきである。被ばくの状態に応じて、さまざまなステークホルダー、特に被ばく者と、支援を行ったり行動を起こしたりする人々を明確にすべきである。また、行動計画は、倫理的な問題—特に責任に関する問題—に目を向け、情報、ガイダンス、支援、そして持続可能性のための条件を提供すべきである。国のラドン行動計画は、できる限り、室内空気質や省エネルギーといった、建物に関するその他の戦略と一致する方法で、相乗効果を実現し、矛盾を回避するためにそれらと統合すべきである。

(103) 国のラドン行動計画の実施では、さまざまな分野（放射線防護、公衆衛生、労働、土地利用計画、住宅、建築など）を管轄する国、地方、地域の当局、さまざまな分野の専門家（建築家や建築の専門家、放射線防護の専門家、公衆衛生検査官、医療の専門家など）、さまざまな支援組織（専門家、支援機関、協会など）、そしてさまざまな責任のある個人や組織の間の協力が必要である。

(104) 行動計画には、奨励に基づく規定と義務的な規定の両方を盛り込むことができる。ラドン対策を実施する責任が詳細な最適化を実践することが期待できない個人に降りかかってくるのが往々にしてあることを考えると、行動計画は、自らの測定、適切な測定業務機関への紹介、建物の適正利用、そして単純な改善手法といった自助防護対策を通じてラドン問題に自分で対処できるようにするために、彼らに適切な情報と支援を提供すべきである。

(105) ラドン全国調査を実施する際は、広く認められている測定装置や測定手順を用いて、その国の公衆のラドン被ばくを代表するようなラドン濃度分布を決定すべきである。ラドン全国調査を実施する際に重要となる2つのポイントは、以下のとおりである。すなわち、

- 屋内ラドンに対する一般公衆の被ばくの平均値と、被ばくの分布を推定すること。この推定は、長期的なラドン測定が実施される代表的な選ばれた家庭で、人口の重み付けを加えた調査によって実施されるのが最善である。
- きわめて高い屋内ラドン濃度が確認される傾向が高い地域（つまり、ラドン高濃度地域）を

特定すること。このようなエリアの選別は、選ばれた家庭で行われる長期的なラドン測定に結びつけて実施されるのが最善である。

(106) ラドンマップは、ラドン濃度が高い住宅や建物を探しだす最適な手段として、また、新しい建造物の計画と建築時に、特別な予防対策を必要とするエリアを特定する手段として使うことができる。しかし、このような調査から得られた推定値は、ラドン高濃度地域と疑われるエリアで、選別された建物で実施している測定によって検証すべきである。

(107) ラドン高濃度地域は、地中のラドンガス濃度を利用して間接的に特定する（家庭のラドン濃度と、建物の基礎の下にある土壌中のラドンガス濃度を関連付ける移行係数が確立されている場合）か、あるいは、屋内ラドンの測定によって直接特定することができる。地質情報をこのプロセスの一部として使用してもよい。しかし、ラドン高濃度地域の定義は国によってさまざまである。ラドン高濃度地域は、行政区分や他の地域区分を利用して定義することができ、また、平均濃度（すなわち、算術平均値、幾何分布の中央値）や、誘導参考レベルを超えている建物の割合、また誘導参考レベルを超えている可能性といったさまざまな基準に基づいて定義することができる。ラドン高濃度地域の定義は、国のラドン行動計画で詳細に示すべきである。

(108) ラドン高濃度地域として確認されたエリアにおいても、建物内のラドン濃度の分布は極めて広く分散していることが多く、かつその大部分は数値が低いことである。逆に、ラドン高濃度地域に区分されていないエリアでも、可能性は低いですが、ラドン濃度が高い建物が存在することもある。したがって、ラドン高濃度地域の特定と同様に、高ラドン濃度と関連がありそうな建物の特性を明確にすることにも、ある程度取り組むべきである。

(109) 国のラドン行動計画は、特に法的な責任については、義務的な規定で構成される場合がある。たとえば、測定、結果の通知、記録の保存、誘導参考レベルの遵守などが、義務付けられることがある。しかし、国のラドン行動計画は、金銭的支援や財政措置とともに、測定活動を組織したり、住宅改善プログラムにラドン防護を入れるといった、インセンティブによる対策や支援策も適切な場合には含めるべきである。このような措置は定期的に繰り返し行われなければならない。

(110) 国の行動計画では、学校、幼稚園、介護施設、病院、刑務所など、広く公衆に利用される建物には優先権が与えられているが、そのような一般公衆が出入りする建物に配慮すべきである。これらの建物に居る人たちは、選択の余地なくその建物を利用せざるを得ず、そのような利用が一時的な場合があるにはあるが、建物内でかなりの時間を過ごしている。彼らは、濃度が高くなったラドンに彼ら自身が被ばくしていることに気付いていない可能性があり、それゆえ、彼らは自身で被ばくレベルを下げることはできない。

(111) 公衆の構成員と作業員の両方が利用する建物については、住宅を対象とした誘導参考レベルを使用すべきである。密閉された同じ場所内で異なる参考レベルを使用することは、

勧告しない。

(112) さらに、誘導参考レベルを遵守するために、予防対策と緩和対策を実施すべきである。ラドン濃度のモニタリングとその記録の管理が必要になる場合もある。また、建物を利用する公衆の構成員や建物内で働く職員に、関連情報を提供すべきである。このような種類の建物の責任者が、その責任や義務を果たせるようにするために、彼らに適切な支援をしなければならない。

(113) 国の行動計画は、国の当局の管理下にある職場など、一般公衆が利用する建物に適用可能なグレーデッドアプローチを用意することができる（3.3.5 節を参照）。

4.2 予 防

(114) ラドン防護戦略には、将来のラドン被ばくを制御する予防対策を盛り込むべきである。屋内の場所やそこに居る個人のカテゴリ、被ばく状況の区分に関係なく、建物の計画段階、設計段階、建築段階で、ラドン被ばくの問題をよく検討することによって、ラドン被ばくに対処することが可能である。予防対策は、土地利用計画と、新築の建物および既存の建物のリフォームを対象とした建築規準に基づいて実施する。

4.2.1 地方と地域の土地利用計画

(115) どの建物も屋内ラドン濃度が高くなる可能性があるが、その可能性は、特に地質条件が大きく違うことによって大きく変わる。地方や地域の土地利用計画プロセスを実施する際は、少なくともラドン高濃度地域では、このようなばらつきを考慮に入れるべきである。地質データ、地中のラドン測定値、または既存の建物における屋内ラドン測定値に基づいて、地域のラドンマップを作成してもよい（4.1 節を参照）。ラドンマップは、建物内や掘削井戸から供給される水中のラドン濃度データによって補完しなければならない。

(116) 地域のラドンマップと該当するデータは、地域、地方、国の関係当局、建築の専門家、住宅建築業者、そして一般公衆が閲覧できるようにして、そのような関係者が建物を計画し、建設し、そしてリフォームする際に役立つようにすべきである。

(117) 土地利用計画は強制的に実施される場合がある。そのような場合にもラドンマップは役に立つツールとして残っているが、決定的な結果をもたらすとは考えられない。建設前にその建物のラドン濃度を予測することは不可能である。土壌内での測定など、さらなる調査が役に立つ場合もある。しかし、建物内のラドン濃度は多くの要因によって決まるため、完成してすでに利用されている建物で得られた測定だけが、妥当な結果を与えることができる。きわめて例外的なケースを除いて、ラドンマップが、ラドン濃度を理由に建設が禁止されるエリアをつくる結果とならないようにしなければならない。

4.2.2 建築法規と建築基準

(118) 国、地方、あるいは地域の当局は、建築中または大がかりなリフォーム中の住宅や建物に対して、ラドン予防策を要求する建築法規または建築基準の施行を考える必要がある。建物の設計と建築中にラドン予防策を実施することは、一般公衆全体を防護するためには、最も経済性に優れた方法と考えられる。このような方策が正しく実施されると、国の平均ラドンレベルが低下し、そして、屋内ラドン濃度が国の誘導参考レベルを超えたりあるいはそのレベルに近い新築の建物の数は、次第に減少していくことになる。

(119) 建築法規や建築基準への遵守を徹底することは、重要なことである。品質保証プログラムは、適宜、専門家レベルまたは法規レベルで実施すべきである。重要な点は、このような建築法規や建築基準を施行するだけでは、新築の建物におけるラドンのレベルが誘導参考レベルを下回る保証はない、ということである。したがって、建物の管理者や所有者は、建物のラドン状況を把握する唯一の方法は、測定を通してであることを認識すべきである。また、必要に応じて、建設後のラドン緩和アプローチを検討すべきである。

4.3 緩和措置

(120) 国のラドン防護戦略には、既存の建物や、囲まれたスペースのある場所を対象とした緩和対策も入っているべきである。被ばくの制御は、その中にいる人の区分に関係なしに、建物（または場所）の管理と、その使用状態によってできるだけ確実に行われるべきである。その主な手段は測定であり、そして必要に応じて、予防対策である。

4.3.1 ラドンの測定手法と測定手順

(121) 対象とする建物や場所におけるラドン測定は、建物の利用期間や濃度の日日変化あるいは季節変化など、さまざまなファクターを考慮に入れて、利用者の長期的なラドン被ばくを正しく推定することを目指すべきである。ラドン測定においては、一貫性と品質保証が重要な条件である。したがって、ラドンの測定手順が策定され、定期的にレビューされ、そして必要に応じて更新されるべきである。標準化された測定方法は策定されている (ISO, 2012a ~ g)。

(122) 理想的には、短期間の推定においても、丸1年、すなわち、全季節を含む長期的な測定が好ましい。しかし、期間が長すぎると、検出器が移動されたり忘れ去られたり、といった問題が生じる可能性があるため、一般的には数週間から数か月といった短い期間が選ばれる。信頼できる測定値は、年間の平均濃度を代表すべきで、それに季節調整が加えられるかもしれない。測定は、低コスト、またはほどほどのコストで実施すべきである。測定装置には、使用方法に関して明確な指示書が付いていて、容易に入手できなければならない。緩和対策を実施したあと、緩和システムの有効性を試験するために、測定は最初の測定と同じ条件で行う必要

がある。また、状況が悪化していないことを確認するために、測定は定期的に繰り返す必要がある。

(123) 住宅や一般的な職場において、ラドン-222の子孫核種の測定値を利用する場合、屋内におけるラドンガスとその子孫核種との間の平衡係数が、0.4でないことを示す根拠がある場合を除いて、平衡係数を一般的な既定値の0.4と仮定して、ラドン濃度へ変換する。

4.3.2 さまざまな状況においてラドン被ばくを緩和する方法とその方法の適用性

(124) ラドン被ばくの緩和を達成する主な方法は、ラドンが居住空間に流れ込まないようにすることと、受動的な手法と能動的な手法の両方を使って、屋内空気からラドンを除去することである。

(125) ラドンの緩和の基本的な手法は、建物下の土壌から流出したラドンの対流や拡散を低減することを目的としたものであり、主に以下の措置に着目する。すなわち、

- 建物外壁の気密性の増強（ラドン流入経路の密封など）
- さまざまな土壌減圧手法（建物下の土壌内の圧力を低減する、ラドン溜めを設置する、地下貯蔵庫を加圧するなど）を利用した、屋内の居住スペースと屋外土壌との間の圧力差の逆転

(126) 外気で薄めることによって、屋内のラドン濃度を低減するという手法は、住宅で使えるもう一つの緩和手法である。緩和は、居住空間の換気を管理する受動的または能動的な手段で実現できる。屋内環境を温めたり冷やしたりする際に、平衡換気を行ってもよい。排気の平衡換気は、土壌や屋外の空気圧に関して、屋内の空気圧を昇圧も減圧もしない。この換気手法によって、建物内に侵入したラドンが薄められる。ファンによる換気では、ラドンが建物に侵入したあとに屋内のラドンを薄めることができ、土壌と居住空間の間の圧力差を低減することができる。このような解決策の中には、すべての種類の建物やすべてのラドンレベルには適していないものもある。いくつかのケースでは、これらの手法を組み合わせることによって、ラドン濃度の低減を最大にすることができる。

(127) 深掘りの井戸が水の供給源となっているような建物の場合、この水がラドンの発生源になっている可能性もある。水中のラドンが気化して部屋の空気に混じった場合は、（特に散布時に）きわめて短期間の被ばくが起こる。ラドンが水から周囲空気に流出することを緩和する主な手法には、水を使用する前にガス抜きをする手法、あるいは活性炭の層で水を濾過する手法がある。

(128) さまざまな緩和手法を紹介した詳細なガイドとして、国の機関や国際機関が策定したものがあ（WHO, 2009）。

4.4 建築材

(129) 建築材は、一般的に、ラドン被ばくにとって重要性は小さいが、ラドン-222が線源として無視することができない特殊なケースがある。さらに言えば、建築材（コンクリート、レンガなど）のトリウム濃度は、通常、屋内の空気中のラドン-220の唯一の線源である。したがって、壁面、天井、そして床の表面仕上げに使用される建築材（プラスターなど）のトリウム濃度を抑制することで、建物内のラドン-220のレベルが増大する可能性を下げることができる。建築材から受ける影響を防止し、最適化するには、ラジウム-226とトリウム-232の濃度が低い建築材を優先的に使用すべきである。特定の建築材から放出されるガンマ線によるリスクの特性を明確にすること、そしてその使用条件を指定することを目的にして、ベンチマークシステム（すなわち、放射能濃度の指標）が策定されている（EC, 1999）。一般的に、建築材がガンマ線に関して制御される場合、その建築材から放出されるラドンが、誘導参考レベルよりも相当に高い屋内ラドン濃度の原因となることはない。多量のラドン-220やラドン-222を放出する建築材の使用は、正当化が必要になるであろう。

4.5 作業者の防護

(130) 作業者のラドン被ばくが、職業被ばくとは見なされない職場では、放射線防護の目的に関して、作業者は公衆の構成員と同じように扱われる。しかし、一般公衆が職場に出入りできない場合（または一般公衆の出入りがきわめて限られた時間である場合）は、防護に対するグレーデッドアプローチを適用する一環として、最適化プロセスにおいて、若干の特定の規定や補完規定を定めてもよい。次のような規定が可能である。すなわち、

- 具体的な測定手順（作業者が居る時間と場所での測定など）。
- 線量の参考レベルとしての10 mSv/年の値を維持するために、滞在時間や平衡係数といった、実際の被ばくパラメータに基づいた誘導参考レベルを具体的に使用すること。
- 作業条件に関する取り決め（たとえば、いくつかの建物での滞在時間の制限などによる）。
- 測定の実施、結果の通知、記録保存、参考レベルの遵守に関する要件。

(131) このような具体的な規定を実施するために、国の当局の監督だけでなく、外部の専門知識が必要になるかもしれない。

(132) ラドンによる作業者の被ばくが、職業被ばくであると見なされる職場では、操業管理者と国の当局が、満足する必要がある要件を決定することが必要である。ラドン被ばくに関連する一般的な要件は以下のとおりである。すなわち、

- 滞在時間を考慮して、実効線量、ラドン濃度、またはポテンシャル・アルファ・エネルギー

濃度で示される適切な参考レベルを設定すること。

- 該当する作業エリアの決定。管理ないしは監督するエリアの分類がうまく適合しなくても、職業被ばくが発生する可能性があるエリアを決定し、このようなエリアへの立ち入りを適宜、規制することが重要であることは変わらない。
- 十分な情報、指示、および作業者の訓練。
- 一部の例外的なケースでは、個人用保護具の使用。
- 個人モニタリングや集団モニタリングによる被ばくモニタリング。それが不適切、不向き、実現不可能な場合は、作業場所のモニタリングによる推定。
- 被ばくの記録。
- 作業者の健康監視に関する規定。
- 放射線防護文化の推進。
- 参考レベルの遵守。これには、具体的な作業場所における時間をたどることを組み合わせた職場のモニタリングを含む。ラドンの個人モニターの値は、グループの平均値として、また個人の値としても使用できる。いずれにしても、線量が 20 mSv/年を超えてはならない。

4.6 ウラン採掘産業におけるラドンに対する作業者の防護

(133) 国の当局は、初めから計画被ばく状況としてラドンによる職業被ばくを管理するよう決定する場合がある。この典型的な例はウラン採掘産業である。この選択に影響を及ぼす要因には、ガンマ線による外部被ばくと放射性塵埃の吸入または経口摂取を含む、鉱山における他の線源による被ばくのレベルが含まれる。長寿命の放射性塵埃は、採掘中と精錬の初期段階のウラン鉱や、あるいはまた、ウラン精製品、多くの場合は酸化ウラン粉末である。また、工程によっては、その他のウラン壊変系列放射性核種に被ばくする可能性もあり得る。ウラン鉱山では、ラドン子孫核種が放射線被ばくの最大の線源となる場合もある。ウランやトリウムの採掘産業でラドン被ばくに対して作業者を防護することは、操業管理者の責任であると考えられる。

(134) ICRP の体系では、計画被ばく状況における被ばくは、線量限度の適用だけでなく、線量拘束値を用いた最適化プロセスで制御すべきである。理想を言えば、線量拘束値は操作の設計段階で決定すべきである。放射性原鉱石を含んでいる鉱床の性質は、きわめて変化に富んでいるので、資源を首尾よく採掘するには、さまざまな採掘方法やアプローチが必要とされる。したがって、最適化プロセスの結果と同様に、線量拘束値は鉱山によって異なり、場合によっては、同じ施設であっても時間が経つにつれ物理的条件が変わるに従い、(線量拘束値も) 変え得るであろう。

(135) ウラン鉱山において、ラドンとラドン子孫核種による職業被ばくを制御するために

用いられる原則は、他の職場において計画被ばく状況で使われる原則と同じである。これは、職場の綿密な設計と、ラドン被ばくを制限し制御する適切な工学的制御手段を用いることで始まる。ウラン鉱山では、ソースタームの相対強度やほかの物理的な制約（たとえば、地下での作業など）といったことが原因で、ラドンとその子孫核種による被ばくが大きく変化したり、高かったりすることが起こり得る。このような場合は、職場の条件と作業者の線量が適切に評価されるように、さらにモニタリングプログラムの詳細に注意を払う必要がある。ラドン濃度が高かつ変化する状況では、リアルタイムのモニターや個人線量計を使用するという戦略を検討すべきである。逆に、ラドンとその子孫核種の濃度が低く安定している状況では、職場を定期的に監視すれば十分であろう。一般的に、職場の強制換気は、ラドン子孫核種による被ばくを評価する上で、平衡条件の近似によるラドン濃度は信頼できないという結果をもたらす。したがって、ラドン子孫核種濃度（すなわちポテンシャル・アルファ・エネルギー濃度）の測定値を使用すべきである。

(136) ラドン子孫核種による被ばくを線量に換算するには、線量換算係数を使用する必要がある。以前には (ICRP, 1993)、ラドン子孫核種の線量換算係数は、疫学調査に基づいていた。現在、委員会は、ラドン子孫核種に被ばくしたあとの実効線量係数は、指定された放射線加重係数と組織加重係数を使用し、ICRP の標準体内動態モデルと標準線量評価モデルに基づいて算出することを提案している (ICRP, 2010)。このような線量係数が、疫学的知見に基づいた従来の線量換算規約に置き代わることになる。

4.7 ステークホルダー間の連携

(137) 国のラドン戦略を確実に支援する上で、まず行うことは意識を高めることであるが、多くの国で意識が低いように思われる。ラドンに関して容易に利用できる情報、いかにして密閉空間にラドンが閉じ込められているか、関連するリスク、そして高濃度であることを確認して、それを緩和する方法が、特に、選ばれた代表者、行政部局の公務員、自宅所有者、家主、雇用主、就学児などを通じて一般公衆に周知されなければならない。

(138) ラドン問題で訓練を受ける専門家（建築業者、建築家、放射線防護の専門家、従業員、労働組合、作業員など）は、勧告される予防と緩和の措置が適正に設計され、計画され、そして導入されることを確実にするために手助けをするであろう。専門家のための訓練プログラムは国のラドン行動計画において欠かすことができず、このプログラムによって、誘導参考レベルを超えるまたはそれに近いラドン濃度にさらされる世帯主や家主は、ラドンの予防と緩和のためのインフラを利用することができるようになる。関係するその他の専門家（健康や不動産の専門家など）にも適切な情報を提供し、適切な訓練を施すべきである。

(139) 肺がんのリスク評価において、ラドンと喫煙の間の相乗効果は実証されているので、

少なくとも警告という点で、ラドンの低減のための公衆衛生プログラムと禁煙政策との関係が必要である。

(140) 国のラドン対策計画には、予防対策と緩和対策の両方の費用と、有効性に関する情報の条項を含むべきである。さまざまなレベル（つまり、地域、地方、国といったレベル）でデータを定期的に収集して、さまざまなステークホルダーに公開されるべきである。

5. 結 論

(141) 本報告書の目的は、放射線防護体系の進展 (ICRP, 2006b, 2007) と、ラドン被ばくに伴う健康リスクに関する最新の知見 (UNSCEAR, 2009; WHO, 2009; ICRP, 2010), そして過去数年間で多くの国や国際組織が得た経験を考慮して、ラドン被ばくの放射線防護に関する最新のガイダンスを示すことである。

(142) 同じテーマに関する過去の勧告 (ICRP, 1993, 2007) では、委員会は、住宅と職場の防護アプローチについて、区別した戦略を勧告した。委員会は、ここで、建設目的や居住状況にかかわらず、すべての建物を対象としたラドン被ばくの防護に関する統合的アプローチを勧告する。国の行動計画に基づいて実施される建物における防護戦略は、空気中の濃度として設定される誘導参考レベルよりも低いレベルに最適化するという原則を適用することに基づいている。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、 $100 \sim 300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲内で合理的に達成できる限り低く誘導参考レベルを設定することを国の当局に奨励する。

(143) 被ばく状況に応じて段階的にしたこの新しいアプローチの目的は、少なくともラドン高濃度地域においては、公衆衛生という観点からすべての建物 (住宅, 複合用途ビル, 一般的な職場) をカバーすることにある。委員会は、あらゆる種類の建物において、主に建築基準に基づく予防対策の役割を強調する。

(144) この報告書では、作業者が職業的に被ばくしていると見なされる、具体的なラドン被ばく状況の管理に関するガイダンスを記載している。また、参考レベルを遵守できない被ばく状況, あるいは国の当局が定めた対策や施設の全国リストに載っている被ばく状況を対象としている。次に、防護戦略は、最適化の原則の適用と、職業被ばくに関連した要件に基づいている。国の当局が、ラドン被ばく状況を計画被ばく状況として管理するべきであると見なす場合は、職業上の線量限度を適用しなければならない。

(145) 委員会は、ほとんどのラドン被ばく状況に対して、単純で統合的なグレーデッドアプローチを勧告することによって、世界的に、公衆被ばくの主たる原因であるラドンによる被ばくを低減できると強く考えている。

参考文献

- Cothorn, C.R., Smith, Jr, J.E., 1987. Environmental Radon. Plenum Press, New York, pp. 98–107.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* **330**, 223–227.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., et al., 2006. Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* **32** (Suppl. 1), 1–84.
- EC, 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Luxembourg.
- EPA, 1999. Proposed Methodology for Assessing Risks from Indoor Radon Based on BEIR VI. Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EPA, 2003. Assessment of Risks from 1106 Radon in Homes. Publication EPA 402-R-1107 03-003. Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EURATOM, 2014. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for the protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union L* **13**, 1–73. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF> (last accessed 7 April 2021).
- Haerting, F.H., Hesse, W., 1879. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Scneeberger Gruben. *V. gericht. Med. Öff. Gesund Wes.* **30**, 296–309 and **31**, 102–132, 313–337 (in German with English abstract).
- HPA, 2009. Radon and Public Health. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Health Protection Agency, Chilton.
- Hultqvist, B., 1956. Studies on Naturally Occurring Ionising Radiations. Thesis. *K. svenska VetenskAkad. Handl.* **6**(3). Almqvist u. Wiksells Boktryckeri, Stockholm.
- IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition.
- IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf (last accessed 7 April 2021).
- IARC, 1988. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC Vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- 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, 2006a. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. *Ann. ICRP* **36**(1/2).
- ICRP, 2006b. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101, Part 2. *Ann. ICRP* **36**(3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2009. 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, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. *Ann. ICRP* **40**(1).
- ICRP, 2014a. Occupational intakes of radionuclides Part 1. ICRP Publication 130. *Ann. ICRP* **44**(2).
- ICRP, 2014b. Occupational intakes of radionuclides Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP* **46**(3/4).
- ISO, 2012a. 11665 – Part 1: Radon-222 and its Short-lived Decay Products in the Atmospheric Environment: their Origins and Measurement Methods. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012b. 11665 – Part 2: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay Products in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012c. 11665 – Part 3: Radon-222: Spot Measurement Methods of the Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay Products in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012d. 11665 – Part 4: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment Using Passive Sampling and Delayed Analysis. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012e. 11665 – Part 5: Radon-222: Continuous Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012f. 11665 – Part 6: Radon-222: Spot Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
- ISO, 2012g. 11665 – Part 7: Radon-222: Methods for Estimation of Surface Exhalation Rate by Accumulation Method in the Environment. International Standards Organisation, Geneva.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., et al., 2006. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* **69**, 533–597.
- Lubin, J.H., Tomasek, L., Edling, C., et al., 1997. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat. Res.* **147**, 126–134.
- Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, Jr, J.D., et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* **109**, 132–137.
- Ludewig, P., Lorenzer, E., 1924. Untersuchungen der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt von Radium-Emanation. *Z. Phys.* **22**, 178–185.
- Marsh, J.W., Bailey, M.R., 2013. A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* **157**, 499–514.
- Marsh, J.W., Harrison, J.D., Laurier, D., et al., 2010. Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Phys.* **99**, 511–516.
- NRC, 1998. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI Report. National Research Council, Washington, DC.
- Skeppström, K., Olofsson, B., 2007. Uranium and radon in groundwater: an overview of the problem. *Eur. Water* **17/18**, 51–62.
- STUK, 2008. Indoor Radon Mitigation. STUK-A229. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki (in Finnish).
- Tomášek, L., Rogel, A., Tirmarche, M., et al., 2008. Lung cancer in French and Czech uranium miners – risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure. *Radiat. Res.* **169**, 125–137.
- UNSCEAR, 2000. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from Natural Radiation Sources. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

- UNSCEAR, 2009. UNSCEAR 2006 Report: Annex E: Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27–31 August 1984. World Health Organization, Copenhagen.
- WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.
- Winkler, R., Ruckerbauer, F., Bunzl, K., 2001. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* **272**, 273–282.

ICRP Publication 126
ラドン被ばくに対する放射線防護

2021年12月23日 初版第1刷発行

監修 本間 俊 充
翻訳 下 道 國
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7F
原子力規制庁 長官官房放射線防護グループ
放射線防護企画課

電 話 03-5114-2265 (課代表)

F a x 03-5114-2266

翻訳公開URL https://www.nsr.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html

© Nuclear Regulation Authority, Japan, 2021

Printed in Japan

DTP 株式会社フォレスト

【非売品】

ICRP

Publication 126